

ANALISIS KINERJA POMPA SENTRIFUGAL PADA VARIASI TRIM DIAMETER MENGGUNAKAN SIMULASI NUMERIK

Joko Waluyo

Dosen
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
Departemen Teknik Mesin dan Industri,
Email : jokowaluyo@ugm.ac.id

Kevin Mahardhika

Mahasiswa
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
Departemen Teknik Mesin dan Industri,

Rahmat Waluyo

Dosen
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
Departemen Teknik Mesin dan Industri,

Diameter trimming is one of the most common modification on centrifugal pump impeller aimed to keep conformity between pump performance and required head and flow rate. In its application, centrifugal pump performance with trimmed diameter could be predicted by using affinity equations which based on geometrical similarity between pre- and post-trimming impeller. However, diameter trimming also alter the dimension ratio in blade passage which prompt further investigation on performance prediction of pump with trimmed impeller diameter. This research is carried out by using numerical simulation to analyze performance of pump with trimmed impeller diameter. The simulation is conducted on radial-type centrifugal pump with impeller diameter 105 mm, inlet blade angle 20° , outlet blade angle 28° , and operating on mass flow rate 1.5 kg/s at rotational speed 2800 rpm. RNG k- ϵ model is used to model turbulence while trimmed diameter values are 100 mm and 95 mm. Results indicate that there is significant differences on head and consumed power between predicted value by simulation and predicted value obtained by employing affinity equations.

Keywords: Performance, Centrifugal Pump, Trimmed Diameter, Numerical Simulation

1. PENDAHULUAN

Pompa merupakan alat yang digunakan untuk memindahkan ataupun meningkatkan tekanan fluida berupa cairan. Salah satu jenis pompa yang sering digunakan adalah pompa sentrifugal. Pompa sentrifugal dapat digunakan pada beragam kebutuhan dari skala industri hingga domestik. Pompa sentrifugal bekerja dengan meningkatkan tinggi tekan dinamis dari fluida di dalam impeller kemudian tinggi tekan tersebut dikonversi menjadi tinggi tekan statis pada saluran volute rumah keong sebelum akhirnya fluida keluar melalui saluran keluar pompa [1].

Dalam penggunaannya, kondisi operasi berupa tinggi tekan dan laju aliran diharapkan bekerja di titik efisiensi terbaik (*Best Efficiency Point*/BEP). Modifikasi berupa trim/pengurangan diameter impeller sering dilakukan untuk menjaga kesesuaian antara kinerja pompa dengan kondisi operasi sehingga pompa dapat bekerja pada efisiensi terbaik. Prediksi nilai tinggi tekan dan efisiensi pompa dapat dilakukan menggunakan persamaan afinitas yang berdasar pada kesebangunan geometris antara impeller pada saat sebelum dan sesudah perlakuan trimming [2]. Meskipun demikian, nilai prediksi persamaan afinitas dapat berbeda dengan nilai terukur terutama pada kondisi trimming yang besar sehingga bentuk impeller tidak lagi sebangun. Penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mempelajari metode prediksi kinerja pompa yang dapat digunakan pada kondisi dimana persamaan afinitas kurang valid.

Beberapa penelitian yang bertujuan untuk mengamati pengaruh perubahan bentuk geometri maupun fluida kerja terhadap kinerja pompa sudah dilakukan. Studi eksperimental untuk mengamati fluktuasi tekanan di sisi keluaran pompa menunjukkan bahwa debit aliran masuk ke dalam pompa sangat mempengaruhi fluktuasi tekanan di sisi keluaran pompa [3]. Beberapa peneliti juga mengamati kinerja pompa karena pengaruh bentuk geometri sudu terhadap kinerja pompa sentrifugal baik dengan studi eksperimen maupun simulasi numeris. Kinerja pompa sentrifugal diamati pada variasi bentuk konfigurasi sudu [4], jumlah sudu, sudut kelengkungan sudu dan pengaruh sudut keluaran sudu [4-7]. Penelitian juga dilakukan untuk mengamati parameter sudu pada pompa yang bekerja dengan fluida viskositas tinggi [8], dan pengaruh sudut sudu pada

pompa vakum [9]. Dari penelitian-penelitian tersebut digaris bawahi bahwa bentuk geometri sudu mempengaruhi kinerja pompa sentrifugal, selain juga dipengaruhi oleh fluida yang bekerja di dalam pompa sentrifugal tersebut. Pengamatan pada berbagai bentuk geometri rumah keong dengan membandingkan bentuk konvensional dan multi segmental volute rumah keong menunjukkan bahwa multi segmental rumah keong mengurangi gaya radial namun mengurangi efisiensi pompa sentrifugal [10,11]. Studi eksperimental yang mengamati perbedaan dimensi impeller yang mempunyai nomer sudu sama pada pompa sentrifugal, menunjukkan bahwa diameter impeller yang lebih besar menghasilkan head yang lebih besar dibandingkan diameter yang lebih kecil [12]. Selain itu, penelitian lain telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pompa sentrifugal dengan trimming impeller menggunakan metode eksperimen. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa modifikasi trimming impeller menurunkan tinggi tekan yang dihasilkan pompa sentrifugal. Lebih jauh lagi, peneliti terkait menyarankan untuk tidak melakukan trimming lebih kecil dari 75% diameter asli impeller [2]. Dengan mempertimbangkan perlunya penelitian lanjutan mengenai metode prediksi kinerja pompa sentrifugal dengan perlakuan trimming, maka penelitian ini bertujuan mengamati kinerja pompa sentrifugal pada variasi trim diameter menggunakan simulasi numerik. Lebih jauh, hasil penelitian ini digunakan untuk membandingkan perolehan kinerja pompa sentrifugal dengan persamaan afinitas.

2. METODE DAN BAHAN

Penelitian mencakup pembuatan model 3D simulasi pompa, melakukan validasi dan melakukan prediksi kinerja pompa pada variasi trim diameter [5]. Model 3D domain fluida divariasikan dengan melakukan trimming pada diameter impeller. Diameter impeller sebelum trimming sebesar 105 mm yang kemudian diberi perlakuan trimming sebanyak 2 tahap sehingga menghasilkan impeller dengan diameter sebesar 100 mm dan 95 mm. Ketiga varian tersebut kemudian disimulasikan pada rentang kapasitas pompa yang telah ditentukan. Kemudian nilai tinggi tekan (H) dan efisiensi (η) diplot terhadap laju aliran (Q) untuk melihat trend kinerja pompa hasil perlakuan trimming. Lebih lanjut lagi, hasil simulasi yang didapat dibahas untuk diambil kesimpulan mengenai pengaruh perlakuan trimming diameter impeller terhadap kinerja pompa sentrifugal.

2.1 Spesifikasi Pompa

Detail dimensi dan kondisi operasi pompa yang digunakan ditunjukkan dalam **Tabel 1**. Diameter impeller awal pompa sebesar 105 mm beroperasi pada laju aliran massa desain sebesar 1,5 kg/det. Desain sudu termasuk dalam golongan *backward angle* karena nilai $\beta_2 < 90^\circ$. Lebih jauh lagi, jenis pompa yang digunakan termasuk dalam golongan radial dengan lebar laluan impeller konstan ($b_1 = b_2$).

Tabel 1: Dimensi dan kondisi operasi pompa sentrifugal

DESKRIPSI	NILAI	SATUAN
Diameter luar impeller (D_2)	105	millimeter (mm)
Diameter dalam impeller (D_1)	45	millimeter (mm)
Lebar laluan keluar impeller (b_2)	6	millimeter (mm)
Lebar laluan masuk impeller (b_1)	6	millimeter (mm)
Sudut sudu bagian outlet impeller (β_2)	20°	-
Sudut sudu bagian inlet impeller (β_1)	28°	-
Laju aliran massa desain (m_D)	1,5	kg/det
Kecepatan putaran (n)	2800	rotasi per menit (rpm)

2.2 Pengaturan Simulasi

Detail pengaturan simulasi numerik diberikan dalam **Tabel 2**. Simulasi dilakukan dengan kondisi *steady*. Model turbulensi menggunakan model k- ϵ RNG. Kondisi batas dinding dimodelkan dengan *standard wall function*. Domain fluida simulasi dibagi menjadi 3 zona yaitu zona isap, zona impeller, dan zona volut. Zona impeller merupakan kerangka berputar sedangkan kedua zona lainnya merupakan kerangka diam. Untuk mengakomodasi perbedaan kecepatan antara zona tersebut, digunakan *multi reference frame*.

Tabel 2: Konfigurasi pengaturan simulasi

DESKRIPSI	KETERANGAN
Software simulasi	ANSYS Fluent 19.1
Fluida	Air
Model turbulensi	k-ε RNG
Kerangka acuan	<i>Multi reference frame</i>
Algoritme	SIMPLE
Model dinding	<i>Standard wall treatment</i>
Kondisi batas inlet	Mass flow rate (kg/s)
Kondisi batas outlet	Exit pressure (Pa)

3. HASIL DAN DISKUSI

Hasil yang dibahas pada bagian ini mencakup persamaan matematika yang digunakan, hasil pemeriksaan kualitas mesh dan konvergensi hasil simulasi, *mesh independency test*, validasi terhadap data eksperimen dari literatur dan trend kinerja pompa terhadap perlakuan trimming diameter *impeller*. Pembahasan juga mencakup visualisasi hasil simulasi berupa kontur tekanan dan medan kecepatan. Kurva karakteristik pompa disajikan dalam bentuk plot tinggi tekan terhadap laju aliran (H vs Q) dan efisiensi hidraulis terhadap laju aliran (η vs Q).

3.1 Persamaan Matematika

Beberapa rumusan digunakan untuk menentukan nilai kinerja pompa secara kuantitatif. Kinerja pompa ditentukan berdasarkan nilai tinggi tekan dan efisiensi pompa. Tinggi tekan dihitung berdasarkan perbedaan tekanan total (P_{total}) antara sisi isap dan sisi keluaran dan dihitung menggunakan persamaan 1.

$$H = \frac{P_2 \text{ total} - P_1 \text{ total}}{\rho \cdot g} \quad (1)$$

Sementara itu, efisiensi dihitung dengan membandingkan laju energi hidraulis yang dihasilkan pompa dan laju energi mekanik yang disuplai oleh poros pompa (persamaan 2). Energi hidraulis berbanding lurus dengan laju aliran (Q) dan tinggi tekan (H) yang dihasilkan oleh pompa sedangkan energi mekanik berbanding lurus dengan torsi (T) dan kecepatan putaran poros (n).

$$\eta_{hyd} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{T \cdot \frac{2\pi \cdot n}{60}} \quad (2)$$

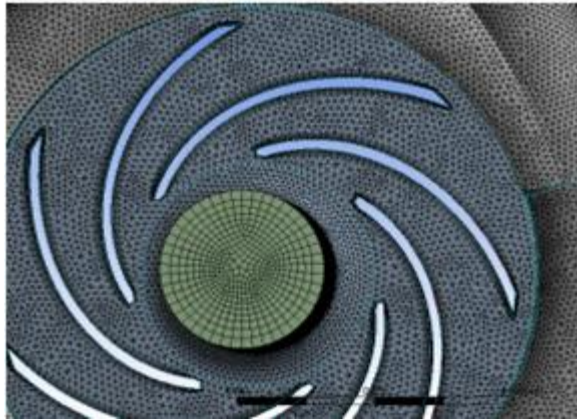
Adapun prediksi tinggi tekan pompa menggunakan persamaan afinitas didasarkan pada kesebangunan konstruksi pompa dan diberikan oleh persamaan 3 [4].

$$H_2 = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \cdot H_1 \quad (3)$$

Dimana subskrip 1 dan 2 menandakan nilai sebelum dan sesudah perlakuan trimming. Dapat dilihat bahwa prediksi menggunakan persamaan afinitas menunjukkan bahwa tinggi tekan pompa berbanding lurus dengan kuadrat diameter luar *impeller*.

3.2 Mesh Model Simulasi

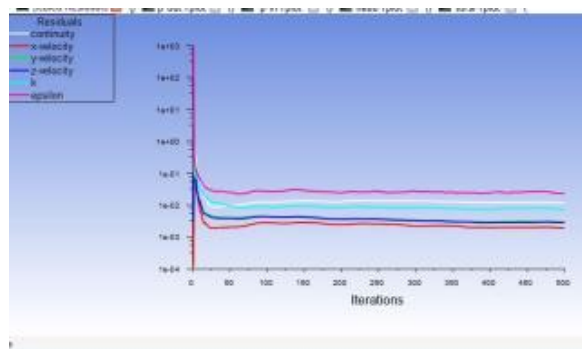
Informasi mengenai mesh diberikan di **Gambar 1** dan **Tabel 3**. Mesh yang digunakan terdiri dari elemen terstruktur (heksahedral) dan tidak terstruktur (tetrahedral). Elemen tetrahedral digunakan untuk memodelkan geometri kompleks seperti bagian lidah volut.



Gambar 1: Mesh model 3D simulasi

3.3 Konvergensi, independensi mesh, dan Validasi

Untuk meminimalisasi error akibat jumlah iterasi yang terbatas, dilakukan pengamatan pada nilai residual persamaan atur. Nilai residual tersebut akan menentukan konvergensi hasil simulasi [13]. Hasil plotting residual terhadap jumlah iterasi disajikan di **Gambar 2**.



Gambar 2: Hasil monitoring residual

Terlihat bahwa nilai residual menunjukkan trend stabil dan menurun yang menunjukkan hasil simulasi konvergen. Selanjutnya, hasil simulasi diuji kembali melalui uji independensi mesh untuk mengeliminasi error akibat diskretisasi spasial. Uji ini dilakukan melalui 2 tahap penambahan jumlah elemen dan 3 mesh, hasilnya disajikan di **Tabel 3**. Hasil uji independensi mesh menunjukkan perbedaan hasil simulasi berkurang seiring peningkatan jumlah elemen. Pada jumlah elemen sedang nilai tinggi tekan sudah tidak jauh berbeda dibanding mesh dengan jumlah elemen lebih banyak, sehingga setelah mempertimbangkan akurasi dan sumber daya komputasi yang tersedia dipilih mesh dengan 791.312 elemen.

Tabel 3: Hasil uji independensi mesh

JUMLAH ELEMEN	LAJU ALIRAN (kg/det)	TINGGI TEKAN (m)
223.730	0,667	14,326
791.312	0,667	14,578
1.246.834	0,667	14,764

Lebih lanjut lagi, hasil simulasi divalidasi dengan cara membandingkan nilai prediksi simulasi dengan data eksperimen. Proses ini bertujuan untuk meminimalisasi ketidakpastian antara aliran hasil simulasi dan aliran nyata. Pada penelitian ini, data eksperimen [1,3] digunakan untuk validasi model simulasi. Hasil validasi yang disajikan di **Tabel 4** menunjukkan bahwa persen deviasi antara hasil simulasi dengan eksperimen kurang

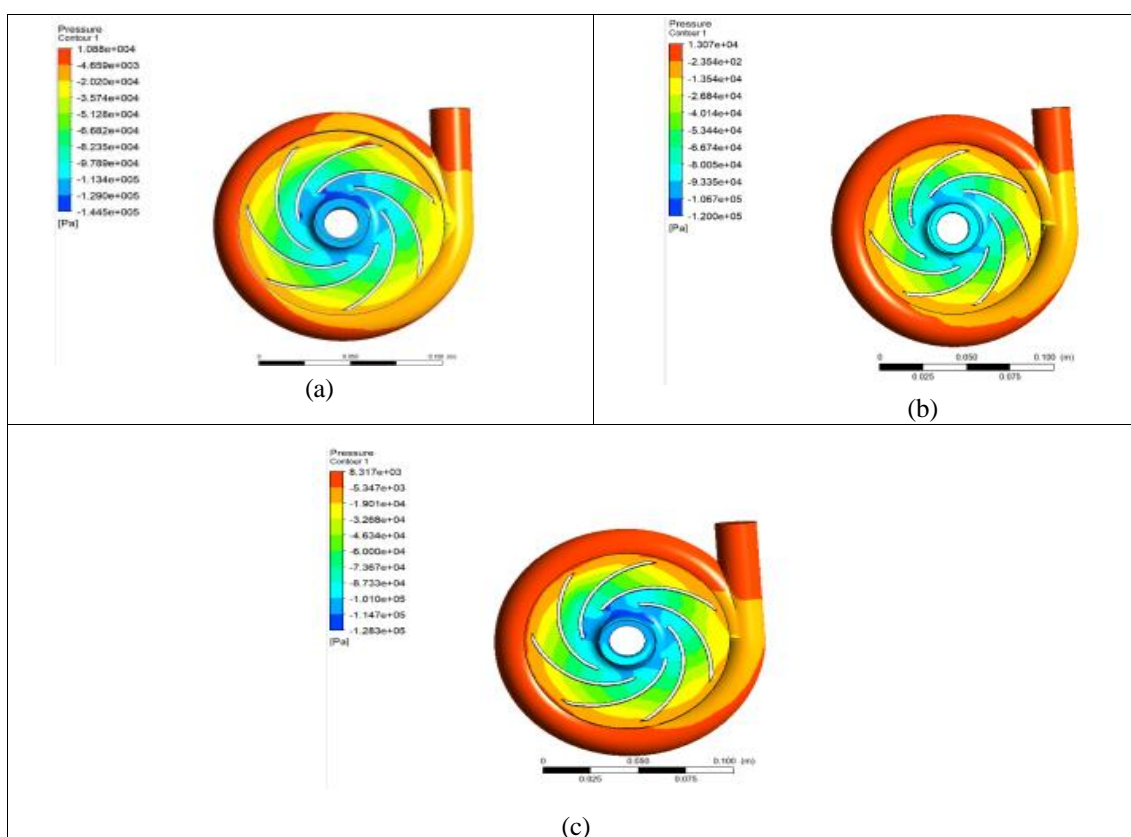
dari 10% sehingga simulasi yang dilakukan pada penelitian ini masuk dalam rentang valid.

Tabel 4: Hasil validasi

LAJU ALIRAN MASSA (kg/det)	TINGGI TEKAN (m)		DEVIASI (%)
	SIMULASI	EKSPERIMEN	
1,035	12,48	13,68	9,61
0,667	13,32	14,61	9,68
0,385	15,01	16,58	9,47

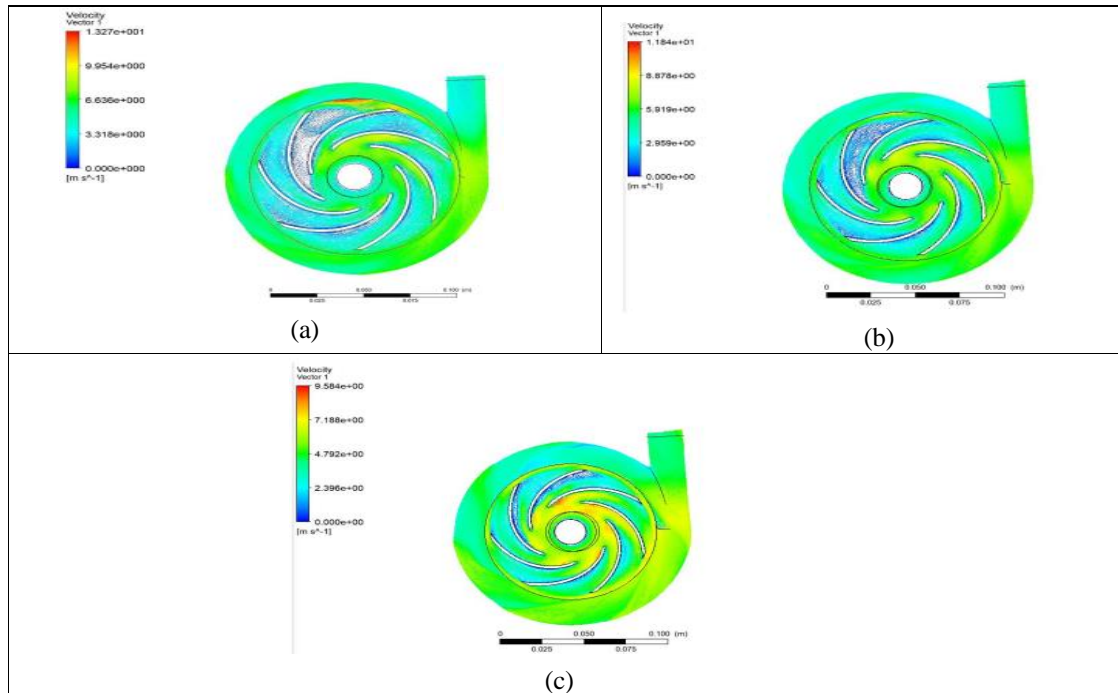
3.3 Perbandingan kinerja pompa hasil simulasi

Hasil simulasi numerik pompa sentrifugal dapat disajikan dalam bentuk visual melalui kontur tekanan dan medan kecepatan. Kontur tekanan pada laju aliran 1,5 kg/det untuk ketiga model pompa ditunjukkan dalam **Gambar 3**.



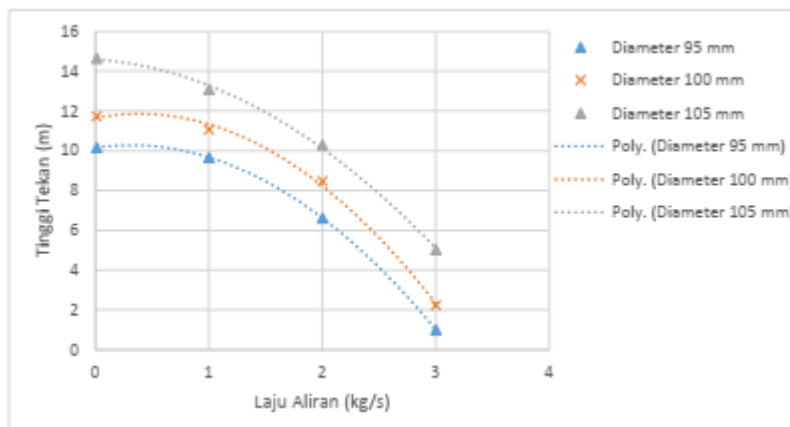
Gambar 3: Distribusi tekanan pada pompa dengan a) $D_2 = 105$ mm, b) $D_2 = 100$ mm, dan c) $D_2 = 95$ mm laju aliran 1,5 kg/det.

Perbandingan kontur tekanan hasil simulasi menunjukkan bahwa pompa setelah perlakuan trimming mempunyai rentang tekanan dalam pompa lebih besar. Hal lain yang dapat diamati adalah pada kasus trimming, tekanan di bagian volut lebih tinggi dibanding sebelum trimming. Lebih lanjut lagi, visualisasi distribusi kecepatan aliran dalam pompa disajikan di **Gambar 4**. Terlihat di **Gambar 4** bahwa setelah dilakukan trimming menunjukkan kecepatan yang tidak seragam di laluan impeller pompa. Hal ini dapat disebabkan oleh sudut sudu bagian luar setelah perlakuan trimming yang lebih rendah dibanding impeller sebelum perlakuan trimming. Pada laju aliran desain, perubahan sudut sudu dan diameter menyebabkan arah aliran tidak sesuai dengan geometri pompa sehingga muncul turbulensi yang ditandai oleh nilai kecepatan yang tidak seragam.

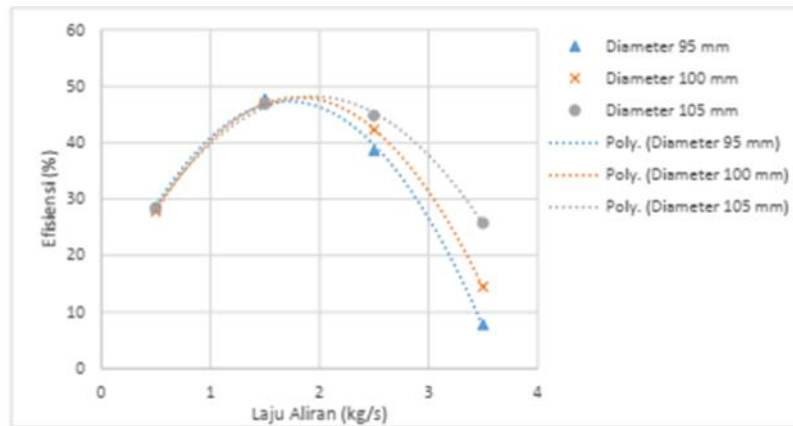


Gambar 4: Distribusi kecepatan pada laju aliran 1,5 kg/det dengan (a) $D_2 = 105$ mm, (b) $D_2 = 100$ mm, dan (c) $D_2 = 95$ mm

Lebih lanjut lagi perbandingan kurva karakteristik H-Q pada pompa dengan perlakuan trimming ditunjukkan di **Gambar 5**. Terlihat bahwa perlakuan trim diiringi oleh penurunan tinggi tekan yang dihasilkan pompa pada rentang laju aliran yang disimulasi. Trend kualitatif ini sesuai dengan prediksi persamaan afinitas. Sementara itu, kurva $\eta - Q$ yang ditunjukkan dalam **Gambar 6** mengindikasikan bahwa pada laju aliran tinggi, efisiensi hidraulis pompa setelah perlakuan trim mengalami penurunan sedangkan pada laju aliran rendah efisiensi hidraulis cenderung konstan setelah perlakuan.



Gambar 5: Perbandingan tinggi tekan pada 3 variasi diameter impeller.



Gambar 6: Perbandingan nilai efisiensi pada variasi 3 diameter impeller

Tabel 5: Perbandingan prediksi simulasi dengan prediksi persamaan afinitas

NO	HASIL	LAJU ALIRAN (kg/det)	TINGGI TEKAN (m)
1	Simulasi	1	9,86
2	Persamaan Afinitas	1	8,94
Deviasi (%)			12,3

Pengamatan grafik kemudian dapat diperkuat dengan menampilkan perbandingan prediksi kinerja pompa hasil simulasi dengan prediksi melalui persamaan afinitas di **Tabel 5**. Perbandingan prediksi menggunakan model hasil trimming dengan diameter akhir 100 mm. Secara kuantitatif terlihat bahwa prediksi simulasi dan persamaan afinitas memiliki deviasi signifikan dan melebihi 10 %. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa prediksi kinerja pompa menggunakan persamaan afinitas pada perlakuan trimming kurang valid.

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini dilakukan studi mengenai analisis kinerja pompa setelah perlakuan trimming secara numerik. Pompa sentrifugal yang digunakan merupakan jenis radial dengan laju massa aliran desain sebesar 1,5 kg/det dan kecepatan putaran 2800 rpm. Trimming dilakukan pada impeller dengan diameter luar (D_2) awal sebesar 105 mm kemudian dikurangi menjadi 100 mm dan 95 mm. Model simulasi 3D menggunakan metode Computational Fluid Dynamics aliran *steady* dan model turbulensi $k-\epsilon$ RNG. Kinerja pompa hasil simulasi secara kualitatif mengikuti pola kecenderungan persamaan afinitas, namun terdapat deviasi signifikan antara nilai tinggi tekan hasil simulasi dan nilai terhitung oleh persamaan afinitas. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa metode prediksi menggunakan persamaan afinitas kurang tepat bila dilakukan pada pompa dengan setelah perlakuan trimming dengan kecepatan spesifik rendah.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] HUANG, R., ZHANG, Z., ZHANG, W., MOU, J., ZHOU, P., WANG, Y., “Energy performance prediction of the centrifugal pumps by using hybrid neural network”, *Energy*, 213, 2020
- [2] SAVAR, M., KOZMAR, H., DAN SUTLOVIC, I., “Improving centrifugal pump efficiency by impeller trimming”, *Desalination*, 654-659, 2009.
- [3] STICKLAND, M. T., SCANLON, T. J., “An Experimental Study of Unsteady Pressure distribution around the Impeller Outlet of Centrifugal Pump”, *ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Boston: ASME, 2000.
- [4] SADEK, A., SALEH, I., NASSIF, R., MOURIS, E., “Experimental Study of the Effect of Blade Configurations on the Performance of Centrifugal Pumps”, *Cairo: Aerospace Sciences and Aviation Technology*, 2013.

- [5] ELYAMIN, G. R., BASSILY, M. A., KHALIL, K. Y., “Effect of impeller blades number on the performance of a centrifugal pump”, *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), pp. 39-48, 2019.
- [6] TAN, L., ZHU, B., CAO, S., BING, H., WANG, Y., “Influence of Blade Wrap Angle on Centrifugal Pump Performance by Numerical and Experimental Study”, *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 27(1), pp. 171-177, 2013.
- [7] BACHAROUDIS, E., FILIOS, A., MENTZOS, M., MARGARIS, D., “Parametric Study of a Centrifugal Pump Impeller by Varying the Outlet Blade Angle”, *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2(1), pp. 75-83, 2008.
- [8] YOUSEFI, H., NOOROLLAHI, Y., TAHANI, M., FAHIMI, R., “Numerical simulation for obtaining optimal impeller's blade parameters of a centrifugal pump for high-viscosity fluid pumping”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, pp. 16-26, 2019.
- [9] DING, H., LI, Z., GONG, X., LI, M., “The influence of blade outlet angle on the performance of centrifugal pump Vacuum”, vol 1 (159), pp. 239-246, 2019.
- [10] ALEMI, H., NOURBAKHS, S. A., RAISEE, M., NAJAFI, F., “Development of new multi volute casing geometries for radial force reduction in centrifugal pumps”, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, pp. 1-11, 2015.
- [11] KELDER, J., DIJKERS, R., ESCH, B. V., KNYT, N., “Experimental and theoretical study of the flow in the volute of a low specific-speed pump”, *Journal of Fluid Dynamic Research*, pp. 267-280, 2001.
- [12] MEAKHAIL, T. A., SALEM, M., DAN SHAFIE, I., “Steady and unsteady flow inside a centrifugal pump for two different impellers”, *International Journal of Energy and Power Engineering*, pp. 65-76, 2014.
- [13] RAMIREZ, R., AVILA, E., LOPEZ, L., BULA A., DUARTE FORERO, J., “CFD characterization and optimization of the cavitation phenomenon in dredging centrifugal pumps”, *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), pp. 291-309, 2020