

Simulasi distribusi *shear stress* pada dasar tangki sistem pengadukan berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD)

Bayu Triwibowo¹, Megawati², Dessy Ratna Puspita³, dan Dwiana Asmara Putri⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang
bayu.k46@gmail.com

Abstrak : Proses pengadukan dengan menggunakan tangki berpengaduk (*mechanically stirred vessel*) telah banyak digunakan pada berbagai macam proses di industri kimia. Tujuan dari proses pengadukan ini bermacam-macam, mulai dari pencampuran material yang berbeda atau membuat suspensi solid sampai pada optimasi proses transfer massa dan energi. Proses pengadukan pada sistem padat-cair dapat memicu erosi pada apparatus tangki berpengaduk. Mesin dan peralatan yang beroperasi dengan sistem aliran padat cair dapat rusak karena erosi yang memicu rendahnya efisiensi operasi dan berkurangnya masa pakai alat dengan biaya pemeliharaan yang tinggi. Untuk sistem multifase dimana teknologi eksperimen secara visualisasi memiliki beberapa batasan, metode CFD memberikan beberapa keuntungan untuk menganalisis fenomena MI secara lebih komprehensif. Penelitian CFD banyak berkonsentrasi pada pendekatan berbasis LES dan SM untuk memodelkan variasi pola alir berfrekuensi rendah yang lebih baik dibandingkan eksperimen karena juga mampu menampilkan seluruh vektor kecepatan pada jangka waktu tertentu. Lebih jauh lagi, variabel lokal seperti kecepatan dan konsentrasi solid dapat ditampilkan visualisasinya per *time step*.

Kata Kunci: tangki berpengaduk, CFD, LES, kecepatan, multifase

1. Pendahuluan

Proses pengadukan dengan menggunakan tangki berpengaduk (*mechanically stirred vessel*) telah banyak digunakan pada berbagai macam proses di industri kimia. Tujuan dari proses pengadukan ini bermacam-macam, mulai dari pencampuran material yang berbeda atau membuat suspensi solid sampai pada optimasi proses transfer massa dan energi (Garcia, dkk, 2017). Proses pengadukan pada sistem padat-cair dapat memicu erosi pada apparatus tangki berpengaduk.

Mesin dan peralatan yang beroperasi dengan sistem aliran padat cair dapat rusak karena erosi yang memicu rendahnya efisiensi operasi dan berkurangnya masa pakai alat dengan biaya pemeliharaan yang tinggi. Untuk mengurangi erosi pada material, beberapa pendekatan yang sering dipertimbangkan adalah :

- 1) teknologi manufaktur,
- 2) Seleksi dari tipe dan parameter alat,
- 3) kontrol operasi,

- 4) desain tahan erosi,
- 5) material, dan
- 6) prediksi dari laju dan lokasi erosi. (Azimian dan Bart, 2013)

Hydro-erosion dapat terjadi melalui dua mekanisme. Mekanisme tersebut adalah erosi karena kavitasi cairan dan karena partikel padat yang terkandung dalam cairan yang disebut erosi slurry (Azimian dan Bart, 2013). Erosi pada permukaan material oleh tumbukan partikel padat merupakan masalah yang besar pada berbagai macam peralatan industri yang melibatkan aliran multifase. Hal tersebut dikarenakan distribusi yang laju erosi tidak merata pada permukaan material. Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan suatu rekayasa yang mengakibatkan distribusi laju erosi dapat lebih merata. Distribusi merata dapat dicapai apabila karakteristik dari laju erosi untuk tiap modifikasi geometri tangki berpengaduk telah diketahui sebagai dasar dalam melakukan rekayasa teknologi (Graham, dkk, 2009).

Uji erosi material pada *pilot plant* merupakan cara yang memakan waktu dan mahal, oleh karena itu diperlukan suatu metode alternatif untuk memprediksi laju erosi pada alat yang beroperasi dengan sistem padat cair.

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan salah satu instrumen yang dapat dipakai untuk mendapatkan karakteristik dari distribusi shear stress pada dinding tangki sehingga dapat memprediksi laju erosi. Weetman (1998) menggunakan simulasi CFD untuk mendesain ulang bilah pengaduk aksial pada aerofoil yang berdampak pada modifikasi distribusi kecepatan yang secara signifikan mampu mengurangi laju erosi. Beberapa data mengenai laju erosi dapat ditemui dalam Chen, dkk (2006) yang menginvestigasi erosi pada pipa elbow menggunakan *profiler* dan model *paint erosion* (Parslow dkk, 1999). Data laju erosi yang dihasilkan memiliki batasan hanya pada geometri yang sederhana yang sulit untuk merefleksikan geometri kompleks seperti di industri. Sharma, dkk (2003) menginvestigasi bahwa pengadukan dengan model *pumping down* akan menghasilkan distribusi yang lebih merata pada sistem pengadukan padat-cair dibandingkan *pumping up*. Biswas, dkk (1999) mengobservasi bahwa penggunaan pengaduk *pitched blade turbine* (PBT) akan menghasilkan suspensi padatan yang lebih baik pada kecepatan putar rendah dibandingkan dengan pengaduk tipe *butterfly*.

Pada penelitian ini, akan digunakan metode CFD untuk memprediksi laju distribusi *shear stress* pada dinding tangki pengaduk menggunakan 4-*blades* 45° PBT pada variasi kecepatan pengadukan. Hal ini diperlukan untuk memprediksi bagian pada tangki berpengaduk yang memiliki peluang terbesar untuk mengalami erosi sehingga langkah-langkah preventif dapat dilakukan oleh industri.

2. Dasar Teori

2.1. Tinjauan Proses Pengadukan dengan CFD

Tangki berpengaduk secara luas digunakan untuk proses pengadukan dua fluida saling bercampur (*miscible*), proses pengadukan padat-cair, industri makanan, dan berbagai proses industri lain. Pada dasarnya, pada proses pencampuran pada tangki pegaduk, setiap jenis *impeller* yang diposisikan sentral terhadap tangki akan memproduksi pergerakan fluida dengan dua vorteks diantara sepasang pisau *impeller*, satu di bawah dan satu di atas hub. Fluida yang mengalami efek dari *eddy* sebagai akibat dari *shear stress* yang besar akan mengalami penurunan lokal pada properti seperti konsentrasi tracer. Pergerakan acak dari fluida mengakibatkan resirkulasi kompleks dari aliran turbulen pada tangki dimana *baffle* berinteraksi dengan aliran yang akan meningkatkan proses pengadukan (Zadghaffari, dkk, 2008).

Pada desain tangki berpengaduk, informasi yang detail mengenai fenomena aliran merupakan sesuatu yang sangat penting. CFD sering digunakan untuk mendapatkan informasi tersebut. Untuk memvalidasi hasil CFD, diperlukan hasil pengukuran kuantitatif.

Ameur (2015) memodelkan pengadukan dengan menggunakan *six curved blade impeller* pada tiga jenis tangki yang berbeda dasarnya. Tangki yang dipakai adalah tangki *flat bottomed cylindrical vessel*, *dish bottomed cylindrical vessel*, dan *spherical vessel*. Untuk setiap bentuk tangki, pengadukan yang dihasilkan oleh *impeller* tersebut memiliki pola alir radial dengan bentuk *loop* dua sirkulasi. Pengamatan yang dilakukan adalah variasi bilangan Reynolds dan dampaknya terhadap *cavern size* dan pola alir. Tangki jenis *spherical* menghasilkan pengadukan yang lebih seragam dengan konsumsi energi yang lebih kecil. Pengaruh dari *clearance* juga dipelajari dengan konfigurasi *impeller* berada di tengah tangki sebagai desain optimum.

Bakker (2013) melakukan pemodelan turbulen untuk tangki berpengaduk menggunakan aplikasi metode LES (*Large Eddy Simulation*). Prediksi dengan metode LES menghasilkan hasil yang memuaskan jika dibandingkan dengan data yang dihasilkan secara eksperimen menggunakan *digital particle image velocimetry*. Hasil dari penelitian ini membuka interpretasi baru mengenai fenomena hidrodinamis yang sebelumnya sulit untuk ditangkap dan dijelaskan.

Skocilas (2013) melakukan simulasi CFD untuk menyelidiki pola alir dengan sistem *impeller pitch blade turbine* (PBT) yang mengalami pengikisan material. Hasil simulasi menunjukkan korelasi yang baik dengan data eksperimen menggunakan metode *Multiple References Frame* (MRF). Secara garis besar disimpulkan bahwa terjadinya perubahan geometri (karena pengikisan material) memberikan efek negatif pada pola alir di sistem pengadukan.

Oshinowo dan Bakker (2002) melakukan pemodelan CFD untuk sistem dengan suspensi padatan pada tangki berpengaduk. Pemodelan CFD dilakukan menggunakan model *eulerian granular muliphase* untuk menyelidiki *just suspended impeller speed* (Njs) dan distribusi padatan. Parameter tersebut sangat penting sebagai acuan efisiensi dari operasi hidrometalurgi dan proses lain yang melibatkan suspensi padat-cair. Konsentrasi padatan yang digunakan adalah 0,5 – 50 % volume. Metode CFD menunjukkan hasil yang baik setelah divalidasi dengan data eksperimen.

Matsuda dkk (2004) menginvestigasi efek dari *off bottom clearance* terhadap fenomena makroinstabilitas menggunakan pengaduk turbin Rushton pada tangki yang dilengkapi 4 baffle. Frekuensi dari makroinstabilitas dipengaruhi oleh *off bottom clearance*. Armenante dan Nagamine (1998) menyatakan bahwa meskipun Njs telah banyak diteliti namun efek dari *off bottom clearance* belum banyak diteliti utamanya jika *impeller* terletak sangat dekat dengan dinding bawah tangki. Desain tangki dengan *clearance* < 0,1 dapat ditemukan

diberbagai proses industri. Secara umum *impeller* yang menghasilkan pola alir kombinasi dan aksial lebih efisien dibandingkan dengan *impeller* radial bila rezim pengadukan terletak sangat dekat dengan dinding bawah tangki.

Fort dkk (2009) mempelajari mengenai efek dari gaya aksial terhadap tangki silinder berdasar datar yang diaduk dengan menggunakan *pitched blade turbine* (PBT). Pengukuran dilakukan dengan menggunakan alat pengukur tekanan yang diletakkan pada beberapa bagian di dasar tangki. Tekanan dinamis sangat dipengaruhi oleh *off bottom clearance* namun independen terhadap kecepatan *impeller*.

2.2. Permodelan dan Simulasi Tangki Pengaduk dengan CFD

Fenomena aliran fluida dapat dimodelkan dengan persamaan matematis yaitu persamaan kontinuitas dan momentum. Persamaan kontinuitas untuk suatu fluida *compressible* pada aliran *unsteady* dapat ditulis :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Untuk aliran *incompressible*, nilai densitas adalah konstan :

$$\nabla(\rho v) = 0 \quad (2)$$

Persamaan 1 menjadi :

$$\frac{\partial(V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(V_z)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

Hukum kedua Newton menyatakan bahwa laju perubahan momentum sama dengan jumlah gaya-gaya yang bekerja. Persamaan momentum ke arah x,y,z dimana fluida newtonian dan viskositas konstan dapat ditulis dalam persamaan navier-stokes :

Komponen x

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] + \rho G_x \quad (4)$$

Komponen y

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] + \rho G_y \quad (5)$$

Komponen z

$$\rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right] + \rho G_z \quad (6)$$

Pada prinsipnya ada 2 pendekatan untuk pemodelan multifase yaitu Lagrangian dan Eulerian. Pendekatan lagrangian umumnya digunakan pada pemodelan multifase konsentrasi rendah sedangkan pendekatan eulerian dapat digunakan untuk daerah konsentrasi dan komposisi yang lebih luas. Pendekatan eulerian sangat kompleks sehingga diperlukan penyederhanaan seperti *mixture model* yang tersedia dalam Fluent dan dikombinasikan dengan pemodelan gerakan *impeller sliding mesh*.

Mixture model mengasumsikan tidak ada *interface* antara 2 fase yang *immiscible* dan memungkinkan kedua fase untuk saling mempengaruhi. Model ini juga memungkinkan kedua fase untuk bergerak dengan kecepatan yang berbeda.

Persamaan kontinuitas untuk *mixture* adalah :

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m) = 0 \quad (7)$$

Dimana v_m adalah laju alir massa rata-rata :

$$\bar{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \bar{v}_k}{\rho_m} \quad (8)$$

dan ρ_m adalah densitas *mixture* :

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (9)$$

Persamaan momentum untuk *mixture* dapat diperoleh dengan menjumlahkan persamaan momentum masing-masing fase. Persamaan momentum *mixture* dapat dinyatakan dengan :

$$\frac{\partial(\rho \bar{v}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{v}_m + \nabla \bar{v}_m^T)]_n + \rho_m \bar{G} + \bar{F} + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \overline{v_{dr,k} v_{dr,k}}) \quad (10)$$

Dimana n adalah jumlah fase dan μ_m adalah viskositas campuran

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (11)$$

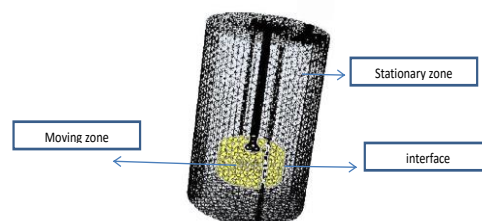
LES merupakan metode komputasi dimana pusaran besar dihitung dan pusaran kecil dimodelkan dengan *subgrid*

scale (SGS). Yang perlu digarisbawahi adalah bahwa pusaran besar secara langsung dipengaruhi oleh kondisi batas yang mempengaruhi oleh Reynolds stress. Turbulensi atau pusaran kecil kurang memberikan kontribusi terhadap Reynolds stress.

Karena LES memodelkan *eddy* yang kecil dimana *finite-difference cell* yang terkecil lebih besar dari Kolmogorov *length*, dan dapat mencapai *timestep* yang lebih besar dibandingkan DNS maka *computational cost* akan lebih mahal dibanding DNS. Dasar dari pemodelan ini adalah aliran rata-rata dan pengaruh pusaran dihitung dengan persamaan *filtered* navier-stokes sedangkan pusaran kecil dimodelkan, LES dapat disingkat sebagai berikut :

- 1) Transfer massa dan momentum ditransfer oleh pusaran besar
- 2) Pusaran besar dipengaruhi oleh geometri dan kondisi batas
- 3) Pusaran kecil tidak dipengaruhi oleh geometri

Pendekatan LES lebih general daripada pendekatan RANS dan dapat menghindari ketergantungan RANS terhadap pusaran skala besar. LES juga dapat digunakan untuk bilangan Reynolds yang lebih tinggi dibanding RANS dan DNS. Persamaan LES merupakan *filtering* dari persamaan navier-stokes. Pada simulasi berbasis CFD, *model sliding mesh* (SM) sering digunakan untuk memodelkan *rotating impeller* dibandingkan metode yang lain karena metode ini memungkinkan untuk memodelkan perputaran *impeller* secara realistis tanpa penambahan *semi-empirical source term* pada persamaan momentum. Domain dari SM dibagi menjadi dua, yaitu *inner rotating mesh* yang melingkupi *impeller* dan *outer stationary mesh* yang mengisi bagian selain *inner rotating mesh* pada tangki. *Interface* kedua zona terletak diantara ujung *impeller* dan *baffle*.

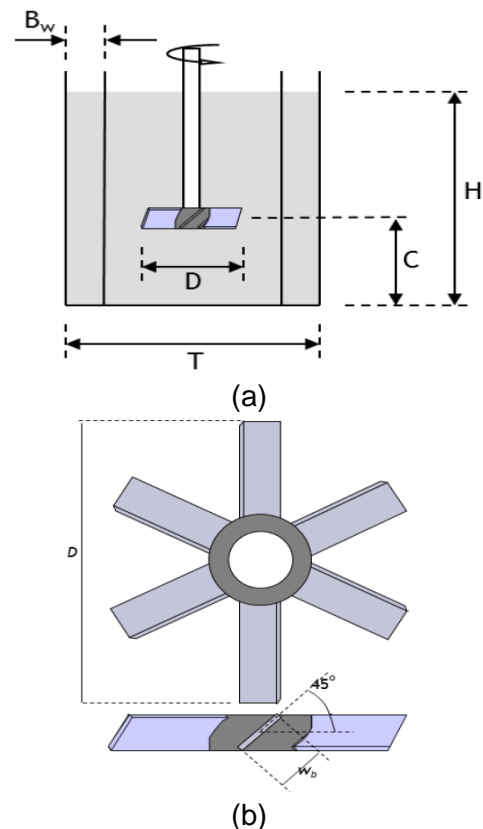


Gambar 1. Ilustrasi untuk *sliding mesh*

3. Metode Penelitian

Untuk sistem multifase dimana teknologi eksperimen secara visualisasi memiliki beberapa batasan, metode CFD memberikan beberapa keuntungan untuk menganalisis fenomena MI secara lebih komprehensif. Penelitian CFD banyak berkonsentrasi pada pendekatan berbasis $k-\epsilon$ model dan *Sliding Mesh* untuk memodelkan variasi pola alir berfrekuensi rendah yang lebih baik dibandingkan eksperimen karena juga mampu menampilkan seluruh vektor kecepatan pada jangka waktu tertentu.

Model tangki berpengaduk yang digunakan adalah fullgrid 3-D (360°) untuk mendapatkan pola alir yang mendekati kondisi sebenarnya. Geometri tangki yang digunakan berbentuk *flat bottomed cylindrical tank* yang dilengkapi 4 buah *baffle* dengan lebar masing-masing *baffle* sebesar $0,1 T$ yang dipasang pada dinding tangki secara simetris. Fluida kerja yang digunakan adalah air.



Gambar 2. Bentuk dan konfigurasi (a) tangki (b) *impeller*

Tabel 1. Rincian dimensi tangki

Diameter tangki (T)	Diameter <i>impeller</i> (D)	<i>Baffle</i> (B_w)	Tinggi liquid (H)	<i>Clearance</i> (C)	Lebar blade (W_b)	Tinggi hub
0,49 m	0,5 T	0,1 T	H=T	T/4	0,1 T	0,11 T

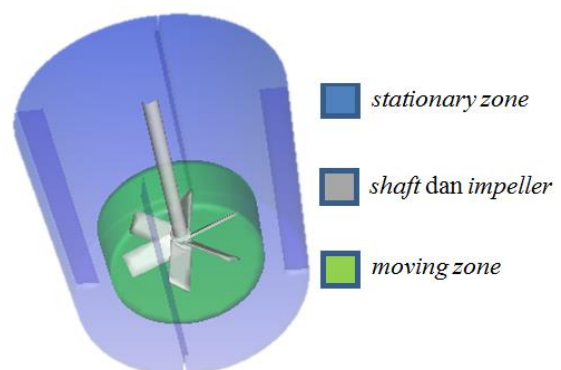
4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil

Model tangki berpengaduk yang digunakan adalah *fullgrid* 3-D (360°) untuk mendapatkan pola alir yang mendekati kondisi sebenarnya. Geometri tangki berbentuk *flat bottomed cylindrical tank* yang dilengkapi 4 buah *baffle* dengan lebar masing-masing *baffle* sebesar $0,1 T$ yang dipasang pada dinding tangki secara simetris. Fluida kerja yang digunakan adalah air.

Mesh dari tangki berpengaduk dibagi menjadi dua zona yaitu *stationary zone* dan *moving zone* yang keduanya memiliki *interface*. Pemisahan zona ini merupakan teknik metode *sliding mesh* dimana *moving zone* merupakan representasi dari

pergerakan *impeller* secara realistis. Kombinasi dari *finite volume*, dan $k-\epsilon$ model, digunakan untuk memprediksi pola alir dalam tangki berpengaduk. Ilustrasi dari model *sliding mesh* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Ilustrasi model *sliding mesh*

4.2. Titik Pengamatan

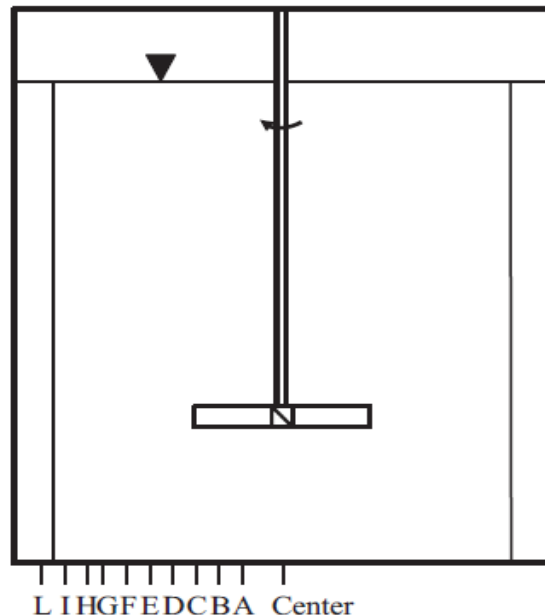
Bidang atau titik pengamatan diperlukan untuk mendapatkan data karakteristik dari *shear stress*. Ada 10 titik pengamatan yang merupakan representasi dari *pressure transducer* untuk mengetahui variasi dan besarnya tekanan statis dan dinamis yang dapat digunakan untuk memprediksi distribusi *shear stress*. Titik pengamatan pada tangki berpengaduk ditunjukkan pada Gambar 4.

4.3. Pemodelan

Pada pemodelan untuk tangki berpengaduk ini digunakan 2 kecepatan *impeller* yaitu 284 rpm dan 412 rpm. Pada kecepatan 284 rpm didapatkan data seperti pada Gambar 5. Gambar tersebut menunjukkan hasil dari tekanan statis, tekanan dinamis, dan *shear stress* pada dinding. Data tekanan statis pada titik pengamatan menunjukkan hasil tren yang identik dengan eksperimen yang dilakukan oleh Fort, dkk (2009) sehingga model

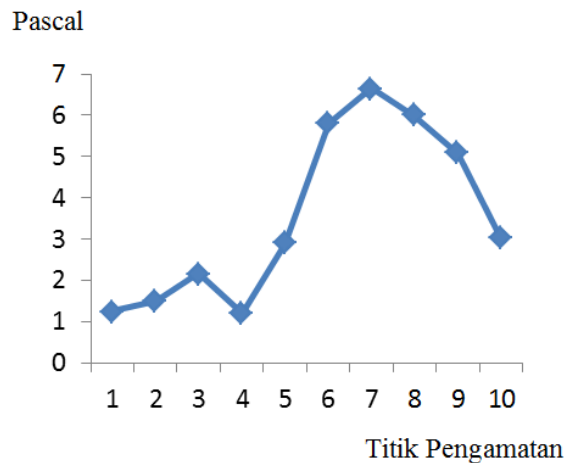
simulasi dapat disimpulkan tervalidasi oleh eksperimen.

Tekanan statis pada Gambar 5 (c) menunjukkan tanda negatif berarti menunjukkan arah ke sumbu y negatif atau dominan menuju dinding tangki. Hal ini diakibatkan oleh pola alir turbulensi pada tangki berpengaduk sehingga tekanan statis pada dinding tangki memiliki arah yang lebih stokastik. Apabila membandingkan antara Gambar 5 (a) dan 5 (b) maka *shear stress* pada dinding bawah sangat dipengaruhi oleh tekanan dinamis. *Shear stress* terbesar terjadi pada titik pengamatan dari titik ke 5 – 9. Dapat disimpulkan bahwa pada zona mendekati dinding samping tangki, *shear stress* semakin besar. Hal ini dikarenakan aliran aksial yang terjadi pada tangki pengaduk mengalami gesekan terbesar pada dinding tangki antara titik 5 – 9.

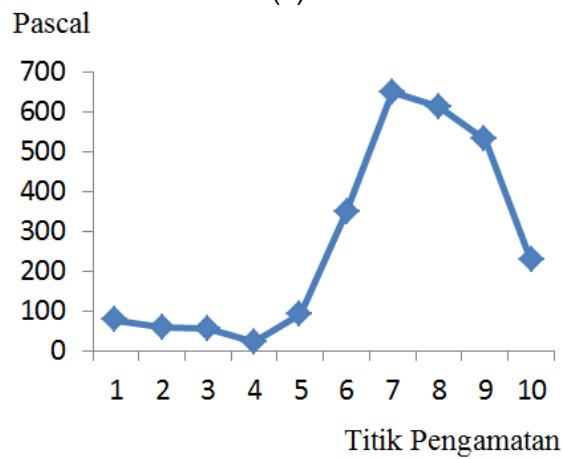


Koordinat	A-Center	A-B	BC	CD	DE	EF
8 Titik Pengamatan	1	2	3	4	5	6
Jarak (cm)	4	2,2	2	2	2	1,8
Koordinat	FG	GH	HI	IL	I-Wall	
Titik Pengamatan	7	8	9	10	-	
Jarak (cm)	2,2	1,5	2	1,8	3	

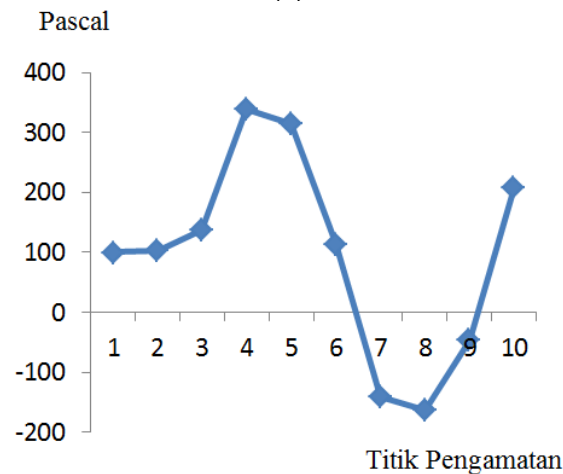
Gambar 4. Titik pengamatan pada tangki berpengaduk



(a)

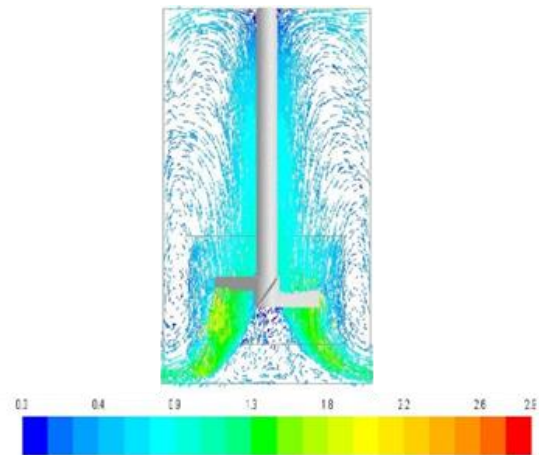


(b)



(c)

Gambar 5. Data pengamatan antara titik pengamatan vs wall shear stress (a); titik pengamatan vs tekanan dinamis (b); titik pengamatan vs tekanan statis (c) pada kecepatan 284 rpm

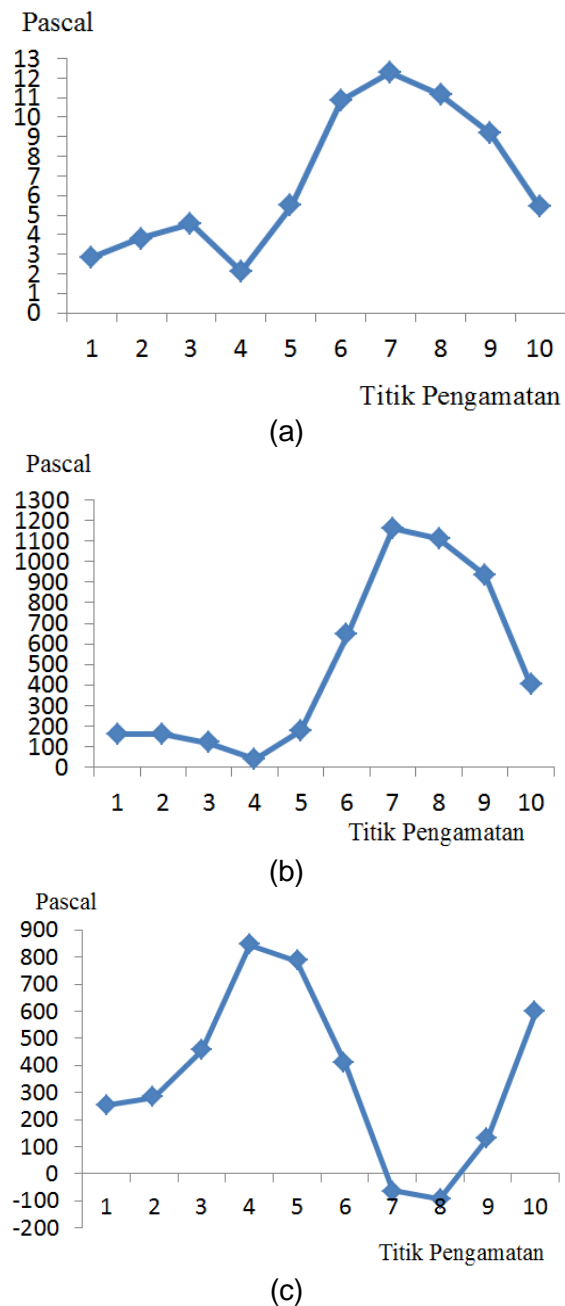


Gambar 6. Vektor kecepatan untuk impeller 4-blades PBT 45°

Untuk kecepatan 412 rpm, secara garis besar mengalami tren yang sama dengan kecepatan 284 rpm dengan intensitas *shear stress* yang lebih tinggi diakibatkan oleh energi kinetik dan turbulensi yang lebih tinggi.

Berdasarkan Gambar 7 (a), (b), (c) dapat diketahui bahwa pada kecepatan 412 rpm menunjukkan kenaikan tekanan statis dan tekanan dinamis yang lebih besar dibandingkan tekanan yang diberikan pada kecepatan 284 rpm. Sehingga *shear stress* yang dihasilkan pada kecepatan 412 rpm lebih besar dibandingkan dengan kecepatan 284 rpm. Hal ini disebabkan oleh partikel-partikel padat yang saling bertumbukan dengan turbulensi yang tinggi pada kecepatan 412 rpm dibandingkan dengan kecepatan 284 rpm.

Hasil dari simulasi CFD yang telah dilakukan sesuai dengan eksperimen Fort (2009) yang menyatakan bahwa distribusi *shear stress* dapat diamati melalui nilai tekanan dinamis dan tekanan statis yang diperoleh dari kecepatan *impeller*.



Gambar 7. Data pengamatan antara titik pengamatan vs wall shear stress (a); titik pengamatan vs tekanan dinamis (b); titik pengamatan vs tekanan statis (c) pada kecepatan 412 rpm

5. Penutup

Simulasi yang dilakukan berbasis metode CFD untuk memprediksi laju distribusi shear stress pada dinding tangki pengaduk menggunakan 4-blades 45° PBT pada variasi kecepatan pengadukan menunjukkan hasil yang identik jika

dibandingkan dengan eksperimen. Berdasarkan data yang diambil pada titik pengamatan disimpulkan bahwa shear stress sangat dipengaruhi oleh tekanan dinamis. Hal ini terbukti dengan semakin besar kecepatan pengadukan maka shear stress pada dinding akan semakin besar pula. Pada area di antara dua baffle yang berdekatan maka laju shear stress pada dinding bawah tangki akan lebih tinggi pada area antara tepi impeller dengan dinding samping tangki. Hal ini terjadi karena sirkulasi pola alir yang dominan terjadi pada area tersebut pada bagian bawah dinding tangki.

6. Nomenclature

- T : Diameter Tangki [m]
- D : Diameter Impeller [m]
- Bw : Lebar Baffle [m]
- H : Tinggi Liquid [m]
- C : Clearance [m]
- Wb : Lebar Blade [m]
- N : Kecepatan putaran [m]
- Θ : Pitch Angle

7. Daftar Pustaka

Ameur, H. 2016. *Agitation of Yield Stress Fluids in Different Vessel Shapes*. Engineering Science and Technology, an International Journal 19 (2016) 189–196.

Armenante, P.M. and E.U. Nagamine. 1998. Effect of Low Off-Bottom Impeller Clearance on the Minimum Agitation Speed for Complete Suspension of Solids in Stirred Tanks. Chemical Engineering Science, Vol.53, No.9, pp. 1757-1775, 1998.

Azimian, M and H. Bart. 2013. *CFD Simulation and Experimental Analysis of Erosion in a Slurry Tank Test Rig*. EPJ Web of Conferences 45, 01009 (2013). DOI : 10.1051/epjconf/20134501009.

- Bakker, Andre. 2013. *Modeling Of Turbulence In Stirred Vessels Using LargeEddy Simulation*. Published in the *Online CFM Book* at <http://www.bakker.org/cfm>.
- Biswas, P.K., S.C. Dev, K.M. Godiwalla, C.S. Sivaramakrishnan. 1999. *Effect of Some Design Parameters on the Suspension Characteristics of a Mechanically Agitated Sand–Water Slurry System*. *Mater. Des.* 20, 253-265.
- Chen, X. H., B. S. McLaury and S. A. Shirazi. 2006. *Numerical and Experimental Investigation of the Relative Erosion Severity between Plugged Tees and Elbows in Dilute Gas/Solid Two-Phase Flow*. *Wear*, 261, 715-729.
- Fort, I., P. Hasal, A. Apiglianti, and F. Magelli. 2009. *Axial Force at the Vessel Bottom Induced by Axial Impellers*. 13th European Conference on Mixing, London, 14-17 April 2009.
- Garcia- M Cortada, V. Dore, L. Mazzei, P. Angeli. 2017. *Experimental and CFD Studies of Power Consumption in the Agitation of Highly Viscous Shear Thinning Fluids*. *Journal of Chemical Engineering Research and Design* 119 (2017) 171-182.
- Graham, L.J.W., D. Lester, J. Wu. 2009. *Slurry Erosion in Complex Flows: Experiment and CFD*. Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 9-11 December 2009.
- Matsuda, N., Y. Tada, S. Hiraoka, S. Qian, and H. Takeda. 2004. *The Effect of Off-Bottom Clearance on Macro Instabilities in a Stirred Vessel*. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, Vol. 37, No. 10, pp. 1215-1223, 2004.
- Oshinowo, L.M. and A. Bakker. 2002. *CFD Modeling of Solids Suspensions in Stirred Tanks*. Symposium on Computational Modeling of Metals, Minerals and Materials, TMS Annual Meeting, February 17-21, 2002, Seattle, WA.
- Parslow, G. I., D. J. Stephenson, J. E. Strutt and S. Tetlow. 1999. *Investigation of Solid Particle Erosion in Components of Complex Geometry*. *Wear*, 233-235, 737-745.
- Sharma, R.N. and A.A. Shaikh. 2003. *Solids Suspension in Stirred Tanks with Pitched Blade Turbines*. *Chem. Eng. Sci.* 58, 2123-2140.
- Skocilas, J., I. Fort, T. Jirout. 2013. *A Study of CFD Simulations of the Flow Pattern in an Agitated System with a Pitched Blade Worn Turbine*. *Chemical and Process Engineering* 2013, 34 (1), 39-49. DOI: 10.2478/cpe-2013-0004.
- Weetman, R. J. 1998. *Computer Simulation Helps Increase Life of Impeller in Alumina Hydrate Precipitation from 2 to 8 Years*. *J Mater Eng Perform*, 7, 491-494.
- Zadghaffari R., J.S. Moghaddas, M. Ahmadlouydarab, J. Revstedt. 2008. *A Mixing Study in a Double-Rushton Stirred Tank*. Fourth International Conference on Advanced COmputational Methods in ENgineering (ACOMEN 2008).