

Simulasi Numerik Aliran Fluida Melalui Pipa Berlubang

F. M. Tangdan* dan T. A. Rohmat

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.
Jl. Grafika No.2, Kompleks UGM, Yogyakarta 55281, Indonesia,
Telp. (0274) 521673
e-mail: kondetangdan@gmail.com

Abstrak

Salah satu peralatan bawah sumur (*sub-surface*) yang dipasang saat tahap penyelesaian sumur adalah *sand control devices* untuk mencegah agar pasir di dalam *reservoir* tidak ikut terproduksi ke permukaan sumur. *Sand control devices* sebagian besar menggunakan pipa berlubang (*perforated pipe*) sebagai *base pipe* yang terpasang pada lubang sumur (*wellbore*). Salah satu parameter penting yang mempengaruhi laju alir fluida dari *reservoir* menuju lubang sumur adalah penurunan tekanan total (*total pressure drop*). Pipa berlubang memiliki desain yang beragam tergantung dengan kebutuhan di lapangan. Dalam mendesain suatu pipa berlubang maka yang perlu diperhatikan adalah jenis material dan dimensi pipa berlubang, jumlah lubang (*perforation density*), sudut fasa dan pola distribusi lubang perforasi. Untuk dapat mengetahui perilaku pola aliran (*axial and radial inflow*) yang melalui pipa berlubang sebagai *base pipe* dari *sand control devices* akibat pengaruh sudut fasa perforasi (60° , 90° , 180°) dan pola distribusi lubang perforasi bentuk *staggered* dan *non-staggered* maka dilakukan simulasi numerik menggunakan *software* ANSYS 18.2. Model turbulen yang digunakan adalah *k-ε standard* dan simulasi dilakukan dengan 5 kondisi *flow rate ratio* yaitu 0%, 10%, 15%, 20% dan 30%. Hasil simulasi pengaruh sudut fasa lubang perforasi menunjukkan bahwa sudut fasa 60° memiliki penurunan tekanan total paling rendah dibandingkan dengan dua sudut fasa lainnya. Sedangkan pada pengaruh pola distribusi lubang didapatkan bahwa pola distribusi model *non-staggered* memiliki penurunan tekanan total paling rendah dibandingkan dengan dua model pola distribusi *staggered* (*screw* dan *non screw*).

Kata kunci : Pipa berlubang, *radial inflow*, penurunan tekanan, sudut fasa, distribusi lubang.

Abstract

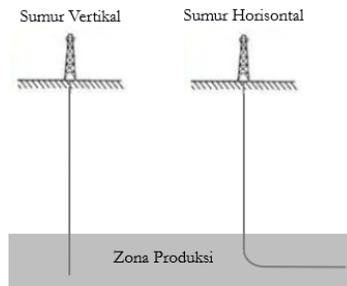
One of *sub-surface equipment* installed during well completion are *sand control devices* to prevent sand in the *reservoir* from being produced to the surface. *Sand control devices* which installed in the *wellbore* mostly use *perforated pipe* as *base pipe*. One of the important parameters that influence the flow rate of fluid from the *reservoir* to the *wellbore* is *total pressure drop*. *Perforated pipe* has various designs depending on requirement in the field. In designing a *perforated pipe* some parameters need to be considered are *perforated pipe material and dimension*, *number of holes (perforation density)*, *perforation phasing and perforation holes distribution pattern*. To study the behaviour of fluid flow patterns (*axial and radial inflow*) through the *perforated pipe* as a *base pipe* of *sand control devices* due to the influence of *perforation phasing* (60° , 90° , 180°) and *perforation holes distribution pattern* in the form of *staggered* and *non-staggered* then numerical simulations were performed using ANSYS 18.2 *software*. Turbulent model used is *k-ε standard* and simulation is carried out with 5 *flow rate ratio* conditions (0%, 10%, 15%, 20% and 30%). Simulation results on the effect of *perforation phasing* show that the phasing angle of 60° has the lowest total pressure drop compared to the other two phasing angles. While in

the effect of distribution pattern it is found that the distribution pattern of non-staggered model has the lowest total pressure drop compared to the other two staggered distribution patterns models (screw and non-screw).

Keywords: Perforated pipe, radial inflow, pressure drop, perforation phasing, hole distribution.

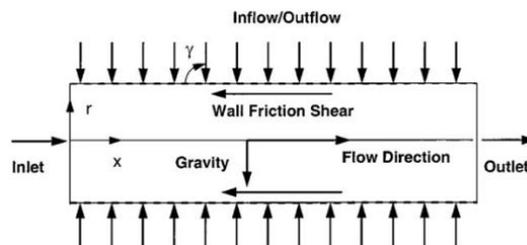
1. PENDAHULUAN

Dalam industri migas pada sektor hulu produktivitas sumur-sumur minyak adalah hal yang sangat penting bagi keberlangsungan industri. Dari bentuknya secara umum sumur minyak dikategorikan menjadi dua yaitu sumur vertikal dan sumur horisontal. Pada awalnya rata-rata sumur minyak adalah sumur vertikal tetapi dengan berkembangnya teknologi dalam pengeboran sumur maka dapat dilakukan pengeboran lubang secara horisontal. Salah satu keuntungan dari sumur horisontal (*horizontal wellbore*) adalah memiliki produktivitas yang lebih besar dari pada sumur vertikal karena dapat menjangkau zona produksi minyak atau area *reservoir* yang lebih banyak dengan satu kali pengeboran. Ilustrasi bentuk sumur vertikal dan horisontal dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi sumur vertikal dan horisontal

Setelah pengeboran sumur dilakukan maka tahap selanjutnya adalah pemasangan peralatan bawah sumur (*sub-surface*). Salah satu peralatan bawah sumur adalah *sand control devices* yang dipasang pada pada lubang sumur (*wellbore*) untuk mencegah pasir di *reservoir* ikut terproduksi ke permukaan bersama fluida *reservoir*. Contoh *sand control devices* yang banyak digunakan adalah saringan pasir atau *sand screen* dengan berbagai model seperti *wire-wrapped*, *woven/sintered wire mesh*, *gravel pack* dan *slotted/predrilled liner* yang menggunakan pipa berlubang (*perforated pipe*) sebagai *base pipe* dari *sand control devices*. Aliran fluida dari *reservoir* yang melalui pipa berlubang ke permukaan adalah gabungan dari aliran *axial* dan aliran *radial* (*radial inflow*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan salah satu parameter yang mempengaruhi laju alir fluida dari *reservoir* menuju lubang sumur adalah penurunan tekanan total (*total pressure drop*) yang terjadi pada pipa berlubang.



Gambar 2. Aliran fluida pada pipa berlubang (Ouyang dkk, 1998)

Penelitian mengenai aliran fluida melalui pipa berlubang pada sumur horisontal telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya dan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Studi eksperimen dan simulasi numerik peneliti sebelumnya

Peneliti	Konfigurasi	Hasil
Dikken, 1990	Studi eksperimental: model sumur horizontal.	Penurunan tekanan total yang terjadi hanya dipengaruhi oleh <i>wall friction</i> .
Asheim dkk, 1992	Studi eksperimental: Injeksi langsung ke <i>test pipe</i> sebagai ilustrasi <i>radial inflow</i> dengan lubang perforasi berjumlah 1 dan 2 (Fluida kerja air).	Selain <i>wall friction</i> , penurunan tekanan total juga dipengaruhi oleh <i>radial inflow</i> .
Su dan Gudmundsson, 1993	Studi eksperimental: Lubang perforasi ditutup dengan <i>heat shrinkable tube</i> agar dapat diketahui <i>friction factor</i> akibat adanya lubang perforasi. Lubang perforasi 4, 6, 8 & 12 SPF dan sudut fasa 45°, 60°, 90° & 120° (Fluida kerja air).	Pada saat tidak ada <i>radial inflow</i> , <i>friction factor</i> tidak dipengaruhi oleh sudut fasa dengan <i>perforation density</i> (jumlah lubang) yang sama.
Su dan Gudmundsson, 1994	Studi eksperimental: Injeksi ke <i>test pipe</i> melalui pipa selubung sebagai ilustrasi <i>radial inflow</i> dengan lubang perforasi 12 SPF dan sudut fasa 60° (Fluida kerja air).	Penurunan tekanan total pada pipa berlubang dibagi menjadi empat komponen yaitu penurunan tekanan akibat <i>friction</i> , <i>acceleration</i> , <i>perforation roughness</i> dan <i>mixing fluids</i> .
Su dan Gudmundsson, 1998	Studi eksperimental: Injeksi ke <i>test pipe</i> melalui pipa selubung sebagai ilustrasi <i>radial inflow</i> dengan lubang perforasi 12 SPF dan sudut fasa 60°. <i>Test pipe</i> dibagi menjadi 2 <i>section</i> yaitu dengan lubang perforasi dan tanpa lubang perforasi / <i>partly perforated pipe</i> (Fluida kerja air).	Penurunan tekanan total pada pipa berlubang disederhanakan menjadi tiga komponen yaitu penurunan tekanan akibat <i>friction</i> , <i>acceleration</i> dan <i>additional (perforation roughness dan mixing fluids)</i> .
Ouyang dkk, 1998	Studi eksperimental: model sumur horizontal.	Membuat model untuk aliran satu fasa yang mewakili penurunan tekanan akibat <i>friction</i> , <i>acceleration</i> , grafitasi dan <i>inflow</i> . Korelasi baru terkait <i>wall friction factor</i> juga dibuat untuk menentukan <i>wall-friction shear</i> dan penurunan tekanan <i>friction</i> pada aliran <i>inflow</i> (sumur produksi) dan <i>outflow</i> (sumur injeksi) baik aliran laminar maupun turbulen.
Ouyang dkk, 2009	Simulasi numerik: 1 lubang perforasi dengan variasi 3 jarak posisi lubang dari inlet pipa (Fluida air). Validasi menggunakan hasil perhitungan teoritis dengan perbedaan -0,83% - 0.48%.	Pipa berlubang dengan <i>radial inflow</i> pada satu lubang perforasi mempengaruhi aliran fluida dan penurunan tekanan disepanjang lubang sumur dan hasilnya bervariasi tergantung besarnya laju alir <i>radial inflow</i> . Hasil simulasi menunjukkan semakin besar <i>flow rate ratio</i> maka semakin besar penurunan tekanan yang terjadi dan semakin dekat posisi lubang perforasi dengan sisi <i>outlet</i> pipa maka semakin kecil pengaruhnya terhadap penurunan tekanan.

Abdulwahid dkk, 2013	Simulasi numerik: 2 lubang perforasi posisi berlawanan dan sudut fasa 180° (Fluida air). Validasi dengan studi eksperimen peneliti lain dan hasil simulasi menunjukkan perilaku aliran fluida yang sama dengan studi eksperimen.	Semakin besar <i>flow rate ratio</i> maka semakin besar penurunan tekanan yang terjadi, semakin banyak lubang perforasi maka semakin besar <i>wall shear stress pipa</i> dan perubahan <i>turbulent kinetic energy</i> di dalam pipa terjadi saat <i>main flow</i> bertabrakan dengan <i>radial inflow</i> yang melalui lubang perforasi.
Abdulwahid dkk, 2013	Simulasi numerik: Geometri <i>test pipe</i> dan validasi menggunakan model eksperimen Su dan Gudmundsson 1998 (Fluida air). Validasi dengan studi eksperimen Su dan Gudmundsson, 1998 dan hasil simulasi menunjukkan perilaku aliran fluida yang sama dengan studi eksperimen.	Semakin besar <i>flow rate ratio</i> dan <i>perforation density</i> maka semakin besar penurunan tekanan total yang terjadi.
Abdulwahid dkk, 2014	Simulasi numerik: Variasi 5 profil <i>radial inflow</i> (Fluida air). Validasi dengan model aliran fluida satu fasa hasil studi eksperimen Ouyang dkk, 1998.	Perilaku <i>wall shear stress</i> pada pipa mengikuti profil <i>radial inflow</i> yang divariasikan. Semakin besar <i>radial inflow</i> maka semakin besar <i>wall shear stress</i> pada pipa. Adanya <i>radial inflow</i> menyebabkan kenaikan penurunan tekanan <i>friction</i> tetapi dalam beberapa kondisi <i>radial inflow</i> dapat menyebabkan penurunan tekanan <i>friction</i> menjadi berkurang karena <i>radial inflow</i> memberikan efek lubrikasi.
Azadi dkk, 2017	Simulasi numerik: Variasi parameter perforasi yaitu diameter, <i>perforation density</i> dan sudut fasa lubang perforasi (Fluida air). Validasi menggunakan studi eksperimen Asheim dkk, 1992 dengan perbedaan 9,4% dan Ouyang dkk, 1998 dengan perbedaan 4,7%.	Semakin besar <i>perforation density</i> maka semakin besar <i>wall friction factor</i> , <i>shear stress</i> dan penurunan tekanannya. Pengaruh diameter lubang perforasi terhadap penurunan tekanan tergantung dari rasio diameter lubang perforasi dan lubang pipa. Selain itu hasil simulasi juga membuktikan jika <i>wall friction factor</i> adalah <i>independent</i> terhadap sudut fasa (<i>perforating phasing</i>) dan penurunan tekanan total dipengaruhi oleh <i>flow rate ratio</i> .
Salim dkk, 2017	Simulasi numerik: 2 lubang perforasi dengan variasi parameter perforasi dan variasi bentuk lubang perforasi silinder dan kerucut (Fluida air). Validasi menggunakan simulasi numerik Abdulwahid dkk, 2013 dengan perbedaan kurang dari 2% (Fluent) dan 5% (CFX).	Semakin besar diameter lubang perforasi dan <i>radial inflow</i> maka semakin besar penurunan tekanan yang terjadi. Bentuk lubang perforasi silinder memiliki penurunan tekanan yang lebih besar daripada bentuk kerucut dengan parameter perforasi yang sama dan panjang lubang perforasi memiliki pengaruh yang sangat kecil terhadap penurunan tekanan sehingga dapat diabaikan.
Jianguang dkk, 2017	Studi eksperimental: Injeksi melalui pipa selubung dengan variasi diameter lubang perforasi, <i>perforation density</i> 8, 6 & 12 SPM dan sudut fasa 45°, 90° & 180° (Fluida <i>mineral oil</i>).	Mengembangkan model penurunan tekanan akibat <i>friction</i> dan <i>mixing fluids</i> pada aliran satu fasa yang melalui pipa berlubang dengan hasil akurasi secara berturut-turut adalah 4% dan 3% sementara untuk penurunan tekanan total memiliki akurasi 2% dari hasil eksperimen yang dilakukan

Rashad dkk, 2018	Simulasi numerik: Perbandingan geometri pipa berlubang antara 400 lubang perforasi dengan sudut fasa 90° dan 200 lubang perforasi dengan 180° (Fluida air).	Sudut 90° memiliki penurunan tekanan total lebih besar dari sudut 180°.
------------------	---	---

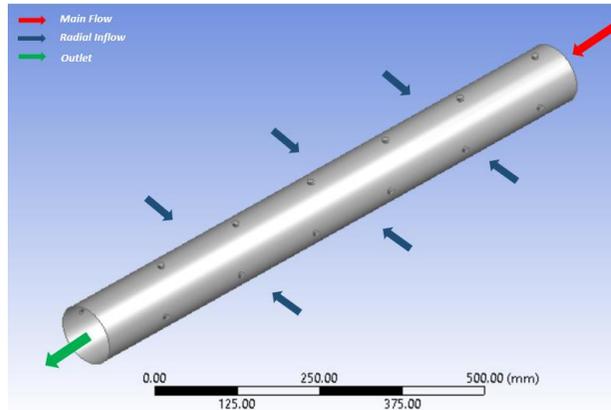
Studi yang dilakukan sebelumnya hanya menggunakan parameter sudut fasa untuk menggambarkan distribusi lubang perforasi yang memiliki jumlah lubang lebih dari satu. Selain parameter sudut fasa dalam desain pipa berlubang juga memiliki pola distribusi lubang yang tersebar pada dinding pipa yaitu pola *staggered* dan *non-staggered*. Studi ini difokuskan pada perilaku aliran fluida seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 yaitu aliran *axial* dan *radial inflow* yang melalui pipa berlubang sebagai *base pipe* dari *sand screen* dengan melakukan pengamatan pada pengaruh sudut fasa perforasi yang banyak digunakan yaitu pada sudut fasa 60°, 90° dan 180°. Pengamatan juga dilakukan pada pengaruh pola distribusi lubang perforasi (*staggered* dan *non-staggered*) terhadap penurunan tekanan total yang terjadi yang belum pernah dilakukan studi berdasarkan penelitian yang ditunjukkan pada Tabel 1 sehingga diharapkan dapat memperoleh desain pipa berlubang yang lebih baik.

2. METODE PENELITIAN

Pada studi ini simulasi numerik akan dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS workbench 18.2 mulai dari pembuatan geometri, *meshing* dan komputasi dengan asumsi aliran fluida adalah satu fasa, *steady state* dan *incompressible* pada kondisi isothermal. Fluida yang digunakan adalah air dengan densitas 998,2 kg/m³ dan viskositas dinamik 0,001 kg/m.s. Geometri yang dibuat pada aplikasi ANSYS *design modeler* adalah geometri domain fluida yang akan dilakukan komputasi sehingga geometri yang dibuat bukan dimensi aktual dari pipa berlubang yang memiliki lubang-lubang perforasi. Pada Gambar 3 bentuk silinder kecil di sekeliling dinding pipa bagian luar adalah domain fluida lubang perforasi dengan ketebalan silinder sama dengan tebal pipa. Konfigurasi geometri dari pipa berlubang disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Konfigurasi geometri pipa berlubang

Model konfigurasi	Diameter pipa (mm)	Panjang Pipa (mm)	Diameter lubang Perforasi (mm)	Perforation density (<i>Shoot per meter</i>)	Sudut fasa perforasi, Φ (deg)	Pola Distribusi Lubang
1	100	1000	10	24	60°	<i>Staggered (Screw)</i>
2					90°	
3					180°	
4	100	1000	10	24	90°	<i>Staggered (Screw)</i>
5						<i>Staggered (Non-Screw)</i>
6						<i>Non-Staggered</i>



Gambar 3. Geometri pipa berlubang

Model turbulen yang digunakan pada simulasi ini adalah *k-ε standard* karena dari perbandingan hasil penurunan tekanan untuk 5 model turbulen yaitu *k-ε standard*, *RNG*, *k-ε realizable*, *k-ω standard* dan *Reynolds stress model (RSM)* menunjukkan bahwa model *k-ε standard* memberikan hasil yang paling akurat sedangkan *RSM* memberikan hasil yang cukup dapat diterima dengan pertimbangan waktu komputasi yang lebih lama (Azadi dkk, 2017). *Boundary condition* adalah *velocity-inlet* untuk kedua inlet (*axial* dan *radial inflow*) dan *pressure-outlet*. Sedangkan *solution method* yang digunakan adalah metode *SIMPLE (Semi-implicit method pressure-linked equations)*. Dengan asumsi aliran fluida yang digunakan adalah fluida satu fasa, *steady state* dan *incompressible* maka persamaan pembentuk aliran yang mengatur proses fisik aliran fluida pada kondisi ini adalah hukum konservasi massa dan konservasi momentum.

2.1. Model Matematika

Penurunan tekanan total pada pipa berlubang dengan profil *radial inflow* adalah seragam di sepanjang lubang sumur dapat dituliskan menjadi:

$$\Delta P_T = \Delta P_f + \Delta P_{acc.} + \Delta P_g + \Delta P_{mix} \quad (1)$$

Dengan ΔP_T = penurunan tekanan total (Pa), ΔP_f = penurunan tekanan *friction* (Pa), $\Delta P_{acc.}$ = penurunan tekanan *acceleration* (Pa), ΔP_g = penurunan tekanan *gravitational* (Pa), ΔP_{mix} = penurunan tekanan *mixing fluids* (Pa). Penurunan tekanan yang disebabkan oleh efek gravitasi pada sumur horisontal diabaikan sehingga Persamaan (1) menjadi:

$$\Delta P_T = \Delta P_f + \Delta P_{acc.} + \Delta P_{mix}. \quad (2)$$

Untuk masing-masing komponen penurunan tekanan pada Persamaan (2) secara berturut-turut dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta P_f = f_w \frac{\rho u^2 \Delta L}{2D} \quad (3)$$

Dengan f_w = *wall friction factor*, ρ = densitas (kg/m^3), u = kecepatan alir (m/s), ΔL = panjang pipa (m), D = diameter pipa (m). Kemudian untuk komponen penurunan tekanan *acceleration* yang hanya dipengaruhi oleh densitas dan kecepatan alir fluida dituliskan pada Persamaan (4).

$$\Delta P_{acc.} = \rho(u_2^2 - u_1^2) \quad (4)$$

Dengan u_1 = kecepatan alir di *inlet* pipa (m/s), u_2 = kecepatan alir di *outlet* pipa (m/s). *Reynolds number* dan *Darcy friction factor* (Haaland, 1983) diperoleh dari Persamaan (5) dan (6). Sehingga *wall friction factor* pada Persamaan (3) yang diperoleh dari hasil eksperimen Su dan Gudmundsson 1993 dihitung menggunakan Persamaan (7).

$$R_e = \frac{\rho u D}{\mu} \quad (5)$$

$$f_D = \left[-1,8 \log \left(\frac{6,9}{R_e} + \left(\frac{\varepsilon}{3,7D} \right)^{1,11} \right) \right]^{-2} \quad (6)$$

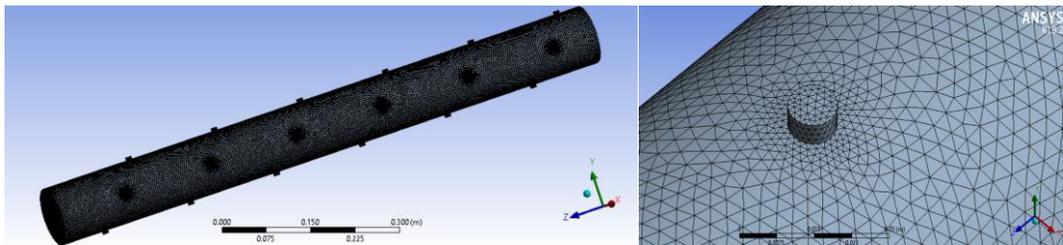
$$\sqrt{\frac{8}{f_w}} - \sqrt{\frac{8}{f_D}} + 0,1778n \frac{d}{D} = 1,25 \ln \left(\frac{f_w}{f_D} \right) \quad (7)$$

Dengan R_e = Reynolds number, ρ = densitas (kg/m³), u = kecepatan alir (m/s), D = diameter pipa (m), μ = viskositas dinamik (Pa.s), f_D = Darcy friction factor, ε/D = relative roughness, n = perforation density (SPM), d = diameter lubang perforasi (m).

Komponen *mixing fluids* adalah penurunan tekanan yang terjadi karena adanya interaksi antara *main flow (axial)* dan *radial inflow* di dekat dinding pipa berlubang yang menyebabkan gangguan pada *boundary layer* dari *main flow* sehingga mempengaruhi penurunan tekanan total yang terjadi. Karena penurunan tekanan *mixing* adalah variabel yang sangat kompleks maka untuk dapat mengetahui besarnya penurunan tekanan *mixing* adalah penurunan tekanan total dari hasil simulasi atau eksperimen dikurangi dengan penurunan tekanan *friction* dan penurunan tekanan *acceleration* (Su dan Gudmundsson 1998).

2.2. Meshing

Proses *meshing* dilakukan menggunakan aplikasi *mesh* yang sudah termasuk dalam paket *software* ANSYS. Tipe *mesh* adalah *mesh tetrahedron* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Proses *meshing* sangat mempengaruhi hasil akhir dari suatu simulasi, sehingga *grid independence test* dilakukan untuk mendapatkan minimum jumlah *node* dan *cell* agar dapat mengurangi beban komputasi dengan parameter *input* dan *output* secara berturut-turut adalah variasi ukuran *mesh* dan penurunan tekanan. Hasil *grid independence test* menunjukkan untuk ukuran *mesh* di atas 600000 tidak ada perubahan penurunan tekanan yang signifikan sehingga dipilih *mesh* dengan jumlah *node* 110682 dan jumlah elemen 566413. Dari hasil *grid independence test* yang telah dipilih kemudian dilakukan pengecekan kualitas *mesh*. Hasil kualitas *mesh* menunjukkan nilai rata-rata 0,22986 (*excellent*) untuk *skewness* dan 0,76843 (*very good*) untuk *orthogonal quality*.



Gambar 4. Tipe *mesh tetrahedron* pada pipa berlubang

2.3. Validasi

Baseline pipa berlubang yang digunakan untuk validasi adalah pipa berlubang dengan panjang 1000 mm, diameter pipa 100 mm, diameter lubang perforasi 10 mm, Sudut fasa 90°, *perforation density* 24 SPM dan pola distribusi lubang *staggered* (model *screen*). Validasi dilakukan dengan variasi kecepatan *inlet* pada *main flow* yaitu 0,75 m/s, 3 m/s dan 4,5 m/s dan *radial inflow* pada *flow rate ratio* 0%, 10%, 15%, 20% dan 30% dimana *flow rate ratio* adalah rasio *total radial inflow rate* terhadap *main flow rate*. Langkah validasi dilakukan dengan membandingkan penurunan tekanan hasil simulasi terhadap hasil perhitungan menggunakan persamaan empiris hasil studi eksperimental

seperti yang diuraikan pada sub bab 2.1 model matematika. Untuk memperkuat hasil validasi, maka validasi juga dilakukan dengan menambahkan 2 model dari hasil studi eksperimen peneliti lain yang dituliskan sebagai berikut:

- Model Asheim dkk, 1992.

$$f_p = 4D \frac{q_L}{Q} + 2 \frac{D}{n} \left(\frac{q_L}{Q} \right)^2 \quad (8)$$

$$-\frac{dp}{dx} = (f_D + f_p) \frac{\rho u^2}{2D} \quad (9)$$

Dengan $f_D + f_p =$ *apparent friction factor*, $f_p =$ *perforated friction factor*, $q_L =$ *Inflow rate per length unit* (m²/s), $Q =$ Laju alir volume di dalam pipa (m³/s).

- Model Ouyang dkk, 1998.

$$R_{ew} = \frac{\rho q_L}{\pi \mu} \quad (10)$$

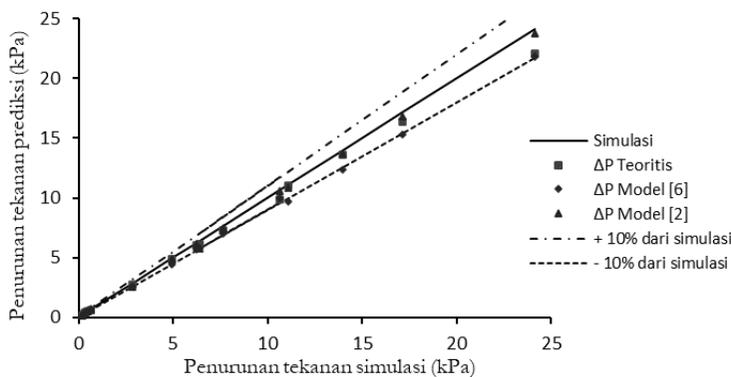
$$f_F = \frac{1}{4} f_D$$

$$f_w = f_F (1 + 0.04304 R_{ew}^{0.6142}) \rightarrow \text{Laminer} \quad (11)$$

$$= f_F (1 - 0.0153 R_{ew}^{0.3978}) \rightarrow \text{Turbulen} \quad (12)$$

$$-\frac{dp}{dx} = f_w \frac{2\rho u^2}{D} + 2\rho u \frac{q_L}{A} \quad (13)$$

Dengan $R_{ew} =$ *wall Reynolds number*, $f_F =$ *Fanning friction factor*, $A =$ luas penampang pipa (m²). Hasil validasi ditunjukkan pada Gambar 5 dan memperlihatkan hasil yang cukup akurat yaitu perbandingan hasil simulasi terhadap hasil perhitungan teoritis memiliki perbedaan rata-rata $\pm 10\%$. Selanjutnya simulasi akan dilanjutkan dengan memvariasikan parameter perforasi yaitu sudut fasa dan pola distribusi lubang perforasi sesuai dengan konfigurasi geometri pipa berlubang yang ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 5. Grafik hasil validasi

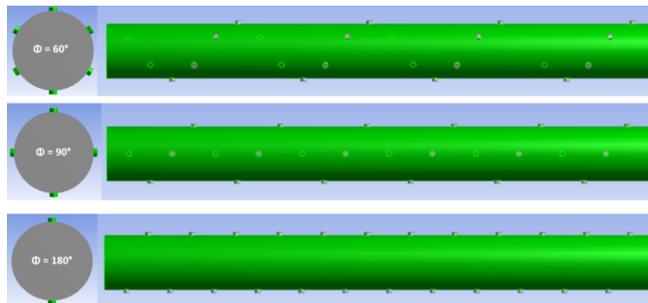
Setelah dilakukan validasi maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan memvariasikan parameter perforasi yaitu sudut fasa dan pola distribusi lubang perforasi sesuai dengan konfigurasi geometri pipa berlubang yang ditunjukkan pada Tabel 2. Untuk mengetahui

pengaruh sudut fasa dan pola distribusi lubang perforasi terhadap penurunan tekanan total, simulasi dilakukan dengan kecepatan *inlet* pada *main pipe* adalah 3 m/s dan lima kondisi *radial inflow* yaitu pada *flow rate ratio* 0%, 10%, 15%, 20% dan 30%.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

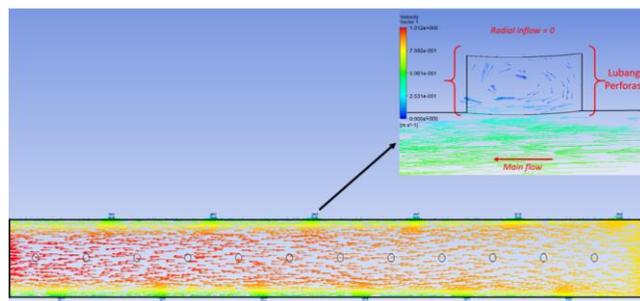
3.1. Variasi Sudut Fasa

Sudut fasa yang dipilih adalah 60°, 90° dan 180° dengan pola distribusi lubang *staggered* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Jarak antar lubang mulai dari ujung pipa adalah sama besar pada masing-masing baris lubang dan posisi lubang adalah model *screw* pada masing-masing geometri yang ditunjukkan pada Gambar 6.

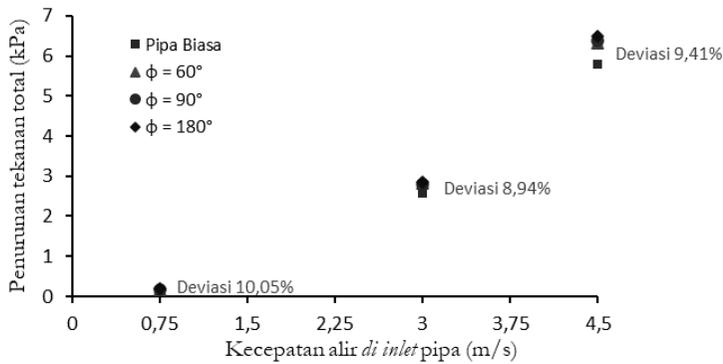


Gambar 6. Sudut fasa lubang perforasi

Pada kondisi tidak ada *radial inflow* (*flow rate ratio* 0%) pipa berlubang memiliki penurunan tekanan yang sedikit lebih tinggi dari pipa biasa (*ordinary pipe*). Penurunan tekanan total pada kondisi ini dipengaruhi oleh hambatan yang disebabkan oleh adanya rongga dari lubang perforasi pada dinding pipa atau disebut sebagai *perforation roughness* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Lubang perforasi berperan sebagai kekasaran tambahan di dinding pipa dan kekasaran tambahan ini tergantung juga pada kedalaman lubang perforasi atau ketebalan pipa. Simulasi ditambahkan untuk mengetahui perbandingan penurunan tekanan total pada pipa biasa dan pipa berlubang dengan *perforation density* 24 SPM. Variasi kecepatan *inlet* (*axial flow*) pada pipa adalah 0,75 m/s, 3 m/s dan 4,5 m/s (tanpa *radial inflow*).

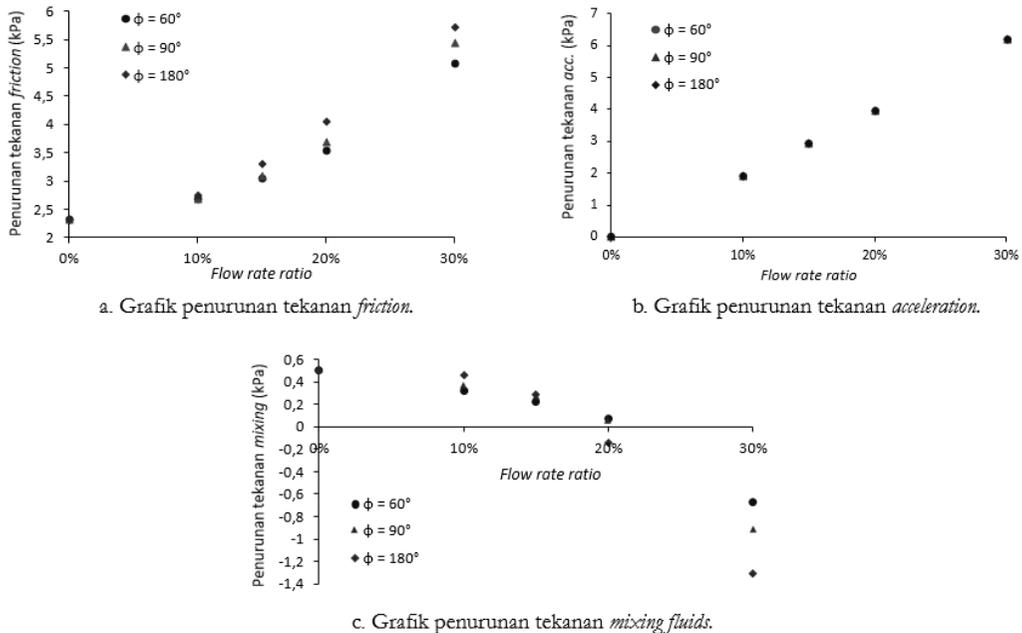


Gambar 7. Vektor kecepatan (*main flow*) melalui lubang perforasi



Gambar 8. Perbandingan pipa biasa dan pipa berlubang (tanpa *radial inflow*)

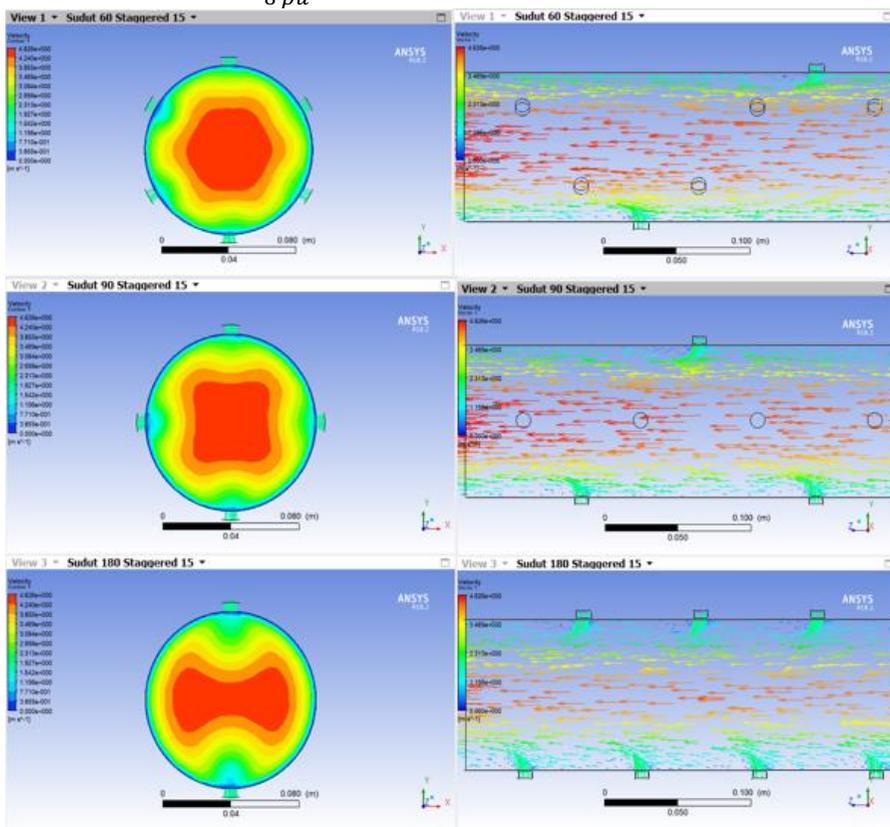
Gambar 8 memperlihatkan bahwa ketika tidak ada *radial inflow* maka penurunan tekanan total pada pipa berlubang dengan sudut fasa 60° , 90° dan 180° lebih tinggi daripada pipa biasa. Perbedaan (deviasi) penurunan tekanan total antara pipa berlubang dengan pipa biasa pada ketiga kondisi kecepatan *inlet main flow* secara berturut-turut adalah 10,05%, 8,94% dan 9,41%. Selain itu dapat dilihat juga khusus pada pipa berlubang untuk ketiga sudut fasa memiliki perbedaan penurunan tekanan yang saling berdekatan atau rata-rata sebesar 0,08% sehingga *friction factor* tidak dipengaruhi oleh sudut fasa dengan *perforation density* yang sama dan perilaku ini sesuai dengan hasil studi eksperimen Su dan Gudmundsson 1993. Pengaruh sudut fasa terhadap penurunan tekanan *friction*, *acceleration* dan *mixing fluids* untuk lima kondisi *flow rate ratio* ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Penurunan tekanan *friction*, *acceleration* dan *mixing fluids* pada variasi sudut fasa

Pada Gambar 9a untuk grafik penurunan tekanan *friction* menunjukkan bahwa semakin besar *flowrate ratio* maka semakin besar penurunan tekanan *friction* dan pada *flow rate ratio* yang sama semakin besar sudut fasa maka penurunan tekanan *friction* semakin besar dan perilaku ini sama dengan hasil eksperimen Jianguang dkk, 2017. Sudut fasa 180° memiliki *wall shear stress* paling tinggi karena kecepatan terbesar akibat adanya *radial inflow* pada sudut ini terjadi pada kedua sisi pipa yang tidak terdapat lubang perforasi sedangkan sudut fasa 60° dan 90° kecepatan terbesar terjadi di tengah pipa berlubang karena *radial inflow* melalui lubang perforasi yang berada hampir di sekeliling pipa sehingga *wall shear stress* menjadi lebih rendah. Kontur dan vektor kecepatan di sisi *outlet* pada masing-masing sudut fasa dapat dilihat pada Gambar 10 dengan salah satu contoh pada *flow rate ratio* 15%. *Friction factor* diperoleh dari *wall shear stress* rata-rata hasil simulasi seperti yang dilakukan oleh Abdulwahid dkk, 2014 dan dihitung menggunakan Persamaan 14.

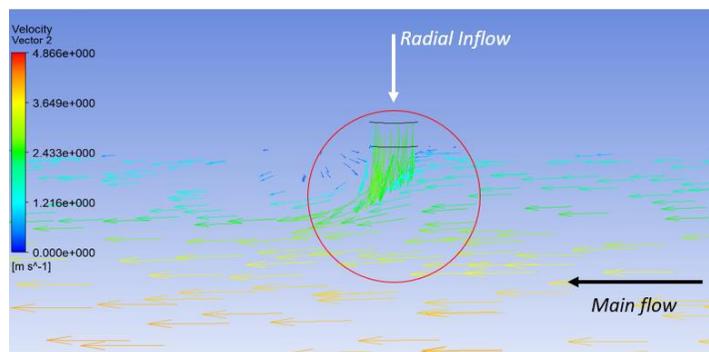
$$f_w = \frac{1}{8} \frac{\tau_w}{\rho u^2} \quad (14)$$



Gambar 10. Kontur dan vektor kecepatan di *outlet* pipa pada ketiga sudut fasa

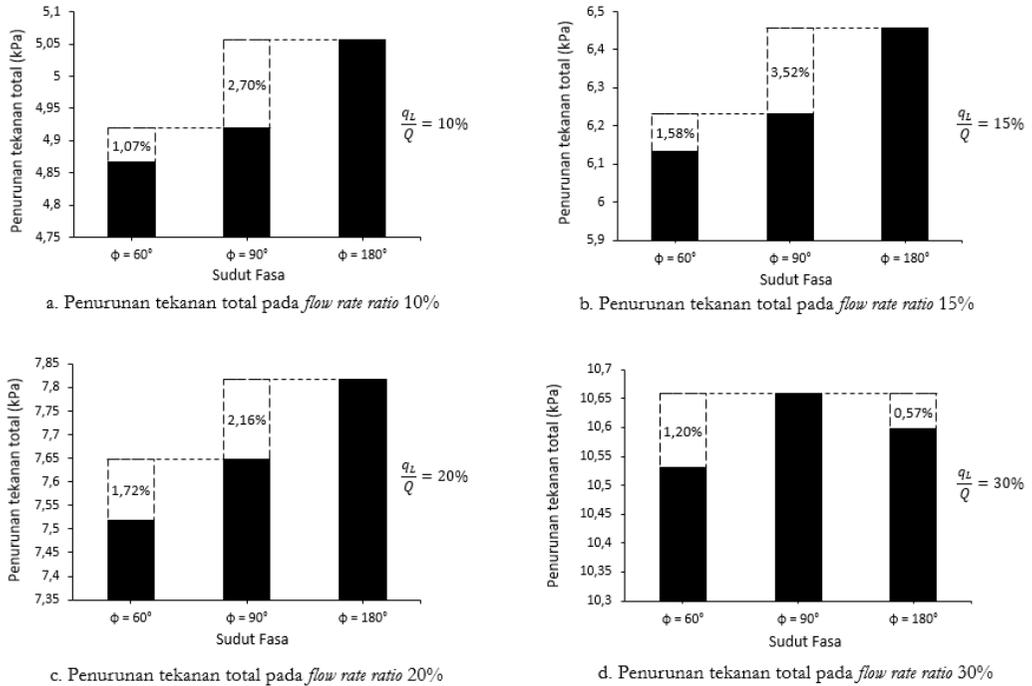
Dengan $\tau_w = \text{Wall shear stress}$ (Pa). Pengaruh sudut fasa terhadap penurunan tekanan *acceleration* pada Gambar 9b adalah linear terhadap *flow rate ratio* dan bernilai sama untuk semua sudut fasa karena penurunan tekanan *acceleration* terjadi akibat perubahan momentum yang hanya dipengaruhi oleh densitas dan kecepatan fluida. Pada saat tidak ada *radial inflow* (*flow rate ratio* 0%) penurunan tekanan *acceleration* akan bernilai nol untuk fluida *incompressible* pada pipa yang memiliki diameter dalam konstan.

Pada Gambar 9c pengaruh sudut fasa terhadap penurunan tekanan *mixing fluids* pada *flow rate ratio* 0% penurunan tekanan hanya dipengaruhi oleh *perforation roughness* karena tidak ada *radial inflow* dan pada *flow rate ratio* sekitar 20% penurunan tekanan hampir bernilai nol dan pengaruh *perforation roughness* pada titik ini menjadi berkurang karena efek pelubrikan (*smoothing effect*) akibat adanya *radial inflow*. *Flow rate ratio* ketika penurunan tekanan bernilai nol disebut *critical limit* dan nilai *critical limit* tergantung dari geometri pipa berlubang dan *flow rate ratio*. Ketika *flow rate ratio* melewati *critical limit* maka penurunan tekanan akibat efek *mixing fluids* akan bernilai negatif sehingga akan menurunkan penurunan tekanan total yang terjadi pada pipa berlubang (Su dan Gudmundsson, 1998). Fenomena efek *mixing fluids* secara jelas dapat dilihat pada *streamline* kecepatan Gambar 11.



Gambar 11. Efek *mixing fluids* pada aliran *axial* dan *radial inflow*

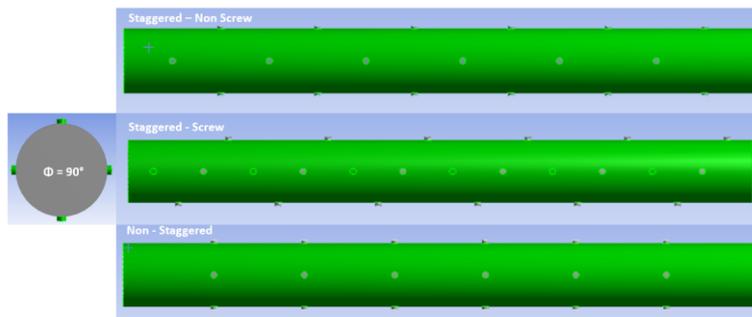
Pada Gambar 11 terlihat bahwa *radial inflow* membuat *main flow* di dekat dinding pipa tertahan pada sisi hulu (*upstream*) dari lubang perforasi sehingga tabrakan aliran antara *radial inflow* dan *main flow* (*mixing fluids*) ini menyebabkan penurunan kecepatan aliran *main flow* di sisi hulu dan hilir (*downstream*) dari lubang perforasi. Kondisi ini yang disebut sebagai efek pelubrikan pada *main flow* di dekat dinding pipa yang terdapat lubang perforasi akibat adanya penetrasi *radial inflow* dan efek pelubrikan ini sesuai dengan hasil eksperimen Su dan Gudmundsson, 1998 dan simulasi numerik yang dilakukan oleh Abdulwahid dkk, 2014. Perilaku ini menyebabkan penurunan tekanan menjadi berkurang di sepanjang dinding pipa yang terdapat lubang perforasi terutama pada sudut fasa 180° yang jarak lubang perforasinya berdekatan karena hanya terdapat pada 2 sisi dinding pipa yang saling berlawanan. Semakin mendekati sisi *outlet* pipa berlubang maka penetrasi *radial inflow* akan semakin besar karena terjadi penurunan kecepatan *main flow* pada tiap lubang perforasi sebelumnya mulai dari lubang perforasi pertama di sisi *inlet* pipa berlubang. Perubahan kecepatan yang terjadi juga akan mempengaruhi *wall shear stress* pada pipa berlubang. Pada Gambar 12 menunjukkan penurunan tekanan total akibat pengaruh *radial inflow* pada semua sudut fasa adalah linear terhadap *flow rate ratio* dan semakin besar sudut fasa maka semakin besar penurunan tekanan total yang terjadi kecuali pada *flow rate ratio* 30% dimana penurunan tekanan total sudut fasa 180° terlihat lebih rendah walaupun sudut fasa 180° memiliki penurunan tekanan *friction* yang lebih tinggi dibanding dua sudut fasa lainnya. Hal ini dikarenakan penurunan tekanan *mixing fluids* untuk sudut fasa 180° memiliki nilai paling rendah ketika melewati *critical limit* yaitu pada *flow rate ratio* 30% seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9c sehingga efek *mixing* akibat *radial inflow* mengindikasikan bahwa penurunan tekanan *mixing* mengurangi penurunan tekanan total yang terjadi.



Gambar 12. Penurunan tekanan total pada sudut fasa

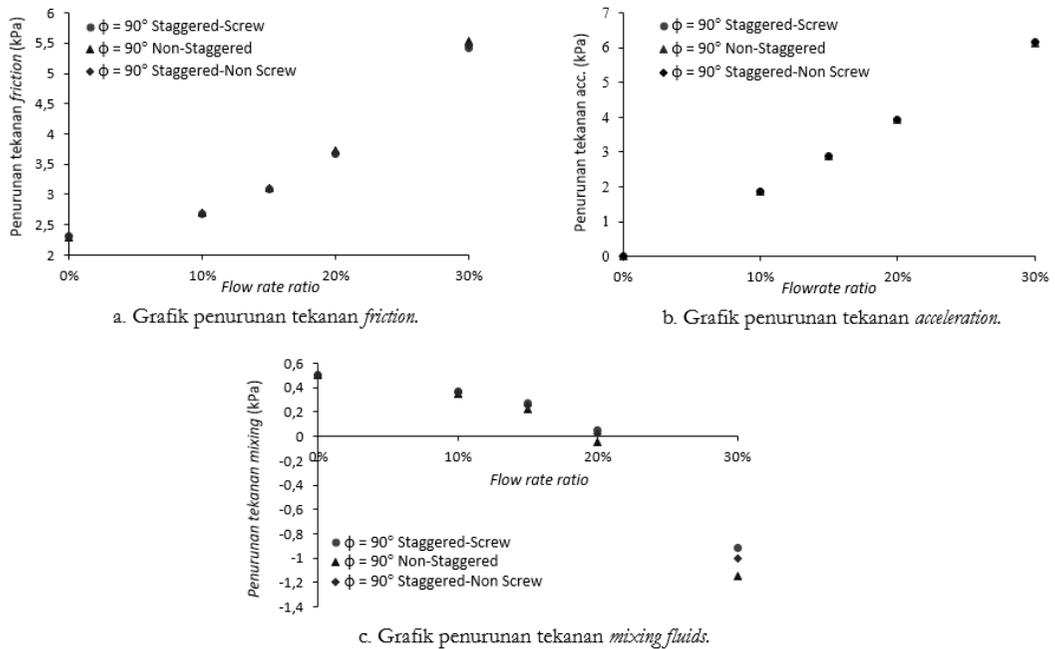
3.2. Variasi Pola Distribusi Lubang

Investigasi kedua yang dilakukan adalah pengaruh pola distribusi lubang dengan sudut fasa lubang perforasi 90°. Pola distribusi lubang yang akan dilakukan perbandingan adalah *staggered* model *screw*, *staggered* model *non-screw* dan *non-staggered* (posisi lubang sejajar). Jarak antar lubang mulai dari ujung pipa adalah sama besar pada masing-masing baris lubang. Geometri masing-masing pola distribusi lubang ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Pola distribusi lubang

Gambar 14 adalah grafik perbandingan masing-masing komponen penurunan tekanan untuk variasi pola distribusi lubang dengan sudut fasa lubang perforasi dan *perforation density* yang sama.



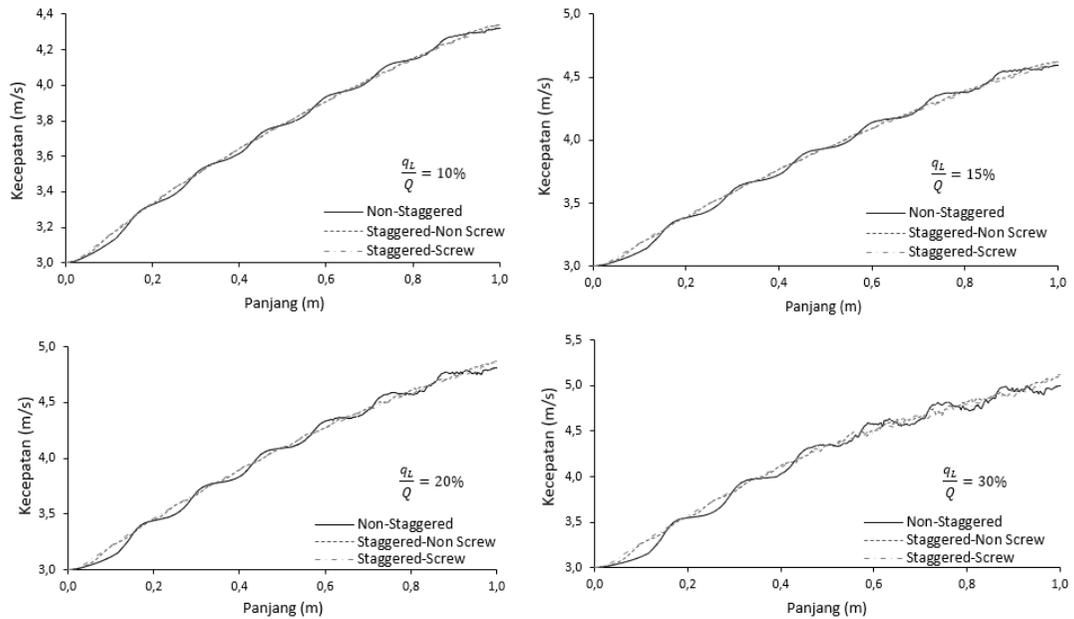
Gambar 14. Penurunan tekanan *friction*, *acceleration* dan *mixing fluids* pada variasi pola distribusi lubang

Pada kondisi *flow rate ratio* 0% (*tanpa radial inflow*) untuk ketiga pola distribusi lubang memiliki perbedaan penurunan tekanan yang juga saling berdekatan seperti pada variasi sudut fasa atau rata-rata sebesar 0,07% karena memiliki *perforation density* yang sama. Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 14a terlihat bahwa pola distribusi lubang *non-staggered* memiliki penurunan tekanan *friction* yang paling tinggi dibandingkan dengan kedua model lainnya tetapi secara keseluruhan tidak berpengaruh signifikan sedangkan pada Gambar 14b untuk penurunan tekanan *acceleration* adalah sama dengan variasi sudut fasa yaitu linear terhadap *flow rate ratio* karena *acceleration* disebabkan oleh perubahan momentum yang hanya dipengaruhi oleh densitas dan kecepatan fluida.

Pengaruh terbesar pada variasi pola distribusi lubang perforasi adalah penurunan tekanan *mixing fluids*. Pada Gambar 14c terlihat bahwa semakin besar *flow rate ratio* maka semakin kecil penurunan tekanan *mixing fluids* yang terjadi. *Critical limit* pada variasi pola distribusi lubang adalah sama dengan *critical limit* pada variasi sudut fasa yaitu terjadi pada *flow rate ratio* 20% karena geometri pipa memiliki *perforation density* yang sama. Penurunan tekanan *mixing fluids* setelah melewati *critical limit* memiliki nilai negatif yang mengindikasikan bahwa *radial inflow* menurunkan penurunan tekanan total. Pada Gambar 14c juga menunjukkan bahwa pola distribusi lubang model *non-staggered* memiliki efek *mixing* yang paling rendah dan hal ini sesuai dengan profil kecepatan *main flow* di dalam pipa berlubang yang mengalami perubahan akibat adanya *radial inflow*.

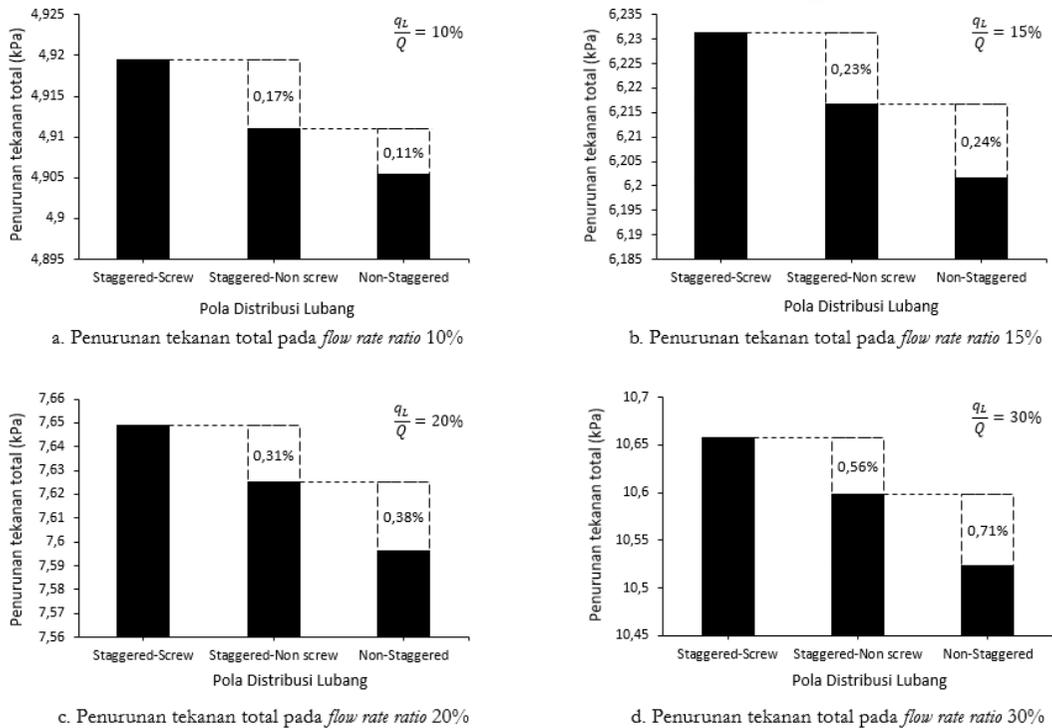
Pada Gambar 15 memperlihatkan profil kecepatan untuk pola distribusi lubang *staggered* baik model *screw* maupun *non-screw* terlihat sama sementara untuk pola distribusi lubang model *non-staggered* grafik profil kecepatan terlihat naik turun atau bergelombang akibat pengaruh *radial inflow* yang bertabrakan dengan *main flow* di dalam pipa sesuai dengan distribusi lubang perforasinya. Hal ini dikarenakan geometri dari pola distribusi lubang *non-staggered* yang semua lubangnya sejajar dan saling berhadapan di sekeliling pipa pada jarak yang sama yaitu setiap 0,143

m disepanjang pipa sementara untuk *staggerred-screw* lubang perforasi berada pada setiap 0,04 m dengan posisi lubang tidak ada yang saling berhadapan dengan lubang lainnya di jarak yang sama sedangkan pola distribusi *staggerred-non screw* berada pada setiap 0,077 m dengan posisi lubang yang berhadapan sebanyak dua lubang di jarak yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Dari ketiga pola distribusi lubang dapat dilihat jika jarak antar lubang untuk geometri pola distribusi lubang *non-staggerred* adalah lebih besar dari dua pola lainnya sehingga profil kecepatan pada pipa berlubang dengan sudut fasa dan *perforation density* yang sama dipengaruhi oleh pola distribusi lubang yang digunakan.



Gambar 15. Profil kecepatan pada masing-masing *flow rate ratio*

Pada Gambar 16 menunjukkan bahwa pola distribusi lubang *non-staggerred* memiliki penurunan tekanan total yang paling rendah pada masing-masing *flow rate ratio*. Meskipun pola distribusi *non-staggerred* memiliki penurunan tekanan *friction* yang lebih tinggi dari kedua pola distribusi *staggerred* (*screw* dan *non screw*) tetapi pengaruh penurunan tekanan *mixing fluids* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14c menyebabkan penurunan tekanan total pada pola distribusi lubang *non-staggerred*.



Gambar 16. Penurunan tekanan total pada pola distribusi lubang

4. KESIMPULAN

Dari hasil simulasi untuk karakteristik aliran fluida secara *axial flow* dan *radial inflow* yang melalui pipa berlubang sebagai ilustrasi aliran fluida di dalam sumur horisontal maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Pengaruh sudut fasa lubang perforasi terhadap penurunan tekanan total:
 - Pada kondisi tidak ada *radial inflow* (*flow rate ratio* 0%) ketiga sudut fasa lubang perforasi memiliki perbedaan penurunan tekanan total rata-rata sebesar 0,08% dan perbedaan penurunan tekanan total ketiga sudut fasa terhadap pipa biasa (tanpa lubang) pada tiga kondisi kecepatan *inlet* (*axial flow*) secara berturut-turut adalah 10,65%, 8,94% dan 9,41%.
 - Pada *flow rate ratio* 10%, 15%, 20% dan 30% pengaruh *radial inflow* menunjukkan sudut fasa 60° memiliki penurunan tekanan total yang paling rendah dibandingkan dengan sudut fasa 90° maupun 180° dan sudut fasa 60° secara berturut-turut memiliki perbedaan penurunan tekanan total sebesar 3,77%, 5,10%, 3,88% dan 1,20% terhadap sudut fasa yang memiliki penurunan tekanan total yang paling tinggi. Penurunan tekanan total yang terjadi di dominasi oleh komponen penurunan tekanan *mixing fluids* dibandingkan dua komponen penurunan tekanan lainnya.
- Pengaruh pola distribusi lubang perforasi terhadap penurunan tekanan total:
 - Pada kondisi tidak ada *radial inflow* (*flow rate ratio* 0%) ketiga pola distribusi lubang perforasi memiliki perbedaan penurunan tekanan total rata-rata sebesar 0,07%.

- Pada *flow rate ratio* 10%, 15%, 20% dan 30% pengaruh *radial inflow* menunjukkan bahwa pola distribusi lubang model *non-staggered* memiliki penurunan tekanan total yang paling rendah dibandingkan dengan pola distribusi lubang kedua model *staggered* (*screw* dan *non screw*) dan pola distribusi lubang *non-staggered* secara berturut-turut memiliki perbedaan penurunan tekanan total sebesar 0,28%, 0,47%, 0,69% dan 1,27% terhadap pola distribusi lubang yang memiliki penurunan tekanan paling tinggi. Penurunan tekanan total yang terjadi juga di dominasi oleh komponen penurunan tekanan *mixing fluids* seperti pada variasi sudut fasa.
3. Penurunan tekanan total yang terjadi pada pipa berlubang dengan *perforation density* yang sama tergantung dari *flow rate ratio*. Semakin besar *flow rate ratio* maka semakin besar penurunan tekanan total pada pipa berlubang. Penelitian lebih lanjut terkait hal ini dapat dilakukan dengan mengganti *boundary condition* untuk mencari diameter lubang yang optimum sesuai desain pipa berlubang yang diinginkan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Abdulwahid, M. A., Dakhil, S. F., Niranjan Kumar, I. N., 2013, Numerical Simulation of Flow Through a Wellbore for Horizontal Wells, WIT Transactions on Modelling and Simulation, Vol 55.
- Abdulwahid, M. A., Dakhil, S. F., Niranjan Kumar, I. N., 2013, Numerical Investigation of The Turbulent Flow Parameters Distribution in A Partly Perforated Horizontal Wellbore, European Scientific Journal Vol.9, No.33.
- Abdulwahid, M. A., Niranjan Kumar, I. N., Dakhil, S. F., 2014, Influence of Radial Flux Inflow Profile on Pressure Drop of Perforated Horizontal Wellbore, Journal of Energy Resources Technology-136(4):1~7.
- Ansys Inc., 2018, ANSYS Workbench User's Guide, ANSYS.
- Asheim, H., Kolnes, J., Oudemans, P., 1992. A Flow Resistance Correlation for Completed Wellbore, J. Petrol. Sci. Eng. 8 (2),97-104.
- Azadi, M., Aminossadati, S. M., Chen, Z., 2017, Development of an Integrated Reservoir-Wellbore Model to Examine the Hydrodynamic Behaviour of Perforated Pipes, Journal of Petroleum Science and Engineering.
- Dikken, B. J., 1990, Pressure Drop in Horizontal Wells and Its Effect on Production Performance, JPT, November, pp. 1426-1433.
- Haaland, S. E., 1983, Simple and Explicit Formulas for the Friction Factor in Turbulent Pipe Flow, Journal of Fluids Engineering 10: 589-590.
- Jianguang, W., Xuesong, L., Xuemei, L., Yuanyuan, M., 2017, The Experimental and Model Study on Variable Mass Flow for Horizontal Wells with Perforated Completion, Journal of Energy Resource Technology.
- Ouyang, L. B., Arbabi, S., Aziz, K., 1998, A Single-Phase Wellbore-Flow Model for Horizontal, Vertical, and Slanted Wells, SPE-Journal, 3(2):124~133.
- Ouyang, L. C., Sun, D., Ouyang, L. B., 2009, Numerical Investigation of the Impacts of Wall Fluid Entry on Fluid Flow Characteristics and Pressure Drop along a Wellbore, Petroleum Science and Technology, 27:18, 2109-2133.
- Rashad, Z. M., Abdulwahid, M., Abdhassan, Q., 2018, Comparison of Pressure Drop in Horizontal Wellbore for 90° and 180° Perforation Phasing, Seventh International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering - CSM 2018.

- Salim, M. K., Sultan, H. S., Al-Shara, A. K. M., 2017, Effect of Shape and Parameters of Perforation in a Vertical Wellbore with Two Perforations (Without Porous Media) on Pressure Drop, Fluid Mech Open Acc 4: 162.
- Su Z., Gudmundsson J. S., 1998, Perforation Inflow Reduces Frictional Pressure Loss in Horizontal Wellbores, Journal of Petroleum Science and Engineering.
- Su, Z., Gudmundsson, J. S., 1993, Friction Factor of Perforation Roughness in Pipes, SPE-26521.
- Su, Z., Gudmundsson, J. S., 1994, Pressure Drop in Perforated Pipes: Experiments and Analysis, SPE28800:563~574.