

Studi Numerik Pengaruh Variasi Tekanan Input, Variasi Putaran Poros, Variasi Tinggi Rongga dan Variasi Panjang Rongga (Pitch) terhadap Laju Kebocoran Aliran Uap *Refrigerant* (R123)

Moh Anggun Wibowo dan Prabowo

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: prabowo@me.its.ac.id

Abstrak—*ORC (Organic Rankine Cycle)* merupakan teknologi yang dapat memanfaatkan tekanan rendah serta temperatur rendah dari panas bumi untuk dikonversi menjadi energi listrik. Salah satu komponen yang terpenting dalam *ORC* adalah turbin uap. Untuk memaksimalkan efisiensi turbin uap maka kebocoran yang terjadi pada turbin uap harus diminimalisir sekecil mungkin. Untuk meminimalisir hal tersebut maka perlu adanya penggunaan *labyrinth seal*. Pada dunia industri banyak jenis *labyrinth seal* yang dipakai, salah satunya adalah *stepped labyrinth seal*. Penelitian ini dilakukan dengan metode numerik (CFD) dengan *software Fluent 6.3.26*. Simulasi menggunakan model turbulensi *k-ε RNG*. Penelitian ini menggunakan variasi tekanan inlet yaitu 5, 10 dan 15 bar, putaran poros 0, 1500 dan 3000 rpm, tinggi rongga 3,415 mm, 3,915 mm dan 5,915 mm serta panjang pitch 4, 6, 8, dan 10 mm. Pada variasi tekanan inlet laju kebocoran paling besar terjadi pada tekanan 15 bar. Pada variasi putaran poros laju kebocoran yang terjadi sama pada setiap variasi. Pada variasi tinggi rongga laju kebocoran paling besar terjadi pada tinggi rongga 5,915 mm. Pada variasi panjang pitch, laju kebocoran paling besar terjadi pada panjang pitch 4 mm.

Kata Kunci— *Stepped labyrinth Seal, Laju Kebocoran, Pressure Drop, Kecepatan Fluida, CFD.*

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara kepulauan yang mempunyai sumber daya energi yang melimpah. Letak geografis Indonesia yang terletak di daerah *ring of fire* menjadikan negara ini kaya akan sumber energi panas bumi. Negara Indonesia memiliki 251 lokasi daerah potensial penghasil panas bumi [1]. Lokasi tersebut menyebar di seluruh wilayah Indonesia mulai dari pulau Sumatra, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, Maluku, Nusa Tenggara dan Papua. Potensi energi yang dapat dihasilkan dari semua lokasi tersebut sebesar 28 GW [1]. Pemanfaatan panas bumi di Indonesia belum maksimal dari potensi tersebut hanya 1,196 MW yang baru bisa dimanfaatkan [1]. Hal ini disebabkan oleh tekanan maupun temperatur yang dikeluarkan relatif rendah (3 bar dan $< 120^{\circ}$ C) dimana pada akhirnya uap tersebut dibuang begitu saja tanpa ada pemanfaatan. *Organic Rankine Cycle (ORC)* mampu bekerja pada temperatur dan tekanan yang relatif rendah. Salah satu komponen utama dari siklus *Organic Rankine Cycle (ORC)* adalah turbin uap yang berguna sebagai *turboexpander*. Pada sistem *Organic Rankine Cycle (ORC)* fluida kerja yang digunakan adalah fluida organik seperti *refrigerant, silicone oil, hydrocarbon, dan fluorocarbons*. Fluida *refrigerant*

dipilih karena memiliki temperatur didih yang rendah jika dibandingkan dengan air, sehingga dengan temperatur yang rendah dapat mengubah fluida tersebut menjadi uap *superheated*. Tetapi *refrigerant* memiliki nilai ekonomis yang lebih tinggi dari pada air. Hal inilah yang menjadi permasalahan ketika akan merancang sistem *Organic Rankine Cycle (ORC)*. Untuk mencegah terjadinya kebocoran maka perlu adanya penggunaan penyekat (*Seals*) pada turbin uap.

Seals merupakan part yang digunakan untuk mencegah serta membatasi fluida yang terletak antar komponen. Secara umum seal dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu seal untuk komponen statis (*Static Seals*) dan seal untuk komponen dinamis (*Dynamic Seals*). Turbin memakai seal yang berasal dari jenis *non contacting seal* karena untuk menghindari gesekan yang terjadi antara poros turbin dengan seal. *Labyrinth seal* merupakan seal yang termasuk *non contacting seal* sehingga banyak dipakai pada turbin maupun kompresor pada dunia industri. *Labyrinth seals* dapat mencegah terjadinya penurunan tekanan gas *refrigerant* (R 123) menuju luar lingkungan karena perubahan tekanan pada setiap cavities dirubah menjadi energi kinetik. Dalam aplikasinya *labyrinth seal* memiliki banyak bentuk antara lain *straight through, stepped, dan balance drum seal*. Bentuk-bentuk *labyrinth seal* tersebut mempengaruhi aliran fluida yang mengalir melewatinya serta mempengaruhi kebocoran yang terjadi pada *labyrinth seal*.

Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk mengembangkan *labyrinth seals*. Penelitian tersebut dilakukan dengan berbagai cara antara lain dengan melakukan studi numerik, eksperimen dan melakukan analisa. Salah satunya adalah penelitian secara numeric yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh *pre-swirl rate, eccentricity, clearance dan tooth location* terhadap laju kebocoran pada tiga jenis *labyrinth seals* yaitu *straight trough, stepped dan balanced drum labyrinth seal* [2]. Terjadi penurunan tekanan pada setiap giginya yang terjadi pada semua tipe *labyrinth seal* [2].

Penelitian lain tentang *labyrinth seal* yang dilakukan secara numerik dilakukan untuk mengetahui perbandingan aliran yang melewati dua jenis *labyrinth seal* yang berbeda [3]. Pada penelitian tersebut dilakukan secara numerik menggunakan *software Computational Fluid Dynamic (CFD)* [3]. Penelitian tersebut membandingkan dua jenis *labyrinth seal* yang berbeda yaitu *stepped labyrinth seal* dan *interlocking labyrinth seal* [3]. Dari simulasi tersebut, diperoleh data berupa *streamline pattern, velocity vector*

field, dan distribusi turbulent kinetic energy dan tekanan static [3]. Dari data streamline pattern, velocity vector field dan distribusi turbulent kinetic energy akan diketahui pengaruh terhadap laju kebocoran fluida yang melewati kedua jenis labyrinth seal sehingga dapat diketahui jenis labyrinth seal yang baik untuk digunakan. Dalam simulasinya secara numerik, memakai turbulen model k- ϵ Standard [3].

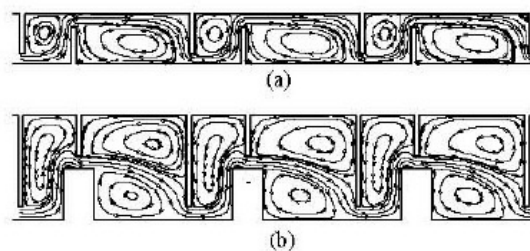
Gambar 1 menunjukkan aliran sirkulasi (vortex) yang terjadi pada interlocking seal lebih sedikit daripada stepped seal. Pada setiap rongga pada interlocking seal terbentuk satu buah aliran sirkulasi (vortex) sedangkan pada stepped seal aliran sirkulasi (vortex) yang terbentuk berjumlah 2 untuk aliran yang keluar dari gigi yang pendek.

Aliran fluida mengalami kenaikan kecepatan saat melewati celah sempit dan setelah melewati celah sempit. Penelitian lain tentang labyrinth seal dilakukan untuk mengetahui pengaruh clearance dan rasio tebal gigi serta pengaruh putaran poros. Penelitian tersebut dilakukan secara numerik sehingga dilakukan simulasi pengaruh rasio tebal gigi dan clearance dan putaran poros terhadap performa straight through labyrinth seal [4]. Model turbulensi yang digunakan adalah model turbulen model k- ϵ RNG dalam simulasinya [4], lihat Gambar 2.

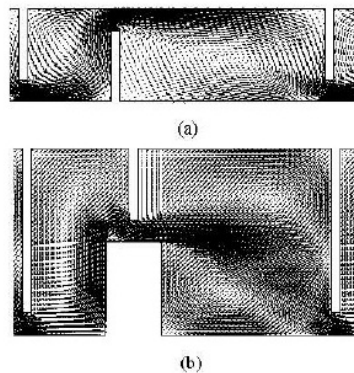
Gambar 3 menunjukkan semakin besar pressure ratio maka mass flow yang terjadi semakin tinggi. Gambar 4 menunjukkan bahwa variasi putaran (RPM) tidak terlalu berpengaruh terhadap nilai turbulent kinetic energy yang terjadi pada straight through labyrinth seal. Hal tersebut menunjukkan putaran (RPM) tidak berpengaruh terhadap aliran yang terjadi pada labyrinth seal.

Dalam penelitian tentang labyrinth seal yang lain yaitu melakukan simulasi untuk mengetahui pengaruh tinggi dan panjang rongga terhadap laju kebocoran yang terjadi [5]. Selain itu mereka menampilkan fenomena aliran yang terjadi pada straight through labyrinth seal. Dari penelitian tersebut didapatkan bahwa semakin tinggi rongga maka laju kebocoran yang terjadi akan semakin besar [5]. Hal tersebut terjadi karena intensitas turbulensi turun jika tinggi rongga semakin naik. Dengan turunnya intensitas turbulensi maka laju kebocoran yang terjadi juga ikut naik karena energi yang terdesipasi semakin berkurang. Semakin panjang rongga pada labyrinth seal maka kebocoran yang terjadi semakin kecil. Hal tersebut terjadi karena pada rongga labyrinth yang panjang, intensitas turbulensi yang terjadi juga semakin tinggi. Hal tersebut mengakibatkan aliran sirkulasi (vortex) yang terjadi semakin besar. Dengan semakin besarnya aliran sirkulasi (vortex) yang terjadi maka laju kebocoran yang terjadi semakin kecil karena energi yang terdesipasi semakin besar.

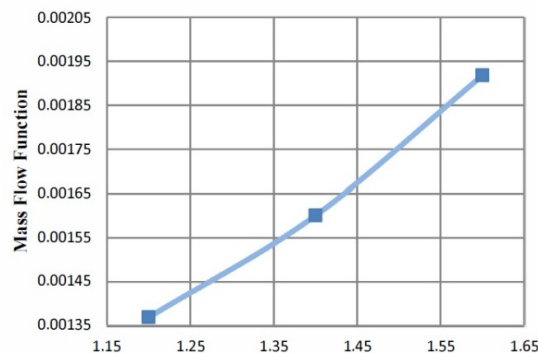
Pada penelitian ini akan digunakan metode numerik berbasis komputasi dengan melakukan simulasi pada model labyrinth seal tipe stepped. Hasil simulasi berupa karakteristik aliran yang ditunjukkan dengan data kualitatif berupa kontur distribusi kecepatan, distribusi tekanan dan vektor kecepatan dalam labyrinth seal tipe stepped. Sedangkan data kuantitatif yang berkaitan dengan laju pengeringan adalah data laju kebocoran akibat pengaruh variasi tekanan inlet, putaran poros, panjang pitch dan tinggi rongga.



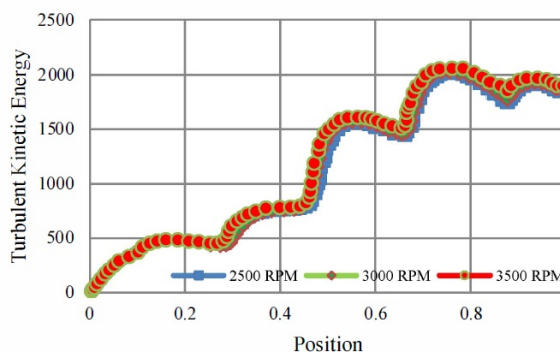
Gambar 1 Streamline pattern pada aliran fluida pada (a) interlocking seal (b) stepped seal [3].



Gambar. 2. Velocity vector yang terjadi pada (a) interlocking seal (b) stepped seal [3]



Gambar. 3. Grafik Mass Flow terhadap pressure ratio [4].



Gambar. 4 Grafik TKE terhadap putaran (RPM) [4].

Secara umum, tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi tekanan inlet, putaran poros, panjang pitch dan tinggi rongga terhadap laju kebocoran refrigerant (r123) yang melewati labyrinth seal tipe stepped. Serta karakteristik aliran akibat variasi penelitian ini.

II. URAIAN PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan cara melakukan variasi tekanan masuk, putaran poros, tinggi rongga serta panjang pitch, selanjutnya akan dilakukan simulasi numerik secara dua dimensi lewat *software* Fluent 6.3.26. Terdapat prosedur pengolahan data agar penelitian yang dilakukan bisa mendapatkan hasil yang diharapkan sesuai dengan tujuan dari penelitian ini. Pada metode numerik dibutuhkan tiga tahapan utama yang harus dilakukan, antara lain: *preprocessing*, *solving* atau *processing*, dan *postprocessing*. Sebelumnya harus mengetahui kondisi kerja dari simulasi dan geometri *labyrinth seal tipe stepped*.

A. Kondisi Kerja

Pada penelitian ini memakai variasi tekanan inlet serta variasi putaran poros turbin sebagai kondisi kerja selain itu variasi dimensi *labyrinth seal* juga dilakukan. Untuk variasi tekanan inlet, pada penelitian ini menggunakan 3 variasi takanan inlet antara lain 5, 10 dan 15 bar. Sedangkan untuk variasi putaran poros turbin juga menggunakan 3 variasi antara lain 0, 1500, dan 3000 rpm. Uap yang dimanfaatkan oleh turbin sistem ORC berasal dari R123 sebagai fluida kerja. Dari fluida kerja R123 akan dicari properties yang dibutuhkan untuk kondisi inlet dan outlet, lihat Tabel 1 dan Gambar 6.

B. Geometri Labyrinth Seal Tipe Stepped

Pada penelitian ini memakai beberapa macam dimensi yang digunakan sebagai variasi pengambilan data. Adapun variasi dimensi yang dilakukan yaitu dengan melakukan variasi tinggi rongga, panjang pitch dari *labyrinth seal*. Adapun geometri dan dimensi diberikan pada Gambar 5.

C. Preprocessing

Preprocessing dilakukan sebagai metode awal dalam penelitian untuk membangun dan menganalisa sebuah model komputasi (CFD). Tahapan *Preprocessing* terdiri dari beberapa sub-tahapan antara lain: pembuatan geometri, penentuan domain, pembuatan *meshing* dan penentuan parameter-parameter yang digunakan, Lihat Tabel 2.

Bidang atau volume yang diisi oleh fluida dibagi menjadi sel-sel kecil (*meshing*) sehingga kondisi batas dan beberapa parameter yang diperlukan dapat diaplikasikan ke dalam elemen-elemen kecil tersebut. Bentuk *mesh* yang dipilih adalah *quad-map*.

D. Processing

Pada tahapan Processing penelitian dilakukan dengan menggunakan *software berbasis (CFD)* yang terdiri dari tahapan dibawah ini.

Memilih Solver

Pada saat membuka FLUENT terdapat pilihan untuk menggunakan *solver* 2D/3D dengan keakuratan tunggal atau ganda (*single precision/double precision*). Secara umum, *solver single precision* cukup akurat untuk berbagai kasus sehingga tetapi untuk lebih akurat maka dalam penelitian ini digunakan *solver double precision*.

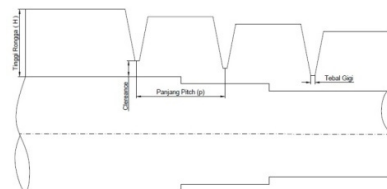
Memilih Formulasi Solver

Dalam fluent disediakan 3 formulasi solver yaitu

- Segregated
- Coupled implisit
- Coupled eksplisit

Tabel 1.
Properties R123

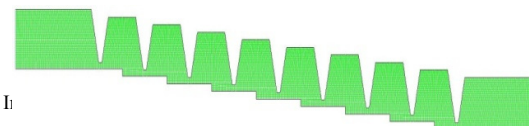
<i>Properties Fluida R 123 Pada Turbin ORC</i>	
<i>Temperatur (C)</i>	86
<i>Tekanan (bar)</i>	5
<i>Massa Jenis (kg/m³)</i>	29.158
<i>Enthalpy (kj/kg)</i>	416.42
<i>Massa Molar</i>	152.93
<i>Viskositas Absolut (g/cm-s)</i>	0.00012838



Gambar 5. Skema Stepped Labyrinth Seal

Tabel 2.
Dimensi labyrinth seal tipe stepped

Labyrinth Seal Jenis Stepped	
Parameter	Dimensi (mm)
Clearance	0.415
Tebal gigi	0.29
Panjang pitch (p)	4; 6; 8; 10
Tinggi Rongga (H)	3.415; 3.915; 5.915



Gambar 6. Geometri labyrinth seal

Tabel 3.
Boundary condition

Boundary condition	Keterangan
Inlet	Pressure inlet : 5, 10, 15 bar
Outlet	Pressure outlet : 1 bar
<i>Labyrinth seal</i>	Wall atas
Poros	Wall bawah Putaran : 0, 1500, 3000 rpm

Ketiga formulasi tersebut memiliki perbedaan dalam menyelesaikan persamaan kontinuitas, momentum dan energi. Segregated menyelesaikan persamaan kontinuitas, momentum dan energi secara terpisah tidak secara bersamaan. Sedangkan Coupled menyelesaikan persamaan-persamaan tersebut secara bersamaan. Pada penelitian ini menggunakan formulasi solver segregated untuk menyelesaikan persamaan kontinuitas, momentum dan energi.

Pemilihan Turbulence Modelling

Pada penelitian ini menggunakan turbulen modeling *k epsilon RNG* [4].

Pemilihan Operating Condition

Dalam penelitian ini kondisi operasi yang digunakan adalah 101325 paskal. Kondisi tersebut digunakan pada operasi aliran uap refrigerant (R123) yang melewati *labyrinth seal tipe stepped*.

Menentukan Boundary Condition

Kondisi yang diberikan mulai dari *inlet*, batasan *wall*, maupun *outlet*. Sisi inlet pada gambar 6 ditentukan pada sebelah kanan. Jenis inlet yang digunakan adalah *pressure inlet* dengan input tekanan yang digunakan dijadikan sebagai variable bebas. *Pressure input* yang digunakan sebesar antara lain 5, 10 dan 15 bar. Sisi outlet terletak di sebelah kiri gambar. Sisi *outlet* didefinisikan sebagai *pressure outlet*, yaitu keluaran dari simulasi sebagai suatu tekanan. Daerah lain yang berupa fin dan poros didefinisikan sebagai *wall* (dinding).

Inisialisasi Medan Aliran

Inisialisasi adalah tebakan awal yang dilakukan sebelum memulai perhitungan. Dalam perintah ini pula dapat ditentukan dari mana perhitungan akan dilakukan.

Melakukan Perhitungan

Sebelum memulai perhitungan maka akan dimasukkan terlebih dahulu kriteria konvergensi dari model yang akan disimulasikan. Hal ini bisa dilakukan melalui perintah monitor residual. Untuk aliran dua dimensi menggunakan absolute kriteria konvergensi sebesar 0,000001. Setelah itu baru kemudian dilakukan perhitungan dengan perintah iterasi, lihat Tabel 3.

E. Postprocessing

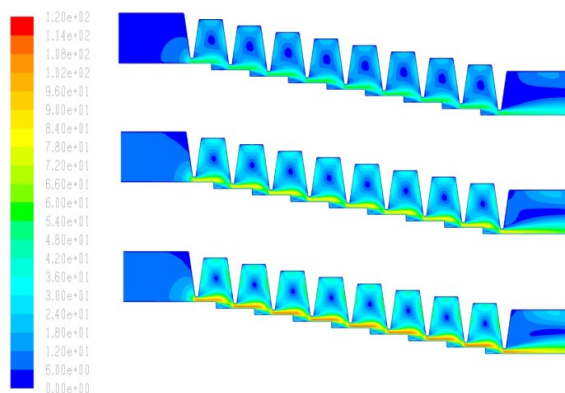
Hasil dari simulasi numerik ini kemudian ditampilkan dalam bentuk kontur kecepatan, vector kecepatan dan tekanan. Serta dalam bentuk grafik laju kebocoran fungsi tekanan inlet, putaran poros, panjang pitch serta tinggi rongga. Grafik tersebut diperoleh dari data hasil iterasi yang dilakukan oleh CFD.

III. HASIL DAN DISKUSI

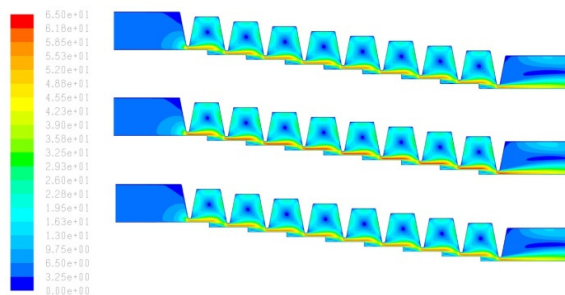
Dalam penelitian ini didapatkan data yang digunakan untuk menganalisa hasil penelitian secara kualitatif dan kuantitatif. Analisa data secara kualitatif dilakukan dengan menampilkan kontur kecepatan dan vektor kecepatan. Sementara, untuk analisa data secara kuantitatif akan membahas mengenai pengaruh variasi penelitian yaitu tekanan inlet, putaran poros, panjang pitch dan tinggi rongga terhadap laju kebocoran pada *refrigerant* (R123) yang melewati *labyrinth seal tipe stepped*. Analisa secara kualitatif ditampilkan dalam bentuk grafik agar mudah untuk memahami pengaruh variasi penelitian ini.

A. Analisa data secara kualitatif

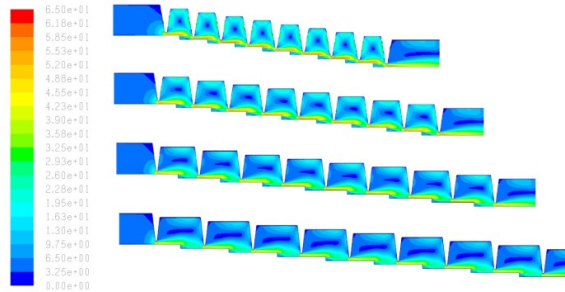
Analisa data secara kualitatif ditampilkan dalam bentuk kontur kecepatan pada masing-masing variasi yang digunakan dalam penelitian ini. Dari kontur kecepatan diperoleh fenomena aliran *refrigerant* (R123) yang melewati *labyrinth seal tipe stepped*. Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa Tekanan inlet yang semakin tinggi menyebabkan kecepatan fluida saat memasuki *labyrinth seal* juga tinggi. Dari keempat kontur kecepatan aliran dapat terlihat perbedaan yang terdapat pada masing – masing variasi panjang pitch. Semakin panjang pitch, kecepatan aliran akan turun akibat adanya gesekan dengan poros selain itu aliran sirkulasi (*vortex*) yang terbentuk semakin besar, lihat Gambar 7. Dari Gambar 8 terlihat pengaruh dari tinggi rongga terhadap aliran fluida yang melewati *labyrinth seal*. Bentuk aliran sirkulasi (*vortex*) yang terjadi berbeda tiap ketinggian rongga, untuk tinggi rongga 5,915 aliran sirkulasi (*vortex*) yang terbentuk membujur secara vertikal sedangkan untuk tinggi rongga 3,415 vorteks yang terbentuk membujur secara horizontal.



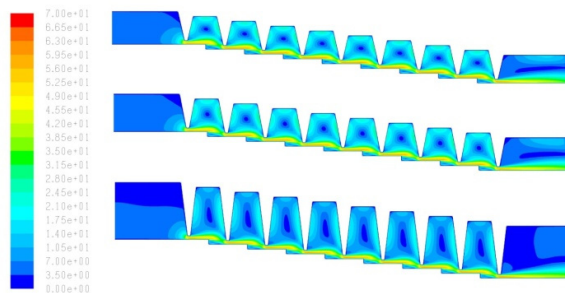
Gambar 6. Kontur kecepatan (a) tekanan inlet 5 bar, (b) tekanan inlet 10 bar, (c) tekanan inlet 15 bar.



Gambar 7. Kontur Kecepatan aliran pada putaran poros (a) 0 rpm, (b) 1500 rpm, (c) 3000 rpm.



Gambar 7. Kontur kecepatan pada (a) pitch 4, (b) pitch 6, (c) pitch 10, (d) pitch 10.



Gambar 8. Kontur kecepatan pada tinggi rongga (a) 3.415, (b) 3.915, (c) 5.915.

B. Analisa data secara kuantitatif

Analisa Laju Kebocoran Aliran Refrigerant (R123) secara kuantitatif dilakukan untuk memperkuat pembahasan terkait beberapa variasi yang dilakukan pada penelitian ini, sehingga dapat diketahui bentuk *labyrinth seal* yang paling sedikit mengalami kebocoran. Data yang akan dianalisa merupakan hasil dari simulasi aliran refrigerant (R123) yang melewati *labyrinth seal tipe stepped*. Data yang diambil dari fluent 6.3.26

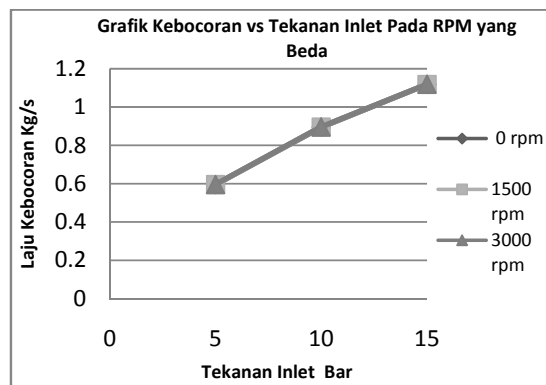
berupa laju kebocoran yang dialami oleh *labyrinth seal* setelah dilakukan beberapa variasi antara lain variasi tekanan inlet, putaran poros, panjang pitch dan tinggi rongga. Data kebocoran tersebut dibuat grafik sehingga diketahui pengaruh dari variasi terhadap laju kebocoran yang dialami *labyrinth seal*.

Dari Gambar 9 dapat diketahui pengaruh laju kebocoran karena variasi tekanan inlet. Semakin besar tekanan inlet yang masuk kedalam *labyrinth seal* maka semakin besar laju kebocoran yang terjadi. Hal tersebut terjadi karena semakin besar tekanan inlet yang masuk maka semakin besar pula kecepatan yang masuk ke dalam *labyrinth seal*. Dengan penampang yang sama pada *labyrinth seal* maka semakin besar kecepatan yang masuk kedalam *labyrinth seal* maka mass flow yang terjadi semakin besar. Selain itu pada tekanan inlet yang besar terjadi aliran sirkulasi (*vortex*) pada bagian rongga *labyrinth seal* dengan intensitas aliran sirkulasi (*vortex*) yang kecil. Karena intensitas aliran sirkulasi (*vortex*) yang kecil maka kebocoran yang terjadi semakin besar.

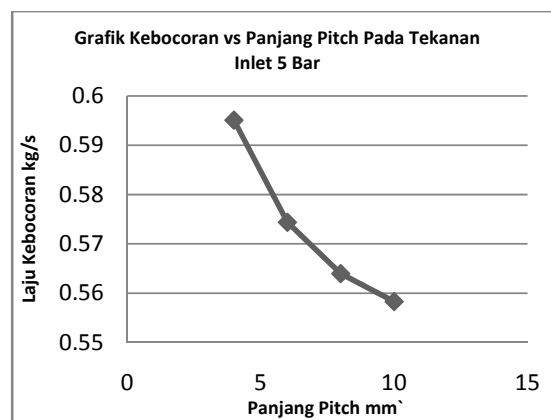
Selain itu dari trend grafik tersebut dapat diketahui dengan nilai putaran poros yang berbeda grafik pada masing-masing putaran poros saling berhimpitan. Jadi dari grafik tersebut diketahui pengaruh putaran poros terhadap laju kebocoran pada *labyrinth seal*. Semakin besar putaran poros yang terjadi tidak berpengaruh terhadap kebocoran yang terjadi pada *labyrinth seal*. Hal tersebut terjadi karena pada tekanan inlet yang sama maka kecepatan fluida yang masuk sama maka dengan penampang yang sama mass flow yang terjadi pada *labyrinth seal* juga sama. Intensitas vortex yang terjadi pada variasi putaran tersebut tidak berbeda sehingga laju kebocoran yang terjadi pada *labyrinth seal* sama pada setiap variasi putaran poros.

Dari Gambar 10 dapat dilihat pengaruh panjang pitch bahwa semakin panjang, pitch yang dimiliki *labyrinth seal* maka kebocoran yang terjadi semakin sedikit. Hal tersebut terjadi karena semakin panjang, pitch yang dimiliki oleh *labyrinth seal* maka intensitas aliran sirkulasi (*vortex*) semakin besar. Jika intensitas aliran sirkulasi (*vortex*) semakin besar maka laju kebocoran yang terjadi semakin sedikit. Vortex yang terjadi pada rongga *labyrinth seal* terjadi karena sebagian fluida terlepas dari aliran utama sehingga mengisi bagian rongga dari *labyrinth seal*. Terlepasnya fluida yang mengisi rongga *labyrinth seal* karena fluida tidak dapat menahan momentum aliran utama dan juga aliran utama menabrak gigi *labyrinth seal* sehingga aliran fluida terpisah menjadi dua yaitu aliran utama yang menuju *clearance* selanjutnya dan aliran yang mengisi rongga *labyrinth seal*.

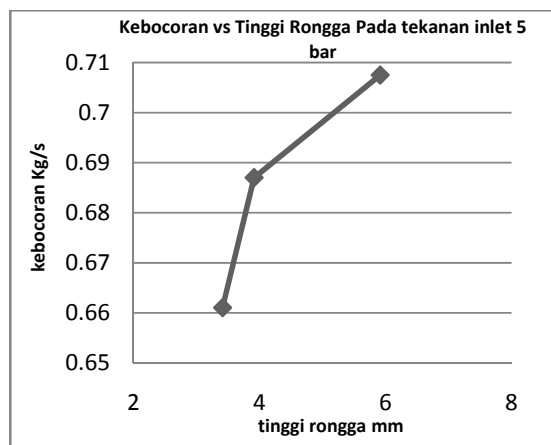
Semakin tinggi rongga maka semakin besar kebocoran yang terjadi. Hal tersebut terjadi karena semakin besar tinggi rongga intensitas aliran sirkulasi (*vortex*) semakin kecil. Aliran sirkulasi (*vortex*) berhubungan dengan fluida yang terperangkap dalam aliran sirkulasi (*vortex*). Semakin besar intensitas aliran sirkulasi (*vortex*) maka semakin banyak fluida yang terperangkap dalam rongga. Hal tersebut mengakibatkan laju kebocoran yang terjadi semakin sedikit. Tetapi apabila intensitas aliran sirkulasi (*vortex*) semakin kecil maka laju kebocoran yang terjadi semakin banyak. Dari trend grafik pada Gambar 11 dari panjang pitch 4 ke panjang pitch 6 laju kebocoran turun secara drastis sedangkan dari panjang pitch 8 ke panjang pitch 10 penurunan laju kebocoran tidak terlalu signifikan dari pada panjang pitch sebelumnya. Jadi semakin panjang, pitch yang dimiliki *labyrinth seal* maka laju kebocoran yang terjadi semakin besar tetapi penurunan laju kebocorannya tidak terlalu signifikan jika dibandingkan dengan panjang pitch sebelumnya.



Gambar. 9. Grafik kebocoran vs tekanan inlet pada variasi putaran poros.



Gambar 10. Grafik kebocoran vs panjang pitch pada tekanan inlet 5 bar



Gambar 11. Grafik kebocoran vs tinggi rongga

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan dapat diambil kesimpulan tentang penelitian tentang pengaruh variasi tekanan inlet, putaran poros, panjang pitch dan tinggi rongga. Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain:

1. Tekanan inlet berpengaruh terhadap laju kebocoran yang dialami oleh *labyrinth seal*. Semakin besar tekanan inlet maka kebocoran yang terjadi semakin besar. Laju

- kebocoran terbesar terjadi pada tekanan 15 bar yaitu sebesar 1,12 kg/s
2. Putaran poros tidak berpengaruh terhadap laju kebocoran. Dengan variasi putaran poros 0 rpm, 1500 rpm dan 3000 rpm pada simulasi *labyrinth seal*, laju kebocoran yang terjadi tidak berbeda dengan nilai 0.60 kg/s
 3. Panjang pitch berpengaruh terhadap laju kebocoran yang dialami oleh *labyrinth seal*. Semakin panjang, pitch yang dimiliki oleh *labyrinth seal* maka kebocoran yang terjadi semakin kecil. Laju kebocoran terkecil terjadi pada panjang pitch 10 mm yaitu sebesar 0.56 kg/s
 4. Tinggi rongga berpengaruh terhadap laju kebocoran yang dialami oleh *labyrinth seal*. Semakin tinggi rongga maka semakin besar laju kebocoran yang dialami oleh *labyrinth seal*. Laju kebocoran terbesar terjadi pada tinggi rongga 5,915 yaitu sebesar 0.61 kg/s
 5. Semakin besar intensitas aliran sirkulasi (vortex) maka semakin kecil laju kebocoran yang dialami oleh *labyrinth seal*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] *Kementrian Energi Sumber Daya Mineral*. 2011. Jakarta, Indonesia
- [2] Gao, Rui dkk. *Computational Fluid Dynamic and Rotordynamic Study on the Labyrinth Seal*. 2012. Virginia Polytechnic Institute and State University. Virginia.
- [3] Wie-zhe, Wang & Ying-zheng, Liu. *Numerical Analysis Of Leakage Flow Through Two Labyrinth Seals*. 2007. School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiaotong University. Shanghai.
- [4] Afzal, Sher. Hassan, S,M. Shohaib, M & Rafique, M. *Numerical Analysis of flow in cavities of labyrinth seals*. 2011. CESAT. Islamabad.
- [5] Zhao, W. Nielsen, T.K. & Billdal, J, T. *Effects of cavity on leakage loss in straight-through labyrinth seals*. 2010. NTNU. Norway.