



Modifikasi Sudut Masuk Impeller Pompa Sentrifugal Untuk Mengurangi Efek Kavitasi

Nu Rhahida Arini¹, Desy Ramadhani², Lohdy Diana³, Reihan Rizky Reivanda⁴

^{1,2,3,4}Sistem Pembangkit Energi, Mekanika dan Energi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

¹arini@pens.ac.id, ²ramadhani.desy.dr@gmail.com, ³lohdy@pens.ac.id, ⁴reihanrizky19@gmail.com

Abstract

A centrifugal pump utilizes pressure energy, which is generated by the kinetic energy of involute impeller rotation. A common issue in pump operation is cavitation, a physical phenomenon that occurs when the static pressure of the fluid drops below its saturation pressure, causing the fluid to boil. This phenomenon affects the pump, leading to problems such as shockwaves and erosion, which must be minimized. This research aimed to investigate the influence of pump impeller modifications in reducing the cavitation effect using the computational fluid dynamics (CFD) method. The modifications focused on adjusting the inlet and outlet angles of the pump impeller. A 3D CFD model was developed using OpenFOAM, a CFD software tool, and the cavitation number (Ca) was used as the primary parameter to measure cavitation levels. Additionally, Ca was compared to a reference cavitation number, calculated based on the saturated pressure, while cavitation points at the impeller inlet and outlet were visualized using Paraview software. The results showed that a pump impeller with a blade inlet angle (β_1) of 21,69° resulted in 39.157 cavitation points, whereas modifying β_1 to 38,66° reduced the cavitation points to 32.778, thus decreasing the cavitation points by 6.379. This confirmed that modifying β_1 significantly reduces the cavitation effect.

Keywords: Cavitation number, Impeller, Centrifugal pump, OpenFOAM, CFD

Abstrak

Pompa sentrifugal memanfaatkan energi tekanan yang dihasilkan oleh energi kinetik dari putaran impeller berbentuk involute. Masalah umum dalam operasi pompa adalah kavitasi, yaitu fenomena fisik yang terjadi ketika tekanan statis fluida turun di bawah tekanan saturasinya, sehingga menyebabkan fluida mendidih. Fenomena ini memengaruhi pompa dengan menimbulkan masalah seperti gelombang kejut dan erosi, yang harus diminimalkan. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh modifikasi impeller pompa dalam mengurangi efek kavitasi menggunakan metode dinamika fluida komputasi (CFD). Modifikasi dilakukan dengan menyesuaikan sudut masuk dan keluar pada impeller pompa. Model CFD 3D dikembangkan menggunakan OpenFOAM, sebuah perangkat lunak CFD, dan angka kavitasi (Ca) digunakan sebagai parameter utama untuk mengukur tingkat kavitasi. Selain itu, Ca dibandingkan dengan angka kavitasi referensi yang dihitung berdasarkan tekanan saturasi, sementara titik-titik kavitasi pada bagian masuk dan keluar impeller divisualisasikan menggunakan perangkat lunak Paraview. Hasil penelitian menunjukkan bahwa impeller pompa dengan sudut masuk bilah (β_1) sebesar 21,69° menghasilkan 39.157 titik kavitasi, sedangkan modifikasi β_1 menjadi 38,66° mengurangi titik kavitasi menjadi 32.778, sehingga menurunkan jumlah titik kavitasi sebanyak 6.379. Hal ini mengonfirmasi bahwa modifikasi β_1 secara signifikan dapat mengurangi efek kavitasi.

Kata kunci: Angka kavitasi, Impeller, Pompa sentrifugal, OpenFOAM, CFD

Diterima Redaksi : 2024-09-22 | Selesai Revisi : 2024-12-30 | Diterbitkan Online : 2025-03-03

1. Pendahuluan

Pompa sentrifugal banyak digunakan di industri, terutama dalam proses pengolahan dan distribusi air. Banyak pompa sentrifugal dirancang untuk beroperasi terus menerus dalam jangka waktu yang lama. Beberapa keunggulan pompa sentrifugal adalah harga yang relatif murah, konstruksi pompa sederhana, pemasangan dan perawatan yang mudah, kapasitas tekanan yang tinggi, keandalan dan daya tahan yang tinggi [1]. Namun

demikian dalam pengoperasian pompa sentrifugal banyak dijumpai kendala, diantaranya adalah kavitasi. Kavitasi adalah fenomena yang terjadi ketika fase uap muncul pada aliran fluida yang disebabkan oleh terjadinya penurunan tekanan, hingga lebih rendah daripada tekanan jenuh fluida. Penurunan tekanan ini disebabkan karena impeller berputar dengan kecepatan tinggi sehingga tekanan statis di sekitar impeller menurun dan mengakibatkan pendidihan (*boiling*). Kerugian yang disebabkan oleh kavitasi meliputi:



Lisensi
Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional

getaran, peningkatan tingkat kebisingan, efek lubang pada *impeller* (erosi dan korosi) yang dapat mengakibatkan penurunan kinerja pompa [2], [3]. Pada saat kavitasi, aliran fluida menjadi dua fase yang terdiri dari fase cair dan uap. Transisi fase ini terjadi karena perubahan tekanan hidrodinamik [4], [5], [6] yang ditandai dengan munculnya titik kavitasi. Pada titik kavitasi yang berkembang sepenuhnya, tekanan total pompa turun sehingga terjadi pendidihan dan aliran menjadi sangat bergejolak. Karakteristik fluida di sekitar *impeller* pada saat terjadinya kavitasi merupakan evaluasi yang penting [7], [8]. *Impeller* yang baik dapat ditinjau dari tekanan statis dan kecepatan relatif pada saat beroperasi [9]. Karakteristik kavitasi menggunakan pendekatan perhitungan bilangan thoma dengan nilai kecepatan tertentu. Besarnya bilangan thoma (σ) yang merupakan parameter kavitasi pada pompa, dapat diketahui pada pengujian maupun pemodelan. Parameter yang mempengaruhi laju kavitasi diantaranya adalah kapasitas, rotasi motor, dan tekanan hisap [10], [11]. Pada evaluasi awal, kavitasi dapat dilakukan dengan menentukan seberapa dekat tekanan fluida terhadap tekanan jenuhnya. Kedekatan ini sebagian besar diukur melalui konstanta yang disebut "Bilangan Kavitasi" (*Cavitation Number*). Tujuan penelitian adalah untuk mengurangi efek kavitasi pada pompa dengan memodifikasi sudut masuk (*inlet angle*) *impeller* pompa menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dan menghitung jumlah titik kavitasi. Dimana penelitian bertujuan untuk mengetahui seberapa besar hasil kavitasi yang terjadi pada pompa sentrifugal dengan melakukan beberapa variasi.

2. Metode Penelitian

2.1. Diagram Alir Penelitian

Dalam bab ini membahas diagram alir dan simulasi yang menggunakan *OpenFOAM* metode yang digunakan pada penelitian ini

2.1.1 Data Masukan

Untuk melakukan penelitian ini diperlukan data masukan seperti tipe pompa yang akan digunakan yaitu tipe *closed impeller*, jenis pompa yang digunakan yaitu pompa sentrifugal, tekanan pompa secara umum dihasilkan $\leq$ tekanan saturasi, dan tekanan kavitasi pompa secara general yang diperlukan diperoleh dari jurnal sebesar 1372,9 Pa.

2.1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah bertujuan untuk menentukan arah penelitian yang akan dilakukan. Rumusan masalah pada penelitian ini adalah bagaimana pengaruh modifikasi sudut *inlet impeller* terhadap fenomena kavitasi pada pompa sentrifugal.

2.1.3. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk memahami pompa sentrifugal, *pressure coefficient*, dan metode simulasi menggunakan *CFD OpenFOAM*. Selain itu, studi literatur tentang penelitian sebelumnya digunakan pada proyek akhir ini sebagai salah satu bentuk referensi yang menunjang penelitian.

2.1.4. Pengambilan Data untuk Simulasi

Pengambilan data dilakukan pada industri. Data yang diambil antara lain geometri dan data kondisi *inlet* dan *outlet* fluida pada pompa sentrifugal. Pengambilan data ini bertujuan untuk menggambarkan geometri maupun keadaan sesuai dengan aslinya pada industri. Dikarenakan memerlukan data geometri dan kondisi operasi, maka tabel pengambilan data ini seperti pada Tabel 1.

2.1.5. Pembuatan Geometri *Impeller* Pompa Sentrifugal

Pembuatan geometri dilakukan dengan menggunakan data yang telah diperoleh pada industri sebagai acuan untuk memodifikasi *impeller* pompa sentrifugal seperti Tabel 1.

2.1.6. Penentuan *Boundary* dan *Initial Condition*

Sebelum dilakukan simulasi, dilakukan penentuan *boundary* dan *initial condition* untuk memasukkan parameter-parameter yang digunakan seperti kecepatan dan tekanan.

2.1.7. Simulasi *CFD OpenFOAM*

Simulasi menggunakan *CFD OpenFOAM* dilakukan dengan 3 tahap, yaitu *preprocessing*, *processing*, dan *postprocessing*. Pada tahapan *preprocessing*, dilakukan meshing dan pemodelan geometri dari *impeller* sesuai dengan keadaan aslinya. Setelah *preprocessing*, pada tahap *processing*, dilakukan simulasi dengan memasukkan data keadaan atau *boundary condition* pompa dan memilih pemodelan yang sesuai. Pada tahap terakhir atau *postprocessing*, dilakukan pengambilan data secara kuantitatif maupun kualitatif (kontur). Khusus untuk data kuantitatif digunakan untuk validasi.

2.1.8 Validasi Hasil Simulasi

Validasi bertujuan untuk menyesuaikan data hasil simulasi (tekanan *output*) dengan data hasil yang didapat pada industri (tekanan *output* pada keadaan sebenarnya).

2.1.9 Pengambilan Data Kontur Tekanan dan Kecepatan

Pengambilan data tersebut bertujuan untuk mengetahui distribusi tekanan dan fenomena kavitasi pada *impeller* pompa sentrifugal.

2.1.10. Perhitungan *Cavitation Number* (Ca)

Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui nilai kavitasi dan seberapa parah kavitasi yang terjadi pada *impeller* pompa sentrifugal.

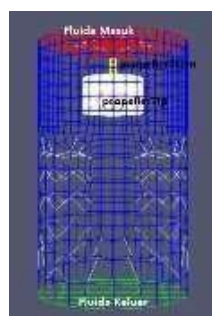
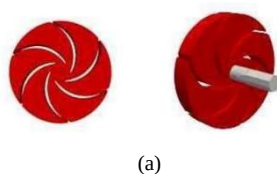
2.1.11. Analisa Hasil

Setelah didapatkan data secara kuantitatif dan kualitatif yang sudah di validasi, dilakukan analisis kavitasi pada *impeller* pompa sentrifugal menggunakan distribusi tekanan yang terjadi pada *impeller* dan perhitungan seberapa banyak bagian yang terjadi kavitasi. Selain itu juga membandingkan kinerja pompa sentrifugal original pada industri dengan modifikasi. Pada analisis data sesuai dengan hasil simulasi yang telah valid.

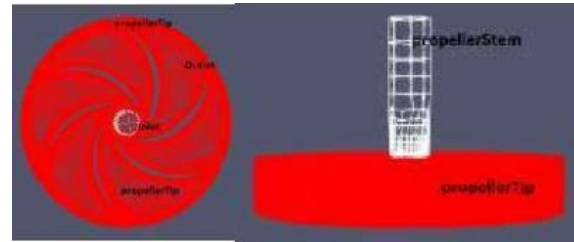
2.2. Pemodelan Kavitasi di OpenFOAM

CFD sebagai metode numerik telah teruji dapat memprediksi masalah kavitasi. Metode ini juga menawarkan keunggulan diantaranya biaya yang rendah dalam aspek investasi dan operasional dibandingkan dengan metode eksperimental. Pemodelan CFD pada kavitasi telah dilakukan oleh beberapa peneliti dan memberikan hasil yang baik [12], [13]. Pada penelitian ini metode CFD akan dikerjakan dengan menggunakan OpenFOAM, yaitu salah satu software CFD. Solver yang digunakan adalah *Inter Phase Change Foam* pada OpenFOAM untuk mensimulasikan fenomena aliran kavitasi di sekitar pompa *impeller* sentrifugal. Solver tersebut menggunakan Model Persamaan Transportasi (*Transport Equation Model* - TEM) fraksi volume untuk memprediksi distribusi fase. Beberapa model perubahan fase diintegrasikan ke dalam solver untuk memodelkan kavitasi. Prosedur yang digunakan dalam metode CFD ini adalah sebagai berikut :

2.2.1. *Pre – Processing* : Tahap ini digunakan untuk membangun ruang (*domain*) yang akan dipecahkan, sebelum mensimulasikan model, dalam hal ini adalah *impeller*. Domain tersebut didiskritisasi menjadi bagian kecil (*cell*). Desain geometri *impeller* dan topologi domain dan diberikan pada Gambar 1a-c:



(b)

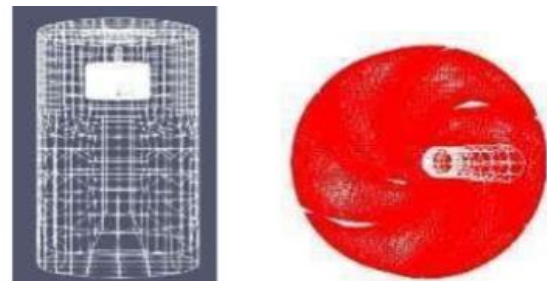


(c)

Gambar 1. (a) Geometri *impeller* pompa sentrifugal, (b) Geometri ruang (*domain*), (c) Diskritisasi *impeller*

Pemilihan *Solver*, *solver* yang digunakan adalah *Inter Phase Change Foam* dengan *subsolver propeller* yang cocok untuk memodelkan fluida *incompressible*, *turbulensi*, dan kavitasi.

2.2.2. *Meshing* : Membagi volume atur geometris menjadi elemen yang lebih kecil dan lebih halus untuk mendapatkan hasil yang lebih konvergen pada saat simulasi.



Gambar 2. *Meshing Impeller*

2.2.3. *Processing* : Tahapan pemecahan masalah dengan memasukkan kondisi yang akan diamati atau mensimulasikan geometri. Pengaturan simulasi pada file "*Control Dict*" dengan mengganti nilai *Courant Number* (Co) menjadi 2 dan memodifikasi kondisi batas dan kondisi awal pada "*folder 0*" yang mencakup tekanan dan kecepatan. Dalam TEM fluida *incompressible*, persamaan yang terlibat terdiri dari persamaan kontinuitas, persamaan momentum fluida, dan persamaan TEM fraksi volume. Persamaan kontinuitas dan momentum ditulis dalam Persamaan 1 dan 2.

$$\frac{\partial \rho m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho m \bar{u}_1)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

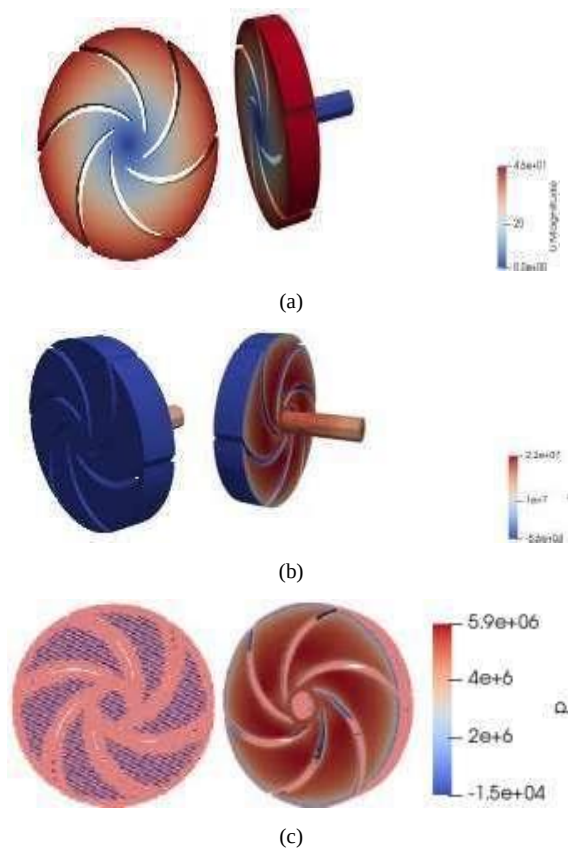
$$\frac{\partial (\rho m \bar{u}_1)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho m \bar{u}_{1u_j})}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{S}_{1j} - \bar{B}_{1j}) + \rho m g_i \quad (2)$$

Persamaan fraksi volume cairan diberikan pada persamaan 3

$$\frac{\partial a_1}{\partial t} + \frac{\partial (a_1 \bar{u}_1)}{\partial x_i} = \frac{\dot{m}}{\rho_1} \quad (3)$$

α_1 adalah fraksi volume cair, $\dot{m}$ adalah laju perubahan fase antara fase uap dan cair, u adalah kecepatan fluida, p adalah tekanan dan ρ adalah densitas.

2.2.4. *Post Processing* : Fase visualisasi data simulasi. Dalam post processing, visualisasi yang dapat dilihat meliputi kontur kecepatan dan kontur tekanan seperti yang diberikan pada Gambar 3a-c :



Gambar 3. Countur *impeller* : (a) Kontur kecepatan, (b) Kontur tekanan, (c) Visualisasi titik kavitasi *OpenFOAM*

2.3. Detail Model Geometri

Data yang diperlukan untuk desain *impeller* meliputi geometri *inlet* dan *outlet fluida* pada pompa sentrifugal. Modifikasi geometri *impeller* dilakukan untuk mengurangi efek kavitasi. Modifikasi dilakukan pada memvariasikan sudut masuk *impeller (impeller inlet angle)* menjadi 38,66° dari sudut asli 21,69°. Model geometri *impeller* selengkapnya ditunjukkan pada Gambar 4 dan Tabel 1. Selanjutnya penentuan kondisi batas dan kondisi awal dilakukan dengan memasukkan parameter yang ditunjukkan pada Tabel 1. Untuk memvalidasi data keluaran *impeller*, data hasil simulasi dibandingkan dengan data operasional industri seperti yang diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tabel Data Properti *Impeller* Pompa Sentrifugal

Parameter	Data Simulasi	Data Industri	Unit
Jumlah Blade	6	6	-
Inlet Diameter di <i>Impeller</i>	23	-	Milimeter
Outlet Diameter di <i>Impeller</i>	113	-	Milimeter
	21,69	-	Derajat

Parameter	Data Simulasi	Data Industri	Unit
Sudut Inlet Blade	38,66	-	Derajat
Sudut Outlet Blade	30,80	-	Derajat
Kecepatan	65,5	33,94	m/s
Debit	-	60	m ³ /jam
Diameter	-	218	Milimeter



Gambar 4. Geometri *Impeller*

Data simulasi dan industri mempunyai Bilangan Reynolds (*Re*) yang sama atau serupa. Persamaan *Re* diberikan pada Persamaan 4.

$$Re_1 = Re_2 \quad (4)$$

$$\frac{\rho V_1 D_1}{\mu} = \frac{\rho V_2 D_2}{\mu} \quad (5)$$

$$V_1 D_1 = V_2 D_2 \quad (6)$$

Dengan *V* adalah kecepatan dan *D* adalah ukuran objek. Tanda 1 dan 2 menyatakan kasus simulasi dan industri. Perhitungan Persamaan 4 untuk mengetahui besar kecepatan aktual yang harus digunakan pada simulasi, yaitu 65,5 m/s. Sedangkan tekanan yang dipakai adalah sama dengan tekanan di industri. Nilai persentase kesalahan dapat dihitung dengan persamaan :

$$Error(\%) = \left| \left(\frac{simulation\ valve - actual\ value}{actual\ valve} \right) \right| \times 100\ \% \quad (7)$$

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa simulasi CFD yang dilakukan adalah pengambilan data kualitatif dan kuantitatif. Data kualitatif berguna untuk mengetahui distribusi tekanan pada *impeller* pompa sentrifugal. Sedangkan data kuantitatif diolah dan dihitung nilai bilangan kavitasi yang bertujuan untuk mengetahui fenomena distribusi kavitasi pada *impeller* pada setiap variasi *impeller inlet angle*.

Cavitation number (*Ca*) atau bilangan kavitasi adalah bilangan nondimensi yang menggambarkan hubungan antara perbedaan tekanan absolut lokal dari tekanan uap dan energi kinetik per volume, dan digunakan untuk mengkarakterisasi potensial aliran untuk kavitasi [14]. *Cavitation number* dapat didefinisikan sebagai Persamaan 8:

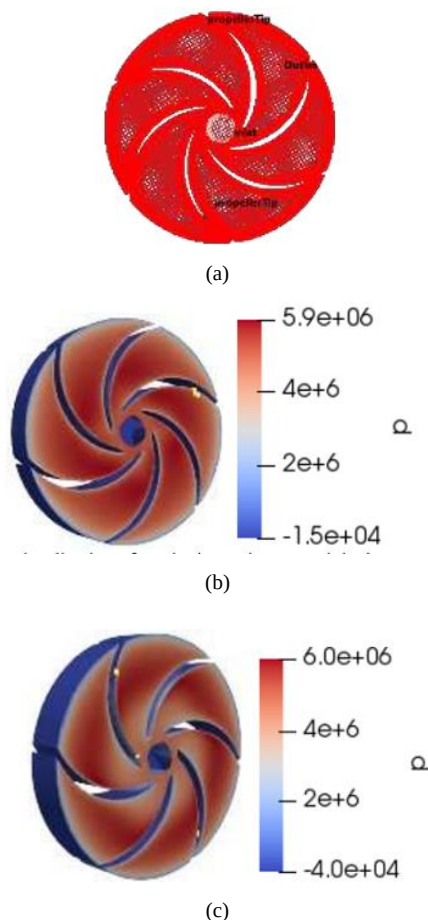
$$Ca = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (8)$$

p adalah Tekanan dalam aliran cairan (Mpa), V adalah Kecepatan aliran (m/s), p_v adalah Tekanan dalam uap (Mpa), ρ adalah Kepadatan (kg/m³)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Meshing dan Kondisi Batas

Dalam penelitian ini, prosedur dimulai dengan mengembangkan model numerik dengan menggunakan *unstructured mesh* seperti pada Gambar 5a. Jumlah sel (cell) sebanyak 147.159. Pada simulasi ini *Courant Number* (Co) diatur sebesar 2. Dari hasil simulasi selanjutnya dihitung bilangan kavitasi yang disajikan pada Tabel 4.



Gambar 5. (a) Meshing di OpenFOAM, (b) Visualisasi Titik Kavitas pada Geometri Asli, (c) Visualisasi Titik Kavitas pada Impeller Inlet Variasi

Tabel 2 berisi perhitungan bilangan kavitasi untuk menentukan terjadinya kavitasi pada *impeller*. Visualisasi titik kavitasi dapat dilihat pada Gambar 5b. Dari Gambar 5b menunjukkan distribusi lokasi kavitasi pada *impeller* pompa sentrifugal yang ditandai dengan titik-titik kuning yang tersebar di sekitar *impeller*. Terjadinya kavitasi berawal pada sisi hisap tepi saluran masuk *impeller*. Selanjutnya gelembung kavitasi tumbuh dengan cepat di sepanjang sisi *outlet impeller* [15].

Tabel 2.
Tabel Bilangan Kavitasi yang Dihitung pada Sudut Masuk 21,69°

No	P (Mpa)	Pv (Mpa)	V (Magnitudo)	ρ	Ca	Ca Reff	Kavitasi/ Non Kavitasi
1	5,206	0,049	34,627	0,9957	0,0086	0,01	Kavitasi
2	5,116	0,049	35,143	0,9957	0,0082	0,01	Kavitasi
3	4,414	0,049	35,430	0,9957	0,0070	0,01	Kavitasi
4	2,302	0,049	35,628	0,9957	0,0036	0,01	Kavitasi
5	1,902	0,049	36,091	0,9957	0,0029	0,01	Kavitasi
6	3,757	0,049	36,058	0,9957	0,0057	0,01	Kavitasi
7	5,090	0,049	35,859	0,9957	0,0079	0,01	Kavitasi
8	4,891	0,049	36,264	0,9957	0,0074	0,01	Kavitasi
9	4,812	0,049	38,847	0,9957	0,0070	0,01	Kavitasi
10	5,020	0,049	36,467	0,9957	0,0075	0,01	Kavitasi

Tabel 3 berisi perhitungan angka kavitasi untuk menentukan terjadi titik kavitasi pada *impeller*. Visualisasi titik kavitasi dapat dilihat pada Gambar 5c. yang dinyatakan dengan titik-titik kuning yang tersebar di sekitar *outlet impeller* [16].

Tabel 3.
Tabel Bilangan Kavitasi yang Dihitung pada Sudut Masuk 38,66°

No	P (Mpa)	Pv (Mpa)	V (Magnitudo)	ρ	Ca	Ca Reff	Kavitasi/ Non Kavitasi
1	1,721	0,049	38,117	0,9957	0,0023	0,01	Kavitasi
2	3,736	0,049	37,930	0,9957	0,0051	0,01	Kavitasi
3	3,030	0,049	37,461	0,9957	0,0043	0,01	Kavitasi
4	1,372	0,049	37,803	0,9957	0,0019	0,01	Kavitasi
5	1,729	0,049	38,117	0,9957	0,0023	0,01	Kavitasi
6	3,751	0,049	37,930	0,9957	0,0052	0,01	Kavitasi
7	3,02	0,049	37,461	0,9957	0,0043	0,01	Kavitasi
8	1,380	0,049	37,803	0,9957	0,0019	0,01	Kavitasi
9	3,457	0,049	10,608	0,9957	0,0608	0,01	Kavitasi
10	4,123	0,049	10,813	0,9957	0,0700	0,01	Kavitasi

Hasil perhitungan *cavitation number* dan visualisasi gambar menunjukkan bahwa kavitasi dapat dideteksi di sekitar *outlet impeller*. Jumlah titik kavitasi yang terjadi di sekitar *impeller* dengan sudut masuk asli adalah 32778 poin seperti yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Tabel Titik Simulasi

No	Geometri Impeller	Point
1	Asli	39157
2	Sudut Inlet	32778

Dari Tabel 4, intensitas kavitasi dalam pompa bergantung pada sudut saluran masuk *impeller*. Hal ini sangat mempengaruhi distribusi tekanan [17], [18]. Modifikasi sudut masuk dapat mengurangi jumlah titik kavitasi sebesar 6379 titik sehingga dapat disimpulkan kavitasi berkurang.

4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan titik kavitasi di sekitar *impeller* pompa sentrifugal yang sangat mirip dengan geometri *impeller* pompa asli. Untuk menghindari kavitasi dalam pompa,

cadangan tekanan dibandingkan dengan tekanan uap fluida yang diperlukan di zona hisap *impeller*. Hasil simulasi menggunakan *impeller* pompa dengan sudut inlet blade (β_1) = 21,69° dapat mendeteksi titik kavitasi 39157 dan kemudian dimodifikasi dengan (β_1) = 38,66° dan titik kavitasi 32778. *Impeller* dengan memodifikasi sudut masuk dalam penurunan 6379 poin yang menandakan terjadinya pengurangan fenomena kavitasi.

Daftar Rujukan

- [1] 'Energy Statistics Data Browser – Data Tools', IEA. Accessed: Mar. 31, 2024.
- [2] Sun, X., You, W., Xuan, X., Ji, L., Xu, X., Wang, G., ... Chen, S. "Effect of the cavitation generation unit structure on the performance of an advanced hydrodynamic cavitation reactor for process intensifications". *Chemical Engineering Journal*, 412, 128600. 2021.
- [3] Zupanc, M., Pandur, Ž., Perdihi, T. S., Stopar, D., Petkovšek, M., & Dular, M. "Effects of cavitation on different microorganisms: the current understanding of the mechanisms taking place behind the phenomenon. A review and proposals for further research. *Ultrasonics Sonochemistry*". 2019.
- [4] M. D. Arifin, D. Faturachman, F. Octaviani, and K. A. Sulaeman, "Analysis of the Effect of Changes in Pitch Ratio and Number of Blades on Cavitation on CPP," *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 5, no. 4, pp. 255–264, 2020, doi: 10.12962/j25481479.v5i4.8285.
- [5] Mohammad Danil, Arifin and Danny, Faturachman and Fanny, Octaviani and Karina, Adinda. "Analysis of the Effect of Changes in Pitch Ratio and Number of Blades on Cavitation on CPP". *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 5 (4). pp. 255-264. ISSN 2541-5972. 2020.
- [6] Q Deng, J Pei, W Wang, B Lin, C Zhang, J Zhao. "Energy loss and force variation caused by *impeller* trimming in a double suction centrifugal pump", *Entropy*. 2021. <https://doi.org/10.3390/e23091228>
- [7] Wencai Zhu, Zhirong Li, Ruqi Ding. "Effect of pitch ratio on the cavitation of controllable pitch propeller" *Ocean Engineering*. 2024.
- [8] Q Li, S Li, P Wu, B Huang, D Wu - Chinese Journal of Mechanical ..., "Investigation on reduction of pressure fluctuation for a double suction centrifugal pump". 2021.
- [9] X. Han, Y. Kang, D. Li, and W. Zhao, "Impeller optimized design of the centrifugal pump: A numerical and experimental investigation," *Energies*, vol. 11, no. 6, 2018, doi: 10.3390/en11061444.
- [10] XQ Jia, Y Zhang, H Lv, ZC Zhu - Physics of Fluids, "Study on external performance and internal flow characteristics in a centrifugal pump under different of cavitation". 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0133377>.
- [11] X Wang, Y Wang, H Liu, Y Xiao, L Jiang, M Li - International Journal of Heat ..., "A numerical investigation on energy characteristics of centrifugal pump for cavitation flow using entropy production theory". *Elsevier*. 2023. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123591.
- [12] Z E. B. Maxime Binama, Alex Muhiwa, "Cavitation effects in centrifugal pumps- A review," *Int. J. Eng. Res. Appl.*, vol. 6, no. 5, pp. 52–63, 2016.
- [13] Feng Hong, Hailin Tian, Xi Yuan, Shuchang Lin, Qintian Peng, Yan Shi, Lei Jin, Liqun Ye, Jimping Jia, Diwen Ying, Thomas Stephen Ramsey, Yingping Huang, "CFD-assisted modeling of the hydrodynamic cavitation reactors for wastewater treatment", 2022. doi.org: 10.1016/j.jenvman.2022.115982
- [14] P Lin, D Hu, JM Lu, S Wang - Advances in Mechanical, "CFD numerical simulation of sand-contained cavitation characteristics of axial-flow pump". 2021. doi.org/10.1177/1687814021103278.
- [15] F. and McDonald's, Fluid Mechanics, 8th edition.
- [16] Mali, C. R., Patwardhan, A. W., Pandey, G. K., Banerjee, I., & Vinod, V. "CFD study on the effect of various geometrical parameters of honeycomb type orifices on pressure drop and cavitation characteristics. *Nuclear Engineering and Design*", 370, 110880. 2020. doi:10.1016/j.nucengdes.2020.1108.
- [17] Y Huan, Y Liu, X Li, Z Zhu, J Qu, L Zhe, A Han. "Experimental and numerical investigations of cavitation evolution a high speed centrifugal pump". Volume-33, page 140-149, 2021.
- [18] I Kassanos, I Anagnostopoulos - Cavitation and Bubble Dynamics, "Cavitation in hydraulic turbines". 2021.