

Studi Numerik Pengaruh Variasi Jarak Antar Gigi, Tinggi Gigi, Tekanan Inlet dan Kecepatan Putaran Poros Turbin ORC Pada *Refrigerant* R123 yang Melewati *Labyrinth Seal Tipe Balance Drum*

Fajar Kurnianto 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 salah satu inovasi sistem pembangkit tenaga yang memanfaatkan panas bumi dengan fluida yang mampu menguap pada tekanan dan temperatur rendah. Salah satu peralatan pendukung dari ORC adalah turbin yang harus di jaga performansinya agar tidak bocor. *Labyrinth seal* adalah solusi untuk mencegah kebocoran pada turbin. Penelitian terkait model *labyrinth seal* khususnya tipe *balance drum* menarik untuk dilakukan sebagai upaya meningkatkan kinerja turbin. Penelitian dilakukan dengan metode numerik berbasis komputasi (CFD). Pemilihan kondisi simulasi digunakan model turbulensi $k-\epsilon$ RNG dan skema interpolasi *second-order upwind*. Pada penelitian ini divariasikan tekanan masuk (5 bar, 10 bar, 15 bar), putaran poros (0 rpm, 1500 rpm, 3000 rpm), tinggi gigi (3 mm, 3,5 mm, 5,5 mm) dan jarak antar gigi (4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm). Dari Penelitian ini dapat diketahui karakteristik aliran pada *labyrinth seal*. Hasil yang didapatkan adalah semakin besar tekanan masuk maka laju alir massa yang melewati *labyrinth seal* semakin besar. Selain itu tinggi gigi memberikan pengaruh terhadap meningkatnya laju alir massa sedangkan jarak antar gigi mempengaruhi laju alir massa yang semakin berkurang dengan bertambahnya jarak antar gigi.

Kata Kunci—Balance Drum, CFD, Labyrinth Seal, Laju Alir Massa, ORC.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA adalah negara yang kaya dengan sumber daya energi. Sumber daya energi yang banyak digunakan selama ini adalah sumber daya fosil, data dari kementerian energi dan sumber daya mineral menunjukkan bahwa cadangan sumber daya fosil Indonesia semakin berkurang sehingga kebijakan diversifikasi energi dilakukan untuk mengurangi ketergantungan dari sumber daya fosil, peta potensi geotermal ada di Gambar 1 [1].

Salah satu bentuk dari diversifikasi energi adalah memanfaatkan panas bumi untuk menghasilkan listrik. Dengan letak geografis Indonesia terletak di daerah lingkaran api (*ring of fire*) menjadikan negara Indonesia kaya akan sumber energi panas bumi. Namun dalam proses pelaksanaan eksplorasi panas bumi yang ada tidak seluruhnya panas bumi tersebut mampu dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik. 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.

Distribusi Lokasi Panas Bumi Di Indonesia



Gambar. 1. Peta potensi *Geothermal* Negara Indonesia [1].

Organic Rankine Cycle (ORC) adalah salah satu inovasi teknologi untuk memanfaatkan sumber energi panas bumi dimana mampu bekerja pada temperatur dan tekanan yang relatif rendah. ORC sendiri merupakan modifikasi dari siklus pendahulunya yaitu siklus *rankine* namun disini fluida kerja yang digunakan adalah fluida organik contohnya refrigerant untuk menghasilkan listrik. Sama halnya dengan siklus *rankine* komponen utama dari ORC adalah turbin, kondensor, pompa, dan *evaporator* sebagai pengganti *boiler*.

Salah satu alat konversi energi adalah turbin uap yang merubah energi potensial yang dimiliki oleh uap menjadi energi mekanik pada poros turbin. Pada umumnya turbin uap adalah suatu mesin yang memanfaatkan fluida kerja uap *superheat* yang berasal dari hasil pemanasan air di dalam boiler. Namun pada sistem ORC fluida kerja yang digunakan adalah fluida organik seperti *silicone oil*, *hydrocarbon*, dan *fluorocarbons*. Pada umumnya fluida kerja yang sering digunakan adalah *refrigerant* (R-123) dengan harga yang relatif mahal, oleh karena itu perlu dirancang sistem *sealing* pada turbin uap ORC untuk menekan kebocoran fluida kerja dan efisiensi dari turbin uap meningkat. Seal merupakan salah satu komponen utama dari turbin yang menunjang kinerja dan efisiensi dari proses yang terjadi pada turbin. Oleh karena itu seal yang telah dirancang harus dilakukan penelitian dan pengujian terlebih dahulu. Seal yang akan digunakan pada penelitian ini adalah *dynamic seal* dimana penyegelan berlangsung antara dua permukaan, permukaan poros bergerak *rotary* sedangkan permukaan casing statis. *Dynamic seal* yang di pilih pada penelitian ORC ini adalah *labyrinth seal* tipe *balance drum* yang harus diketahui performansinya dalam menurunkan tekanan.

Distribusi tekanan dapat diperoleh lewat serangkaian perhitungan dan simulasi numerik. Saat ini cara ekonomis dalam mendapatkan distribusi tekanan yang terjadi pada *labyrinth seal* adalah dengan metode numerik. Metode numerik ini dapat ditampilkan dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD). CFD memiliki kelebihan diantaranya jangkauan analisa yang relatif luas dan sisi ekonomis lebih menguntungkan. Distribusi tekanan pada simulasi numerik dengan CFD dapat ditampilkan lewat komputer, sehingga daerah-daerah yang memungkinkan terjadinya rugi-rugi mekanis dapat diketahui.

Penelitian terkait simulasi numerik *labyrinth seal* pernah dilakukan oleh beberapa peneliti. Wang dan Liu (2006) melakukan simulasi menggunakan *software* FLUENT untuk membandingkan karakteristik dan nilai laju alir massa pada *labyrinth seal* tipe *interlocking* dan *stepped* [2]. Hasil yang didapatkan adalah distribusi tekanan yang mengalami penurunan secara drastis saat melewati daerah *clearance*, selain itu didapatkan juga nilai laju alir massa pada tipe *interlocking seal* sebesar 1.71×10^{-2} kg/s dan pada tipe *stepped seal* sebesar 1.56×10^{-2} kg/s sehingga dapat disimpulkan bahwa *stepped seal* mempunyai kemampuan yang paling baik dalam mengurangi kebocoran.

Penelitian lain terkait dengan simulasi numerik *labyrinth seal* dilakukan oleh Zhao dkk dengan variasi jarak antar gigi dan tinggi rongga untuk mengetahui pengaruhnya terhadap laju alir massa yang keluar dari *labyrinth seal* [3]. Dari penelitian didapatkan bahwa variasi tinggi rongga dan jarak antar gigi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap perubahan laju alir massa.

Berdasarkan beberapa penelitian diatas, penelitian mengenai simulasi numerik *labyrinth seal* diperlukan sebagai upaya untuk mengetahui pola aliran dan laju alir massa yang melewati *labyrinth seal* tipe *balance drum* untuk meningkatkan performa dari turbin ORC (*Organic Rankine Cycle*).

Pada penelitian akan dikaji karakteristik aliran dan laju alir massa yang melewati susunan gigi *labyrinth seal* tipe *balance drum* dengan melakukan analisa secara numerik aliran 2 dimensi. Beberapa faktor yang mempengaruhi karakteristik aliran fluida adalah tekanan masuk *seal*, tinggi gigi, jarak antar gigi dan putaran poros turbin. Berdasarkan hal tersebut pada penelitian ini, rumusan masalah yang akan dikaji antara lain: (1) Pengaruh variasi tinggi gigi terhadap karakteristik laju alir massa yang melewati *labyrinth seal* tipe *balance drum*. (2) Pengaruh variasi jarak *pitch* terhadap karakteristik laju alir massa yang melewati *labyrinth seal* tipe *balance drum*. (3) Pengaruh putaran rotor terhadap karakteristik laju alir massa yang melewati *labyrinth seal* tipe *balance drum*.

Pada penelitian ini digunakan metode numerik berbasis komputasi dengan melakukan simulasi pada model *labyrinth seal* tipe *balance drum*. Hasil simulasi berupa karakteristik aliran yang ditunjukkan dengan data kualitatif berupa distribusi kecepatan dan kontur tekanan statis. Sedangkan data kuantitatif yang berkaitan dengan laju alir massa adalah perubahan laju alir massa saat melewati variasi tinggi gigi dan jarak antar gigi.

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis karakteristik aliran dan laju alir massa pada *labyrinth seal* tipe *balance drum*.

Tabel 1.
Properties Fluida Kerja R123

<i>Properties</i> Fluida Kerja R123	
<i>Temperature</i> (C)	86
<i>Pressure</i> (Bar)	5
<i>Density</i> (kg/m ³)	29.158
<i>Viscosity</i> (kg/m.s)	0.000012838

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berupaya untuk menampilkan fenomena distribusi tekanan yang terjadi pada susunan gigi *labyrinth seal* jenis *balance drum* pada turbin uap ORC yang telah dirancang sebelumnya karena adanya keterbatasan dalam pengambilan data eksperimen.

Penelitian dilakukan dengan cara melakukan variasi geometri *labyrinth seal* jenis *balance drum* dari turbin uap, selanjutnya akan dilakukan simulasi numerik secara dua dimensi menggunakan *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*.

A. Kondisi Kerja

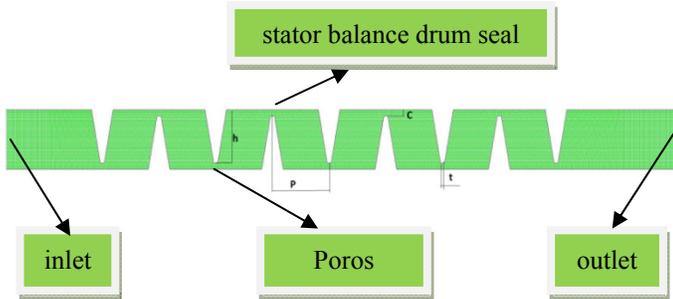
Pada penelitian ini akan divariasikan tekanan masuk dan kecepatan putaran poros. Tekanan masuk dibedakan menggunakan 3 variasi tekanan, yaitu 5 bar, 10 bar, dan 15 bar sedangkan variasi kecepatan poros adalah 0 rpm, 1500 rpm, dan 3000 rpm. Tekanan keluar untuk semua perhitungan numerik sebesar 1 bar. Geometri *labyrinth seal* juga divariasikan jarak *pitch* untuk tinggi gigi *labyrinth seal* yang sama, yaitu 4 mm, 6 mm, dan 8 mm, dan 10 mm. Selain itu juga divariasikan tinggi gigi untuk panjang *pitch* yang sama yaitu 3 mm, 3.5 mm dan 5.5 mm. 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.

B. Tahap 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. Geometri yang dibentuk dalam penelitian ini adalah geometri *labyrinth seal* jenis *balance drum*. Pemodelan geometri dilakukan dengan menggunakan *software* Gambit 2.4.6. Susunan gigi *labyrinth* sebagai objek yang di teliti dimodelkan secara dua dimensi (2D), lihat Tabel 2 dan Gambar 2.

Tabel 2.
Geometri labyrinth seal jenis balance drum

Labyrinth seal Jenis Balance drum	
Parameter	Dimensi (mm)
Radial Clearance (c)	0.415
Tebal Gigi (t)	0.29
Tinggi Gigi (h)	3; 3.5; 5.5
Jarak antar gigi (p)	4; 6; 8; 10



Gambar. 2. Geometri labyrinth seal jenis balance drum

C. Tahap Processing

Tahapan *processing* dilakukan dengan menggunakan software FLUENT 6.3.26 dengan beberapa tahapan. *Pertama*, 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, akan tetapi dalam penelitian ini digunakan *solver single double precision* karena geometri yang ukurannya kecil. *Kedua*, memilih Formulasi Solver. Fluent menyediakan tiga formulasi *solver*, yaitu *seggregated*, *coupled Implisit*, dan *coupled eksplisit*.

Formulasi *solver segregated* dan *coupled* mempunyai perbedaan pada cara penyelesaian persamaan kontinuitas, momentum, dan energi. *Solver segregated* menyelesaikan persamaan tersebut secara bertahap (terpisah antara satu persamaan dengan persamaan yang lain), sementara *solver coupled* menyelesaikan semua persamaan tersebut secara bersamaan [4]. *Solver coupled implisit* dan *eksplisit* sendiri mempunyai perbedaan pada cara melinierkan persamaan yang akan diselesaikan. Pada penelitian ini digunakan *solver segregated* untuk menyelesaikan persamaan yang ada.

Pemilihan Turbulence Modelling

Referensi penentuan Turbulence Modelling pada penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu [5]. Pada penelitian terdahulu digunakan *Turbulence modelling k-epsilon model standard*. Setelah dilakukan penelitian awal pada fluent, model *k-epsilon model RNG* menunjukkan hasil yang lebih teliti. Sehingga model *turbulence* ini digunakan sebagai acuan peneliti dalam pengambilan data.

Tabel 3.
Boundary Condition Balance Drum Saal

Boundary Condition	Keterangan
Inlet	Tipe : Pressure Inlet Tekanan : 5 bar; 10 bar; 15 bar
Outlet	Tipe : Pressure Outlet Tekanan : 1 bar
Stator Teeth	Tipe : Wall
Rotor Teeth	Tipe : Wall (Rotational) Kecepatan putar : 0 rpm; 1500 rpm; 3000 rpm.
Interior	Tipe: Interior

Pemilihan Operating Condition

Setelah melakukan pemilihan *turbulence modeling*, pengaturan *operating condition* menjadi penting untuk dilakukan pada proses selanjutnya. Kondisi operasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah tekanan operasi pada saat fluida R123 memasuki susunan seal. Pada penelitian ini tekanan operasi yang digunakan adalah 101325 Pa.

Menentukan Boundary Condition

Kondisi yang diberikan mulai dari *inlet*, batasan *wall*, maupun *outlet*. Sisi inlet pada gambar 2 ditentukan pada sebelah kiri. Jenis inlet yang digunakan adalah *pressure inlet* dengan input tekanan yang digunakan sebagai basis perhitungan. *Input pressure* yang digunakan sebesar 5 bar. Sisi outlet terletak di sebelah kanan gambar. Sisi outlet didefinisikan sebagai *pressure outlet*, besar tekanan outlet sebesar 1 bar. Daerah lain yang berupa gigi didefinisikan sebagai *wall* dan poros didefinisikan sebagai *moving wall*, lihat Tabel 3.

Dalam simulasi ini akan divariasikan tekanan masuk sebesar 5 bar, 10 bar dan 15 bar. Dengan variasi tersebut, diharapkan dapat dilakukan analisa *mass flow rate* yang menunjukkan karakteristik proses penurunan tekanan pada gigi *labyrinth seal* yang berjenis *balance drum*.

Initialize

Initialize merupakan tebakan awal agar lebih memudahkan proses iterasi untuk mencapai kondisi konvergen.

Iterasi

Proses perhitungan yang berulang-ulang dari kondisi batas yang diberikan sampai konvergensi tercapai. Untuk menyimpulkan hasil iterasi telah konvergen atau belum tidak hanya cukup dengan mengamati level residual, tapi juga harus mengamati kesetimbangan/balans massa dan energi. Terdapat metode yang umum dipakai untuk mengecek konvergensi hasil iterasi, yaitu Residual Konvergen. Residual Konvergen adalah berhentinya iterasi karena sudah mencapai kriteria konvergensi yang kita tentukan.

D. Tahap Postprocessing

Hasil dari simulasi numerik ditampilkan dalam bentuk plot kontur, vektor kecepatan, dan distribusi tekanan. Surface integral serta plot laju alir massa pada koordinat x dan y juga diperlukan dalam melakukan analisa laju alir massa.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari penelitian ini didapatkan data yang digunakan untuk menganalisa hasil penelitian secara kualitatif dan kuantitatif. Analisa data secara kualitatif dilakukan dengan menampilkan vector kecepatan aliran didalam *labyrinth seal* tipe *balance drum* sedangkan analisa data secara kuantitatif membahas mengenai perubahan laju alir massa seiring bertambah panjang jarak antar gigi dan semakin tinggi gigi dan perubahan laju alir massa terhadap kecepatan putaran poros.

A. Analisa Vektor Kecepatan pada tinggi gigi 3.5 mm dan jarak antar gigi 4 mm terhadap variasi putaran poros

Berdasarkan kenampakan vektor kecepatan di dalam *labyrinth seal* dengan jarak antar gigi 4 mm dapat di lihat bahwa terdapat perubahan nilai kecepatan yang signifikan saat fluida memasuki pengecilan penampang (*clearance*). Kecepatan pada kondisi awal relatif lebih rendah daripada kondisi di daerah *clearance* dan bertambah kecepatannya saat berada di daerah *clearance*. Kecepatan mengalami deselerasi saat keluar dari daerah *clearance* menuju rongga. Hubungan antara kecepatan dan luasan penampang dapat dijelaskan dengan persamaan:

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \tag{1}$$

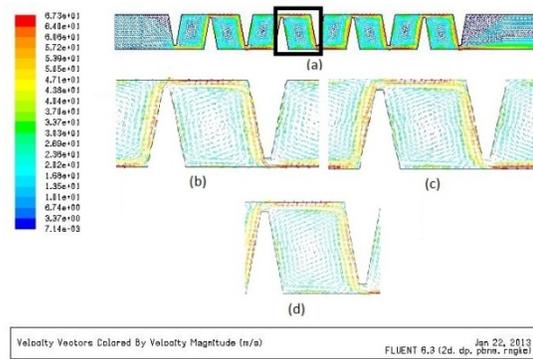
$$\rho_{in} \cdot V_{in} \cdot A_{in} = \rho_{out} \cdot V_{out} \cdot A_{out} \tag{2}$$

Analisa selanjutnya adalah aliran *refrigerant* R123 yang melewati *labyrinth seal* dengan variasi putaran poros. Pengaruh putaran poros terhadap laju alir massa ternyata tidak memberikan efek yang signifikan. Hal ini dapat dibuktikan dengan gambar 3 dimana vektor kecepatan untuk setiap kecepatan putaran poros dan nilai yang ditunjukkan *velocity bar* tidak mengalami perubahan yang drastis dan vortex yang ditunjukkan oleh masing – masing putaran poros tidak ada perbedaan intensitas (Gambar 3).

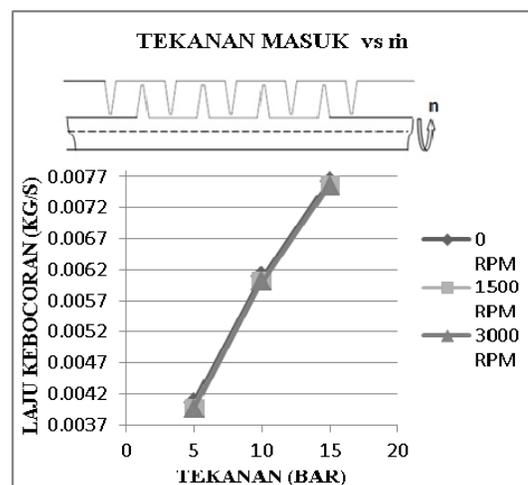
Trend grafik memperlihatkan tidak terjadi penurunan atau kenaikan yang signifikan pada perubahan laju alir massa kebocoran terhadap putaran poros. Trend grafik pada ketiga parameter putaran poros 0 rpm, 1500 rpm dan 3000 rpm tidak mengalami perubahan mulai percobaan dengan tekanan masuk 5 bar, tekanan masuk 10 bar, sampai tekanan masuk 15 bar. Semakin besar tekanan masuk maka laju alir massa kebocorannya semakin besar. (Gambar 4) .

B. Analisa Vektor Kecepatan pada Variasi Jarak Antar Gigi

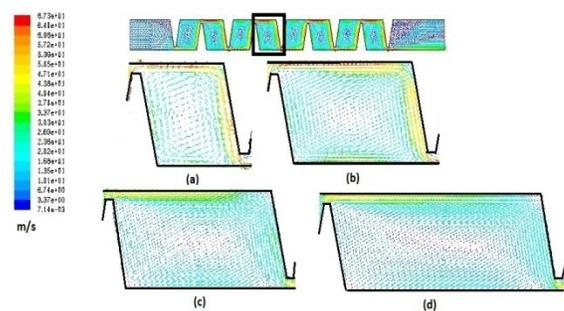
Perbedaan yang dapat dilihat dari vektor kecepatan pada jarak antar gigi 4 mm terhadap vektor kecepatan pada jarak antar gigi 6 mm, 8 mm dan 10 mm adalah intensitas vortex, dimana intensitas dan besar vortex pada jarak antar gigi 10 mm paling tinggi dibandingkan dengan jarak antar gigi 4 mm, 6 mm dan 8 mm yang berimbas pada kehilangan energi yang meningkat dan menyebabkan laju alir massa kebocoran semakin berkurang. Intensitas yang meningkat disebabkan karena *boundary layer* yang berkembang semakin cepat saat berada di daerah *clearance* sehingga vortex pada daerah *down stream* (rongga) menjadi bertambah besar. Turunnya laju alir massa dapat dilihat pada visualisasi vektor kecepatan pada gambar dimana semakin bertambah jarak antar gigi dominasi warna aliran utama fluida lebih didominasi warna kuning dan biru yang semakin banyak, hal ini mengindikasikan turunnya laju alir massa, lihat Gambar 5.



Gambar. 3. Vektor Kecepatan pada Jarak Antar Gigi 4 mm Tekanan Masuk 5 Bar (a) Geometri keseluruhan labyrinth seal (b) Perbesaran pada rongga n=0 rpm (c) Perbesaran pada rongga n=1500 rpm (d)Perbesaran pada rongga n=3000 rpm

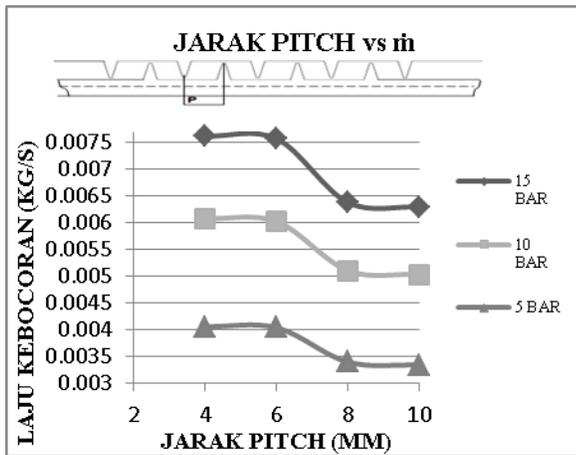


Gambar. 4. Grafik Perubahan Laju Alir Massa Kebocoran terhadap Putaran Poros pada Jarak Antar Gigi 4 mm.



Gambar. 5. Perubahan Laju Alir Massa Kebocoran terhadap variasi jarak antar gigi (a) Jarak antar gigi 4 mm (b) Jarak antar gigi 6 mm (c) Jarak antar gigi 6 mm (d) Jarak antar gigi 10 mm.

Dari Gambar 6 didapatkan trend grafik perubahan laju alir massa kebocoran terhadap jarak antar gigi (*pitch*) untuk tekanan masuk 5 bar, tekanan masuk 10 bar dan tekanan masuk 15 bar. Trend grafik memperlihatkan terjadi penurunan yang sangat signifikan pada perubahan laju kebocoran terhadap jarak *pitch*. Trend grafik pada ketiga parameter tekanan inlet 5 bar, 10 bar dan 15 bar turun mulai percobaan awal hingga percobaan akhir. Grafik mengalami penurunan yang sangat signifikan pada perubahan laju kebocoran pada percobaan kedua hingga percobaan ketiga.



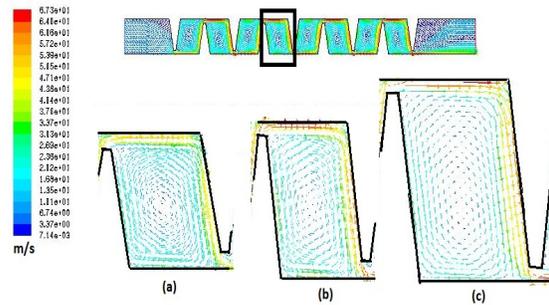
Gambar. 6. Grafik Perubahan Laju Alir massa kebocoran terhadap Pitch.

Jarak *pitch* ternyata memberikan dampak yang signifikan terhadap laju kebocoran, semakin panjang jarak *pitch* kebocoran yang terjadi semakin kecil, hal ini disebabkan karena meningkatnya kehilangan energi yang disebabkan terjadi peningkatan intensitas vortek dan turbulensi pada daerah rongga seiring bertambahnya jarak *pitch*. Vortek yang terjadi pada rongga disebabkan karena aliran fluida terlepas dari aliran utama sehingga tidak mampu menahan momentum aliran yang menyebabkan separasi.

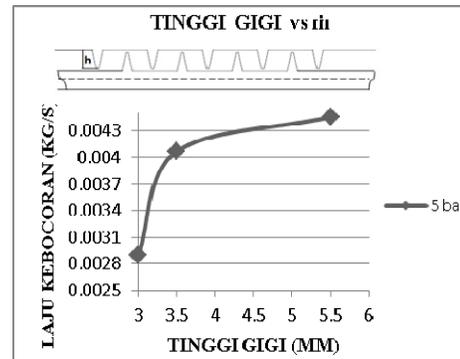
C. Analisa Vektor Kecepatan pada Variasi Tinggi Gigi

Fenomena naiknya kecepatan fluida saat memasuki daerah *clearance* dan terjadi deselerasi kecepatan saat fluida keluar dari daerah *clearance* menuju daerah rongga juga dialami pada simulasi dengan variasi tinggi gigi. Perbedaan yang dapat dilihat dari vector kecepatan pada tinggi gigi 3 mm dan 3.5 mm terhadap vector kecepatan pada tinggi gigi 5.5 mm adalah intensitas vortek, dimana intensitas dan besar vortek pada tinggi gigi 5.5 mm lebih rendah dibandingkan dengan tinggi gigi 3 mm dan 3.5 mm yang berimbas pada kehilangan energi yang menurun dan menyebabkan laju alir massa kebocoran semakin bertambah, lihat Gambar 7. Selain itu, gradasi warna menunjukkan perbedaan dimana warna velocity bar pada tinggi gigi 3 mm menunjukkan tidak adanya warna merah sebagai indikator kecepatan fluida yang sangat tinggi.

Gambar 8 menunjukkan trend grafik perubahan laju alir massa kebocoran terhadap tinggi gigi untuk tekanan masuk 5 bar. Trend grafik memperlihatkan terjadi peningkatan yang sangat signifikan pada perubahan laju kebocoran terhadap tinggi gigi. Trend naik secara eksponensial mulai percobaan awal hingga percobaan kedua. Grafik mengalami peningkatan secara linier pada perubahan laju kebocoran pada percobaan kedua hingga percobaan ketiga.



Gambar. 7. Perubahan Laju Alir Massa Kebocoran terhadap variasi tinggi gigi (a) Tinggi gigi 3 mm (b) Tinggi gigi 3.5 mm (c) Tinggi gigi 5.5 mm.



Gambar. 8. Grafik Perubahan Laju Alir massa kebocoran terhadap tinggi gigi.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan serta analisa data pada bab sebelumnya, maka dalam penelitian mengenai studi numerik pengaruh variasi jarak antar gigi, tinggi gigi, tekanan inlet dan kecepatan putaran poros turbin ORC pada refrigerant R123 yang melewati labyrinth seal tipe balance drum dapat diambil kesimpulan, yaitu: Peningkatan jarak antar gigi (*pitch*) akan diikuti dengan penurunan laju alir massa kebocoran. Pada penelitian ini laju alir massa kebocoran mencapai nilai terkecil pada jarak antar gigi 10 mm. Peningkatan tinggi gigi akan diikuti dengan peningkatan laju alir massa kebocoran. Pada penelitian ini laju alir massa kebocoran mencapai nilai terkecil pada tinggi gigi 3.415 mm. Peningkatan tekanan masuk pada *labyrinth seal* akan diikuti dengan kenaikan laju alir massa kebocoran. Peningkatan kecepatan putaran poros tidak diikuti dengan peningkatan laju alir massa kebocoran yang signifikan. Pada penelitian ini laju alir massa kebocoran menunjukkan laju kebocoran yang tidak jauh berbeda pada putaran poros 0 rpm kemudian 1500 rpm dan 3000 rpm.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Statistik Minyak Bumi, Batubara, dan Gas Kementerian Energi Sumber Daya Mineral. 2011. Jakarta, Indonesia.
- [2] Wei-Zhe, Wang and Ying-Zheng, Liu. "Numerical Analysis of Leakage Flow Through Two Labyrinth Seals". 2006. Shanghai Jiaotong University, China.
- [3] Zhao W, Nielsen TK and Billdad, JT. "Effects of cavity on leakage loss in straight-through labyrinth seals". 2002. Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [4] Tuakia, Firman. "Dasar-Dasar CFD Menggunakan FLUENT". 2008. Informatika, Bandung.
- [5] Gao, Rui "Computational Fluid Dynamic and Rotordynamic Study on The Labyrinth Seal". 2012. Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg.