

Simulasi Numeris Pengaruh Variasi Ketebalan *Scaling* Pada Sudu Terhadap Unjuk Kerja Pompa Sentrifugal

K. Damanik* dan J. Waluyo

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.

Jl. Grafika No. 2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia

*E-mail: damanikkosmar@yahoo.com

Abstrak

Salah satu masalah di industri perminyakan yaitu pompa yang digunakan untuk mengirimkan fluida, mengalami penebalan akibat *scaling* pada sudu sehingga menyebabkan perubahan geometri sudu impeler pompa. Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan pengaruh variasi penebalan *scaling* pada sudu terhadap kinerja pompa sentrifugal. Simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) dilakukan menggunakan ANSYS Fluent. Variasi berupa penebalan *scaling* pada sudu cekung merata pada sudu menjadi 3 mm, 4 mm dan 5 mm, dan penebalan *scaling* cekung tidak merata bagian tengah dan ujung sudu. Hasil simulasi variasi *scaling* sudu cekung merata terlihat bahwa dengan meningkatnya ketebalan menjadi 3 mm, 4 mm dan 5 mm, terjadi penurunan *head* pompa. Pada penebalan *scaling* cekung tidak merata bagian tengah sudu terjadi penyempitan yang signifikan di laluan impeler yang menyebabkan banyak aliran sirkulasi di area setelah penebalan. Semakin bertambahnya penebalan *scaling* menyebabkan pengaliran fluida menjadi kurang efektif mengakibatkan terjadi kehilangan sebagian energi kinetik sehingga *head* menjadi lebih rendah.

Kata kunci : *computational fluid dynamics* (CFD), pompa sentrifugal, unjuk kerja, penebalan *scaling* sudu.

Abstract

One of the problems found in the petroleum industry is that the pumps used to deliver crude oil or inject produced water, experience thickening due to scale or scale mixed with wax adhering to the blades, causing a change in the geometry of the pump impeller blades. In this study, the effect of scaling thickness variation on the blades to centrifugal pump performance has been modelled. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were carried out using the ANSYS Fluent. The variations are scale thickening evenly distributed on the concave side of the blades to 3 mm, 4 mm, 5 mm, scale thickening with an uneven distributed in the middle and tip of the concave side of the blades. Simulation results show that with the increasing of the variation scaling thickness evenly distributed on the blades concave side to 3 mm, 4 mm, and 5 mm, the pump head is decreasing. On the scaling thickness unevenly distributed in the middle of the blades concave side, there are significant narrowing fluid passage in the impeller which causing bigger portion of swirling downstream of the thickening area. The increasing of the thickening of the scaling causes the fluid direction to be less effective, resulting in a loss of some of the kinetic energy so that the head becomes lower.

Keywords : computational fluid dynamics (CFD), centrifugal pump, performance, scaling thickness on blade.

1. PENDAHULUAN

Pada beberapa kasus di industri perminyakan, pompa yang digunakan untuk mentransfer minyak mentah ataupun menginjeksikan air terproduksi, mengalami penebalan akibat dari *scaling* maupun *scaling* yang tercampur dengan wax menempel pada sudu-sudu pompa, sehingga hal ini mempengaruhi kinerja pompa itu sendiri. Terjadinya penebalan *scaling* pada sudu pompa sentrifugal membuat perubahan geometri dari sudu dan semakin tinggi penebalan akan semakin menurunkan kinerjanya pompa. Ini terjadi karena ada peningkatan rugi gesekan (friction loss) dan adanya aliran sirkulasi (vortex) di sekitar sudu impeler pompa sehingga menurunkan kinerja pompa dan menaikkan kebutuhan daya input.

Beberapa eksperimen maupun simulasi tentang kinerja pompa sentrifugal telah dilakukan dengan memvariasikan variabel yang berbeda seperti sudut keluaran, bentuk impeler, *clearance*, sudut sudu, variasi laju alir.

Stickland dkk. (2000) melakukan studi eksperimental yang menganalisis medan tekanan fluktuatif yang ada di bagian volut pompa sentrifugal, untuk dapat mengkarakterisasi pengaruh interaksi bagian ujung sudu. Hasil

penelitian menunjukkan bahwa laju alir merupakan penyebab utama terjadinya fluktuasi tekanan di dalam volut. Selain itu, mengurangi celah pada ujung sudu impeler menghasilkan peningkatan amplitude tekanan.

Meakhail dkk. (2019) melakukan studi eksperimental dan numerik mengenai 2 impeler dengan jumlah sudu yang sama (7 sudu) dan casing sama tetapi diameter yang berbeda (impeler A dengan diameter outlet 70 mm dan impeler B dengan diameter 105 mm). Model pompa memiliki kecepatan putaran desain 2800 rpm. Simulasi numerik dilakukan dengan menggunakan CFX-Tascflow. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa impeler A menghasilkan laju aliran yang lebih tinggi dibanding impeler B. Distribusi tekanan untuk impeler A lebih seragam pada bagian volute. Hasil eksperimental menyajikan pada kurva kinerja pompa ditemukan bahwa head pompa B lebih tinggi dari head pompa A.

Jin dkk. (2015) melakukan studi mengenai pengaruh ketebalan sudu-sudu pada kinerja pompa sentrifugal kecepatan rendah tertentu. Hasil penelitian Jin menegaskan bahwa ketebalan sudu impeler outlet meningkat akan mengubah kondisi tenggorokan outlet, yang juga memiliki imbas langsung pada efektivitas sudut alir pada keluaran impeler, yang selanjutnya mempengaruhi karakter eksternal pompa sentrifugal.

Pengaruh sudut keluar sudu-sudu pada kinerja pompa sentrifugal dengan kecepatan spesifik tinggi diteliti oleh Ding dkk. (2019) dengan menggunakan metode komputasi. Lima model impeler dengan sudut outlet sudu yang berbeda (23° , 25° , 27° , 29° dan 31°) dibangun dalam Solidworks dan CFTurbo dengan parameter impeler lainnya tidak berubah, dan simulasi numerik pompa berkecepatan tinggi dilakukan dalam kode komersial ANSYS-CFX. Lalu eksperimen dilakukan untuk menguji kinerja hidrolis pompa sentrifugal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tren perubahan simulasi numerik dan eksperimen adalah sama, dan ketika laju alir meningkat bertahap, hydraulic loss dari impeler menjadi lebih besar dengan peningkatan sudut keluaran sudu-sudu, dan sudut keluaran sudu-sudu memiliki pengaruh yang jelas pada pompa sentrifugal pada laju alir tinggi.

Elyamin dkk. (2019) telah melakukan investigasi numerik pengaruh jumlah sudu impeler terhadap kinerja pompa sentrifugal. Tiga impeler berbeda dengan 5, 7, dan 9 sudu diuji secara numerik untuk menentukan jumlah sudu optimal pada kecepatan rotasi tetap 2800 rpm. Fluent 6.3.1 CFD digunakan untuk melakukan pekerjaan ini. Ditemukan bahwa koefisien head ' Ψ_{yt} ' dan efisiensi ' η_{hyd} ' lebih tinggi untuk impeller case dengan 7 sudu daripada 5 dan 9 sudu. Kerugian berkurang dengan meningkatkan jumlah sudu karena pengurangan aliran sekunder untuk batas tertentu. Kemudian akan meningkat kembali karena kerugian gesekan pada baling-baling dan kerugian pencampuran setelah baling-baling menghasilkan kenaikan dalam total kerugian di wilayah diffuser hilang.

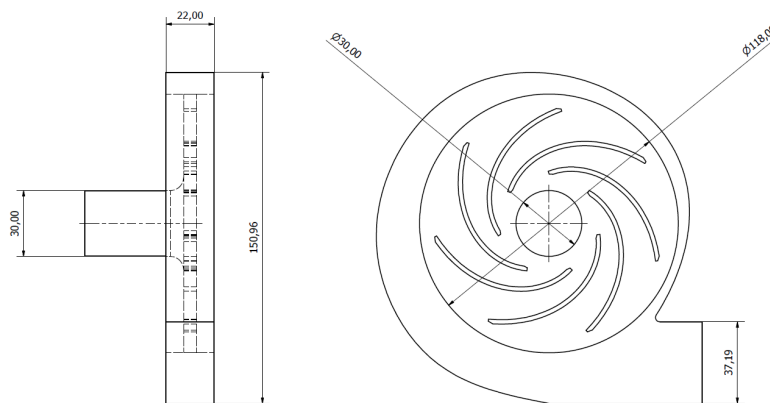
Pada penelitian ini dilakukan pemodelan dan simulasi *computational fluid dynamic* (CFD) penebalan *scaling* pada sudu-sudu impeler terhadap kinerja pompa sentrifugal. Variasi yang dilakukan adalah penebalan berbentuk cekung merata sepanjang sudu dengan ketebalan total 3 mm, 4 mm, 5 mm, dan penebalan di bagian cekung sudu tidak merata di bagian tengah dan ujung. Bentuk penebalan *scaling* dilakukan mengikuti bentuk sudu untuk memudahkan proses pemodelan dan simulasi karakterisasi pompa sentrifugal. Fluida kerja yang digunakan dalam simulasi adalah air (water-liquid).

2. METODE PENELITIAN

Simulasi CFD dilakukan untuk memudahkan karakterisasi pompa sentrifugal dengan variasi sudu-sudu terhadap laju alir fluida. Domain fluida merupakan volume kontrol yang menjadi daerah pengamatan simulasi. Langkah awal dalam proses simulasi adalah pembuatan bentuk geometri model 3D domain fluida yang disimulasikan dengan variasi ketebalan pada sudu bentuk cekung merata dan tidak merata. Spesifikasi pompa yang dijadikan acuan disadur dari dimensi investigasi numeris yang dilakukan oleh Elyamin (2019) seperti tersaji pada Tabel 1 dan Gambar 1. Proses desain domain fluida menggunakan software Design Modeller (DM) yang terintegrasi di dalam ANSYS software package. Volut dari pompa sentrifugal yang disimulasikan memiliki bentuk persegi panjang dengan lebar tetap 22 mm dan terdiri dari 4 segmen circular dengan radius berbeda masing-masing: RI = 66,28 mm, RII = 66,28 mm, RIII = 78,19 mm, RIV = 84,01 mm.

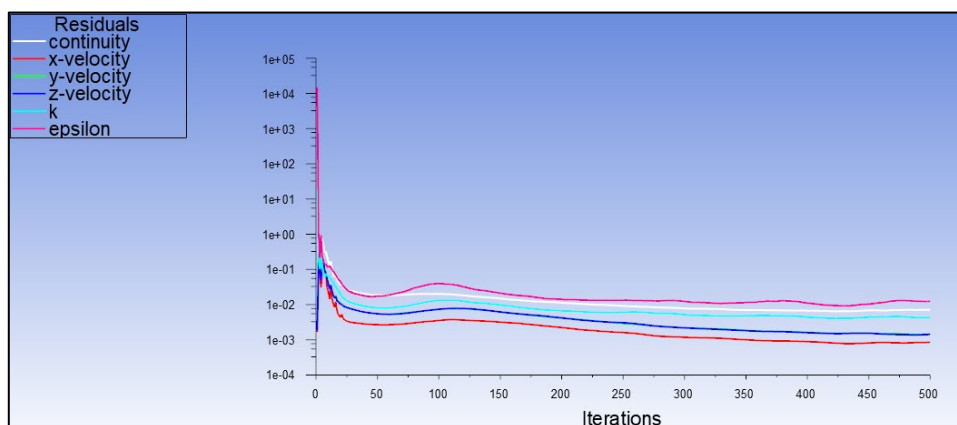
Tabel 1. Spesifikasi impeler pompa sentrifugal

Nama Bagian	Nilai
Number of blades (Z)	7
Inlet diameter (D1)	45 mm
Outlet diameter (D2)	105 mm
Inlet blade width (b1)	6 mm
Outlet blade width (b2)	6 mm
Inlet blade angle (β_1)	22°
Outlet blade angle (β_2)	26°



Gambar 1. Dimensi utama pompa sentrifugal

Hasil *mesh independency test* pada kapasitas alir tetap 3,731 m³/jam menunjukkan bahwa dengan penambahan jumlah elemen yang lebih banyak dari 700.000 tidak lagi mempengaruhi hasil simulasi, sehingga jumlah ini dipilih untuk simulasi variasi. Kualitas mesh ditunjukkan dengan hasil skewness 0,19485 berada pada rentang excellent dan orthogonal quality 0,82073 pada rentang very good. Kedua parameter ini menandakan bahwa model 3D domain fluida yang digunakan untuk simulasi sudah cukup baik.



Gambar 2. Plot residu iterasi simulasi

Pada ANSYS Fluent dilakukan pengaturan model fisis, kondisi batas dan metode yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan atur dalam aliran fluida seperti yang dijelaskan oleh Versteeg dan Malalasekera (2007), yaitu:

- a. Persamaan Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \tag{1}$$

- b. Persamaan Momentum

Momentum pada sumbu X:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \tag{2}$$

Momentum pada sumbu Y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \tag{3}$$

Momentum pada sumbu Z:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \tag{4}$$

dengan:

- | | |
|--|--|
| x : koordinat sumbu X | w : komponen kecepatan ke arah sumbu Z |
| y : koordinat sumbu Y | μ : viskositas fluida |
| z : koordinat sumbu Z | t : waktu |
| \mathbf{u} : vektor kecepatan | ρ : densitas |
| u : komponen kecepatan ke arah sumbu X | P : tekanan |
| v : komponen kecepatan ke arah sumbu Y | |

Pada General Set-up ditetapkan Formasi kecepatan absolut, kondisi aliran *steady*, dan percepatan gravitasi $-9,81 \text{ m/s}^2$. Model fisis digunakan untuk memodelkan turbulensi dan aliran di dekat dinding. Pada simulasi ini, model k-epsilon RNG dipilih karena mempunyai besaran tambahan pada laju disipasi, epsilon, dan dapat meningkatkan akurasi untuk aliran yang terhalang secara tiba-tiba. Fluida yang digunakan adalah water-liquid dengan densitas $998,2 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas $0,001003 \text{ kg/m.s}$. Untuk mengakomodasi bagian pompa sentrifugal yang diam dan yang bergerak, model 3D fluida yang disimulasikan dibagi menjadi 3 bagian utama, yaitu bagian inlet, bagian rotasi dan bagian stasioner. Bagian inlet adalah fluida yang masuk dari flens hisap ke mata impeler. Bagian rotasi mencakup bagian fluida yang ikut berputar bersama impeler dan bagian stasioner merupakan fluida yang keluar impeler hingga flens buang. Kondisi batas (boundary conditions) pada penelitian ini antara lain permukaan impeler dan volut merupakan dinding sehingga tidak ada fluks aliran fluida menembus kondisi batas tersebut. Pada inlet jenis kondisi batas mass flow-inlet dengan arah aliran tegak lurus terhadap permukaan Pada blade, hub, shroud jenis kondisi batas dinding (wall) dengan jenis dinding bergerak (moving wall). Pada outlet ditetapkan jenis kondisi batas pressure-outlet, intensitas turbulensi 5%, dan skala panjang 0,005. Parameter output yang dibutuhkan adalah tekanan rata-rata pada sisi buang (P-out), tekanan rata-rata pada sisi isap (P-in), head momen yang di suplai oleh putaran sudu (torsi). Parameter head merupakan hasil yang didapatkan dari persamaan berikut:

$$head = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho \times g} \quad (5)$$

$$head = \frac{P_{out} - P_{in}}{992 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2} \quad (6)$$

Parameter torsi akan digunakan dalam perhitungan efisiensi hidraulik yang dirumuskan di persamaan berikut, dimana m merupakan laju alir massa dalam kg/s :

$$\eta_{hyd} = \frac{m \times g \times head}{2\pi \times \frac{n}{60} \times torsi} \quad (7)$$

$$\eta_{hyd} = \frac{m \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times head}{2\pi \times \frac{2800 \text{ rpm}}{60} \times torsi} \quad (8)$$

Selama proses iterasi berlangsung, akan muncul grafik residual yang menunjukkan proses konvergensi hasil simulasi. Semakin banyak jumlah iterasi, akan semakin akurat hasil yang diperoleh, namun akan membutuhkan waktu yang lebih lama. Tampilan iterasi simulasi ditunjukkan pada Gambar 2.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Validasi simulasi dilakukan dengan cara membandingkan nilai dari simulasi numerik yang dilakukan terhadap nilai yang dikonversi dari kurva koefisien head - flow pada jurnal penelitian rujukan, yaitu "Effect of Impeller Blades Number on the Performance of a Centrifugal Pump" (Elyamin dkk., 2019) berdasarkan hasil eksperimen dari jurnal "An Experimental Study on The Unsteady Pressure Distribution Around The Impeller Outlet of a Centrifugal Pump" (Stickland dkk., 2000). Adapun parameter yang dibandingkan adalah nilai tinggi tekan (head) pada kapasitas alir yang sama. Pada Tabel 1 disajikan data hasil perbandingan antara simulasi numerik pompa sentrifugal dan jurnal penelitian acuan.

Tabel 2. Perbandingan hasil simulasi numeris dengan jurnal penelitian acuan

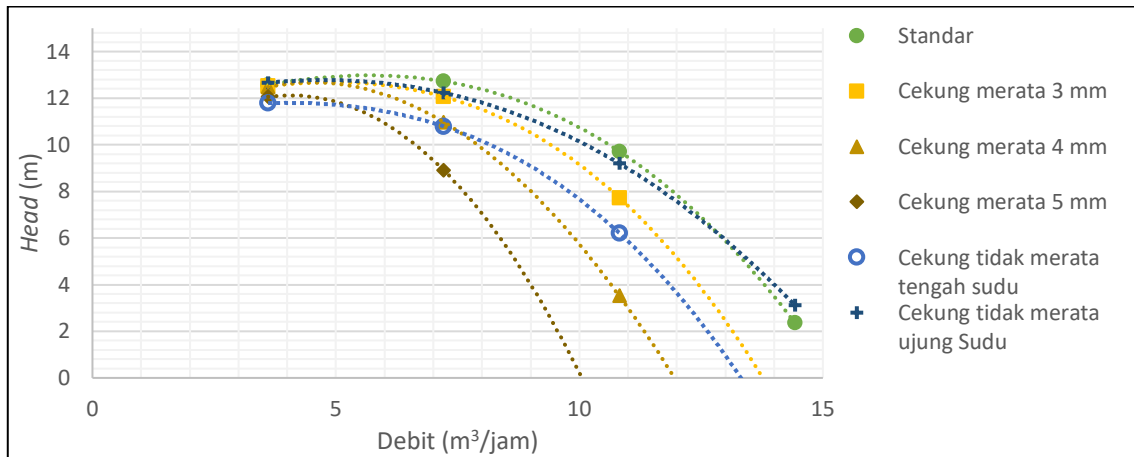
Debit (m^3/jam)	Head (m)		Error (%)
	Simulasi	Jurnal	
1,387	13,734	13,286	3,37
2,406	13,083	12,682	3,16
3,731	12,317	12,078	1,98

Pada Tabel 1 terlihat dari perbandingan hasil antara simulasi dengan jurnal diperoleh nilai error di bawah 10% sehingga metode simulasi yang digunakan dapat diterima sebagai metode yang valid.

Simulasi dilakukan dengan variasi debit dari 3,61 sampai 14,43 m^3/jam dengan interval 3,61 pada putaran tetap 2800 rpm.

3.1. Perbandingan Kurva H-Q

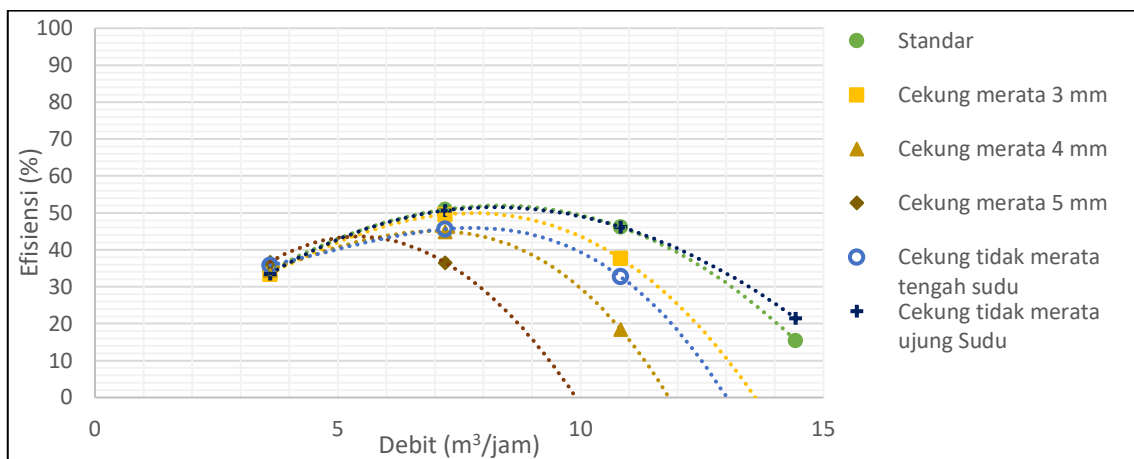
Hasil simulasi perbandingan head dari berbagai variasi diplotkan pada Gambar 3. Head mengalami penurunan secara bertahap sesuai dengan meningkatnya penebalan *scaling* cekung merata maupun tidak merata. Adanya penambahan ketebalan *scaling* pada sudu mengakibatkan pengaliran fluida menjadi kurang efektif sehingga dalam laluan impeler muncul aliran sirkulasi, seperti terlihat pada Gambar 6. Partikel fluida yang ikut berputar di aliran sirkulasi akan kehilangan sebagian energi kinetik sehingga menyebabkan *head* yang lebih rendah.



Gambar 3. Perbandingan kurva H-Q pada variasi ketebalan *scaling* sudu cekung merata dan cekung tidak merata.

3.2. Perbandingan Kurva Efisiensi

Hasil simulasi perbandingan efisiensi dari berbagai variasi diplotkan pada Gambar 4. Pada perbandingan efisiensi standar dengan variasi terjadi penurunan efisiensi secara bertahap seiring dengan penebalan *scaling* pada sudu. Sejalan dengan kecenderungan yang terjadi pada kurva H-Q, dimana akibat terjadinya penebalan *scaling* pada sudu, terjadi peningkatan rugi-rugi hidraulik yaitu peningkatan gesekan fluida di dalam laluan impeler sehingga terjadi penurunan efisiensi.



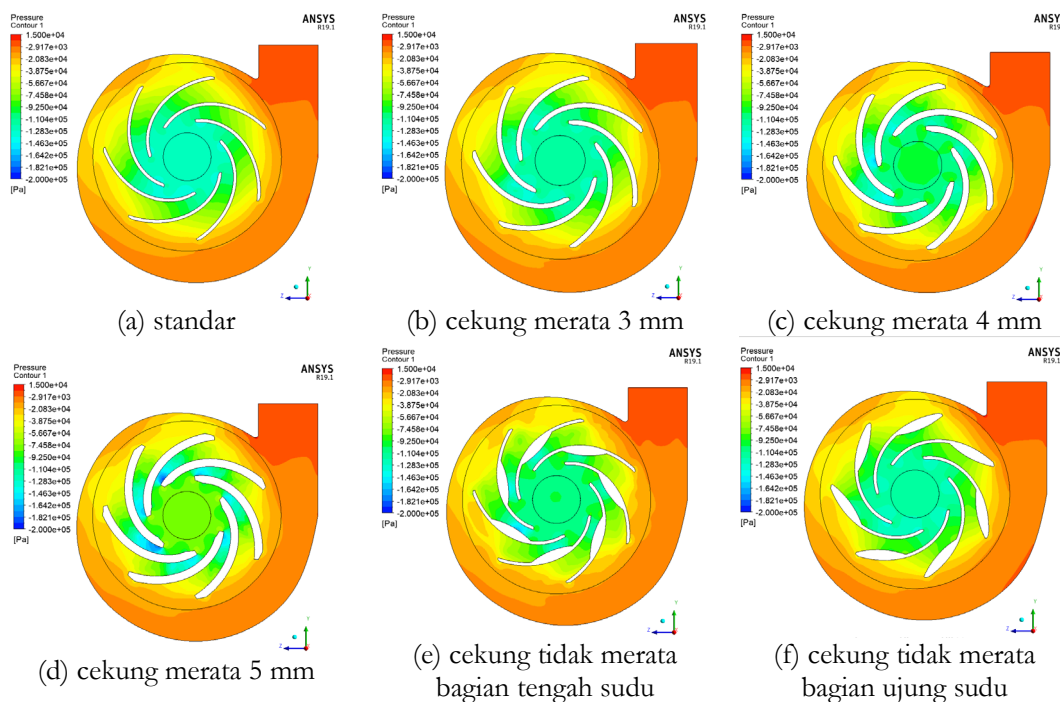
Gambar 4. Perbandingan kurva efisiensi terhadap variasi ketebalan *scaling* sudu cekung merata dan tidak merata.

3.3. Perbandingan Visual Hasil Simulasi Standar dengan Variasi Ketebalan *Scaling* Sudu

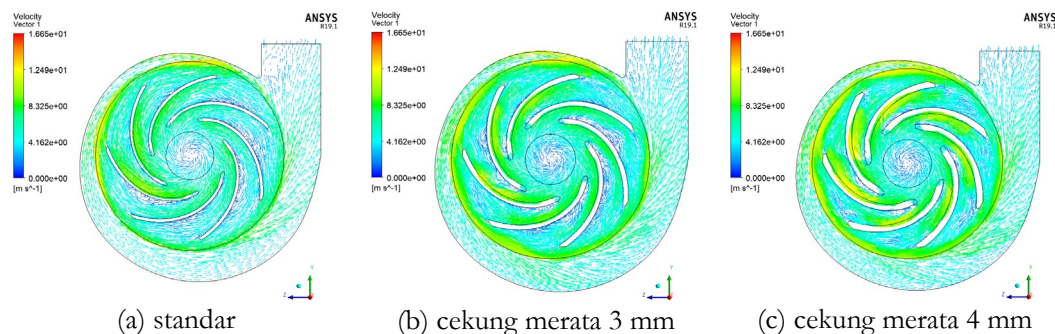
Gambar 5 menunjukkan distribusi tekanan yang berbeda pada masing-masing variasi penebalan *scaling* pada sudu. Gambar 5(a) yang merupakan hasil simulasi standar menunjukkan tekanan yang teratur dan seragam pada laluan impeler dan meningkat secara teratur menuju ke volut. Distribusi tekanan hasil simulasi variasi cekung merata pada Gambar 5(b), (c) dan (d) menunjukkan semakin tebal sudu yang divariasikan, semakin terlihat peningkatan distribusi tekanan di bagian inlet dan pangkal sudu-sudu dan sebaliknya terjadi penurunan distribusi tekanan pada bagian outlet volut. Pada Gambar 5(f), distribusi tekanan tidak banyak berbeda dibandingkan dengan standar, dimana tidak terlihat ada lonjakan tekanan di sekitar ujung sudu. Sementara itu pada Gambar 5(e) terlihat adanya peningkatan distribusi tekanan di sekitar laluan impeler tetapi ada ketidakseragaman peningkatan tekanan di bagian setelah penambahan ketebalan *scaling* sudu cekung tidak merata bagian tengah, dimana pada sebagian sudu tidak terjadi peningkatan tekanan seiring dengan arah aliran fluida. Hal ini karena terhalang oleh ketebalan

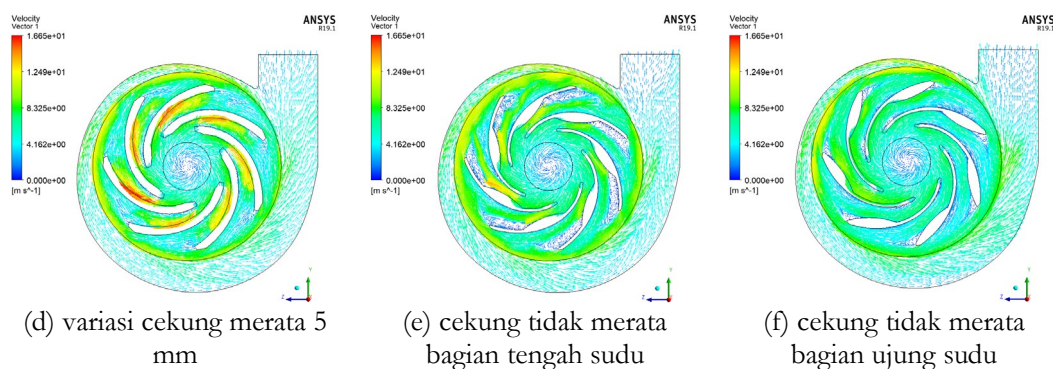
scaling sudu cekung tidak merata bagian tengah tersebut. Distribusi tekanan yang tidak merata menyebabkan tekanan outlet pompa semakin menurun seiring dengan peningkatan ketebalan *scaling* sudu, baik yang merata maupun tidak merata, sehingga terjadi penurunan *head* pompa.

Representasi visual perbandingan distribusi kecepatan aliran fluida pada kelima model variasi ketebalan *scaling* sudu impeller dengan debit aliran 7,21 m³/jam (2 kg/s) disajikan pada Gambar 6. Distribusi kecepatan pada hasil simulasi standar Gambar 6(a) menunjukkan aliran yang cukup teratur dan seragam pada laluan impeller hingga ke volut dimana hampir tidak terlihat adanya sirkulasi aliran yang kentara. Distribusi kecepatan hasil simulasi variasi cekung merata pada Gambar 6(b), (c) dan (d) menunjukkan kecenderungan aliran yang membentuk aliran sirkulasi pada laluan impeller yang semakin meningkat seiring peningkatan ketebalan *scaling* pada sudu. Pada Gambar 6(f), terlihat aliran sirkulasi pada masing-masing bagian ujung sudu. Sementara pada Gambar 6(e), terlihat aliran sirkulasi yang cukup banyak di area setelah penebalan *scaling* cekung tidak merata tengah. Aliran sirkulasi ini membentuk pusaran dan partikel fluida yang ikut berputar akan kehilangan sebagian energi kinetiknya. Pengaruh akhirnya adalah fluida yang keluar dari impeller memiliki kecepatan energi kinetik lebih rendah dari nilai ideal dan dengan demikian menyebabkan *head* yang lebih rendah pula.



Gambar 5. Distribusi tekanan pada berbagai variasi penebalan *scaling* sudu





Gambar 6. Distribusi kecepatan pada berbagai variasi penebalan *scaling* sudu.

4. KESIMPULAN

Pemodelan dilakukan melalui proses validasi dengan membuat model dimensi domain sama dengan literatur rujukan. Perbandingan head dari model simulasi (disebutkan sebagai model standar) dengan literatur rujukan menunjukkan deviasi rata-rata pada 3,5%.

Hasil pengamatan variasi ketebalan *scaling* pada sudu dengan variasi debit aliran dari 3,62 m³/jam sampai 14,43 m³/jam dan kecepatan putaran tetap 2800 rpm pada ketebalan *scaling* pada sudu bentuk cekung merata terlihat bahwa penebalan 3 mm paling mendekati kinerja model standar. Seiring dengan meningkatnya penebalan menjadi 4 mm dan 5 mm, terjadi penurunan head pompa. Hal ini karena semakin bertambahnya penebalan *scaling* mengakibatkan pengarahannya fluida menjadi kurang efektif sehingga terjadi kehilangan sebagian energi kinetik. Pengaruh akhirnya adalah fluida yang keluar dari impeller memiliki kecepatan energi kinetik lebih rendah dari nilai ideal dan dengan demikian menyebabkan head yang lebih rendah. Pada penebalan *scaling* bentuk cekung tidak merata pada sudu terlihat bahwa penebalan *scaling* bentuk cekung tidak merata pada bagian ujung sudu paling mendekati kinerja model standar. Hal ini karena laluan impeller dibagian ujung tidak banyak mempengaruhi pengarahannya fluida meskipun terjadi beberapa aliran sirkulasi diujung sudu. Sementara itu penebalan *scaling* bentuk cekung tidak merata pada bagian tengah sudu terjadi penyempitan yang signifikan pada bagian laluan impeller yang menyebabkan peningkatan gesekan dan kurang efektifnya pengarahannya fluida sehingga terjadi kehilangan sebagian energi kinetik. Pengaruh akhir adalah fluida yang keluar dari impeller memiliki kecepatan energi kinetik lebih rendah dari nilai ideal dan dengan demikian menyebabkan head yang lebih rendah.

5. DAFTAR PUSTAKA

- A.H. Church, 1986. *Pompa dan Blower Sentrifugal*, Jakarta: Penerbit Erlangga
- H. Ding, Z. Li, X. Gong, M. Li, 2019, The influence of blade outlet angle on the performance of centrifugal pump with high specific speed, *Vacuum*, Vol. 159, pp. 239-246.
- G.R.H.A. Elyamin, M.A. Bassily, K.Y. Khalil, M.S. Gomaa, 2019, Effect of impeller blades number on the performance of a centrifugal pump, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 58, pp. 39-48.
- Y. Jin, W. Song, J. Fu, 2015, A study on the effect of blade thickness on the performance of low specific speed centrifugal pump, *Advanced Material Research*, Vol. 1070-1072, pp. 1957-1962.
- T.A. Meakhail, M. Salem, I. Shafie, 2014, Steady and unsteady flow inside a centrifugal pump for two different impellers, Science Publishing Group.
- T. Shigemitsu, J. Fukutomi, K. Kaji, 2011, Influence of Blade Outlet Angle and Blade Thickness on Performance and Internal Flow Conditions of Mini Centrifugal Pump, *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, Vol. 4, No. 3.
- K.M. Srinivasan, 2008, *Rotodynamic Pumps (Centrifugal and Axial)*, New Delhi: New Age International (P) Limited Publishers.
- M.T. Stickland, T.J. Scanlon, J. Parrondo, J. Gonzalez-Perez, J. Fernandez-Francos, 2000, An Experimental Study on The Unsteady Pressure Distribution Around The Impeller Outlet of a Centrifugal Pump, *Proceedings of ASME FEDSM'00 ASME 2000 Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Boston, Massachusetts.
- H.K. Versteeg, W. Malalasekera, 2007, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. 2nd ed. Glasgow: Pearson Education Ltd.