

Pengaruh Temperatur terhadap Pembentukan Vorteks pada Aliran Minyak Mentah dengan Metode Beda Hingga

Yuant Tiandho^{1,a)}, Syarif Hussein Sirait¹⁾, Herlin Tarigan¹⁾ dan Mairizwan¹⁾

¹⁾Departemen Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} yuanttiandho@gmail.com (corresponding author)

Abstrak

Aliran fluida merupakan salah satu faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam proses pengolahan minyak. Bentuk aliran fluida dipengaruhi oleh bilangan Reynolds fluida tersebut. Karena temperatur dapat mengubah viskositas dan densitas minyak mentah maka nilai bilangan Reynolds-nya juga akan dipengaruhi oleh temperatur. Nilai bilangan Reynolds sebagai fungsi temperatur dapat diturunkan dari model viskositas yang disusun oleh Alomair dkk. Dari hubungan antara temperatur terhadap bilangan Reynolds, kami mengamati proses pembentukan vorteks pada aliran minyak mentah dengan menggunakan metode beda hingga. Analisis dilakukan untuk minyak mentah yang terjebak dalam kotak dengan bagian atas bersinggungan dengan minyak mentah yang mengalir

Kata-kata kunci: fluida dinamis, termodinamika, minyak mentah, metode beda hingga

PENDAHULUAN

Berbagai karakteristik fisis minyak mentah seperti densitas, viskositas, dan bilangan Reynolds merupakan faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam proses eksplorasi, produksi dan transportasi minyak. Dengan menggunakan berbagai karakteristik fisis tersebut maka bentuk aliran minyak mentah dapat diperhitungkan dengan baik sehingga dapat menjadi acuan dalam desain berbagai fasilitas perminyakan, perhitungan efisiensi produksi, dan prediksi *recovery* minyak [1,2].

Hubungan antara karakteristik fisis minyak mentah dengan termodinamika merupakan topik yang banyak dipelajari dalam teknik perminyakan modern. Berbagai model seperti yang diajukan oleh Glaso [3], Elsharkawy [4], dan Alomair [5] telah membuktikan jika secara umum karakteristik fisis minyak mentah bergantung pada temperatur dan derajat *API*-nya. Hal ini mengindikasikan bahwa aliran minyak mentah secara implisit dipengaruhi oleh temperatur.

Untuk mendeskripsikan bentuk aliran suatu fluida dapat dilakukan dengan memecahkan persamaan Navier-Stokes. Salah satu metode yang memungkinkan untuk memperoleh solusi dari persamaan tersebut dengan menggunakan metode beda hingga. Di dalam makalah ini pemecahan persamaan Navier-Stokes dilakukan dengan tujuan untuk memahami proses pembentukan vorteks pada aliran minyak mentah berdasarkan variasi temperatur.

Adapun sistematika penulisan makalah ini sebagai berikut, pada Bagian 2 akan dibahas tentang kaitan antara bilangan Reynolds minyak mentah dengan temperatur. Bilangan Reynolds merupakan bilangan yang menentukan bentuk aliran fluida karena secara eksplisit mengandung variabel densitas dan viskositasnya. Pada Bagian 3 skema pembentukan vorteks dan algoritma pemecahan persamaan Navier-Stokes dengan metode beda hingga akan dibahas lebih detail. Selanjutnya pada Bagian 4 akan dijabarkan hasil dari simulasi yang dilakukan dan sebagai penutup akan disampaikan kesimpulan dari makalah ini.

EFEK TEMPERATUR PADA BILANGAN REYNOLDS MINYAK MENTAH

Di dalam mekanika fluida, bilangan Reynolds adalah suatu kuantitas tak berdimensi yang digunakan untuk memperkirakan pola aliran fluida. Bilangan Reynolds didefinisikan sebagai rasio antara gaya inersia terhadap gaya viskos atau secara matematis dituliskan,

$$Re = \frac{\rho v_s L}{\mu} \tag{1}$$

dimana ρ adalah densitas fluida, v_s adalah kecepatan fluida, L adalah panjang karakteristik, dan μ adalah viskositas dinamis fluida. Selanjutnya kami menggunakan nilai v_s dan L sama dengan satu untuk menyederhanakan perhitungan. Apabila nilai dari viskositas dan densitas minyak mentah dapat dinyatakan sebagai fungsi temperatur maka dapat diperoleh ungkapan bilangan Reynolds sebagai fungsi temperatur secara eksplisit.

Di dalam makalah ini kami memilih model viskositas yang diajukan oleh Alomair [5]. Pemilihan ini berdasarkan tingkat akurasi yang cukup tinggi ketika dibandingkan dengan data eksperimen viskositas minyak mentah. Adapun rumusan viskositas sebagai fungsi temperatur pada minyak mentah menurut model Alomair adalah,

$$\ln(\ln \mu) = 0,07547 + \frac{5,76588}{\ln(API)} - 0,00101(1,8T + 32) \times \ln(1,8T + 32) \tag{2}$$

dimana T adalah temperatur minyak mentah dan API adalah suatu skala yang dikembangkan oleh *American Petroleum Institute* untuk mengukur densitas relatif berbagai jenis cairan. API didefinisikan sebagai,

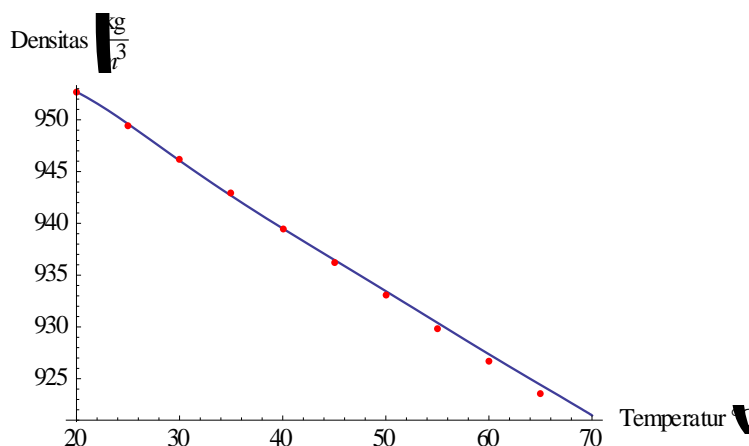
$$API = \frac{141,5}{\rho_{API}} - 131,5 \tag{3}$$

dimana ρ_{API} adalah densitas minyak pada temperatur 15,6°C dan kondisi tekanan atmosfer. Dari skala API dapat digolongkan beberapa jenis minyak mentah yaitu, ringan ($API > 31,1$), medium ($22,3 < API < 31,1$) dan berat ($API < 22,3$). Selanjutnya pada makalah ini kami memilih minyak mentah golongan berat dengan nilai $API = 22$. Adapun untuk pembahasan mengenai aliran minyak mentah pada bilangan API yang berbeda dapat dilakukan dengan metode yang analogi.

George dkk. telah memperoleh data eksperimen densitas minyak mentah pada berbagai temperatur (rentang 20 - 70°C) [2]. Dengan menggunakan data tersebut kami mencoba melakukan metode *fitting* grafik dan memperoleh kesimpulan bahwa hubungan antara densitas minyak berat dengan temperatur diberikan oleh,

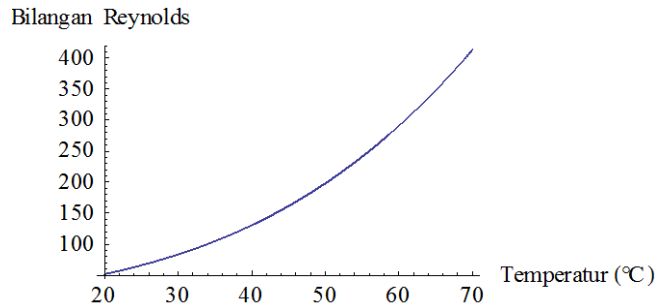
$$\rho = -7,63 \times 10^{-9} T^6 + 2,208 \times 10^{-6} T^5 - 2,587 \times 10^{-4} T^4 + 0,01564 T^3 - 0,51035 T^2 + 7,80486 T + 910,43943 \tag{4}$$

Sebagai perbandingan antara plot data eksperimen dengan model yang kami ajukan dapat dilihat pada Gambar 1. Melalui perbandingan tersebut tampak bahwa dalam rentang temperatur 20 - 70°C akurasi model cukup tinggi. Pada temperatur yang lebih tinggi pemodelan densitas minyak mentah semakin sulit untuk dilakukan karena akan terjadi perubahan fasa minyak mentah.



Gambar 1. Grafik perbandingan antara densitas model dengan data eksperimen untuk minyak mentah API=22.

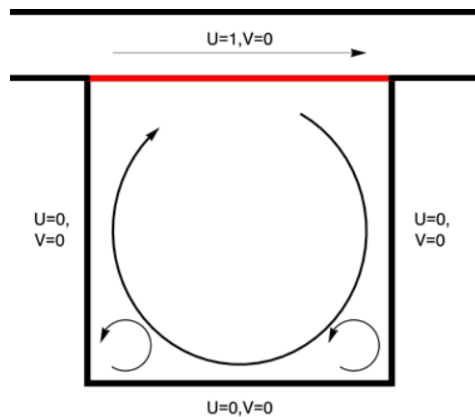
Dengan menggunakan hubungan antara viskositas dan densitas terhadap temperatur di atas maka grafik bilangan Reynolds terhadap temperatur diberikan oleh Gambar 2. Dari hasil tersebut tampak bahwa semakin tinggi temperatur minyak mentah maka makin tinggi pula bilangan Reynolds-nya.



Gambar 2. Grafik hubungan antara bilangan Reynolds dengan temperatur minyak mentah (API=22).

SKEMA PEMBENTUKAN VORTEKS

Analisis pembentukan vorteks dalam makalah ini dilakukan pada aliran minyak mentah yang terjebak dalam suatu kotak dengan salah satu bagian sisinya bersinggungan dengan minyak yang mengalir secara laminar seperti tampak pada Gambar 3. Untuk menyederhanakan proses kalkulasi maka kami memilih sistem yang berada pada keadaan tunak dan dari Gambar 3 tampak bahwa analisis memenuhi persoalan 2 dimensi saja.



Gambar 3. Skema pembentukan vorteks. Garis merah menandakan sisi singgung antara minyak yang mengalir dengan minyak yang terjebak dalam kotak

Secara umum aliran suatu fluida memenuhi persamaan Navier-Stokes,

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{g} \tag{5}$$

dimana \mathbf{u} adalah kecepatan vektor fluida, p adalah tekanan, ρ adalah densitas, ν adalah viskositas kinetik dan \mathbf{g} merupakan implikasi dari gaya eksternal. Karena hanya dilakukan kalkulasi untuk 2 dimensi (keadaan tunak) dan minyak yang mengalir bersifat laminar maka persamaan Navier-Stokes di atas dapat direduksi dalam 3 buah persamaan,

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{dp}{dx} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\left(\frac{1}{\rho}\right) \frac{dp}{dy} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \tag{6}$$

Dengan menggunakan definisi bilangan Reynolds pada pers. (1) dan dengan melakukan transformasi sehingga parameter kecepatan, tekanan, dan panjang menjadi tak berdimensi,

$$\mathbf{u} \rightarrow \frac{\mathbf{u}}{u_0}, v \rightarrow \frac{v}{u_0}, p \rightarrow \frac{p}{(\rho u_0^2)}, x \rightarrow \frac{x}{L}, y \rightarrow \frac{y}{L} \tag{7}$$

dimana u_0 adalah kecepatan karakteristik fluida dan L adalah panjang karakteristik pipa maka ketiga persamaan di atas dapat dinyatakan sebagai,

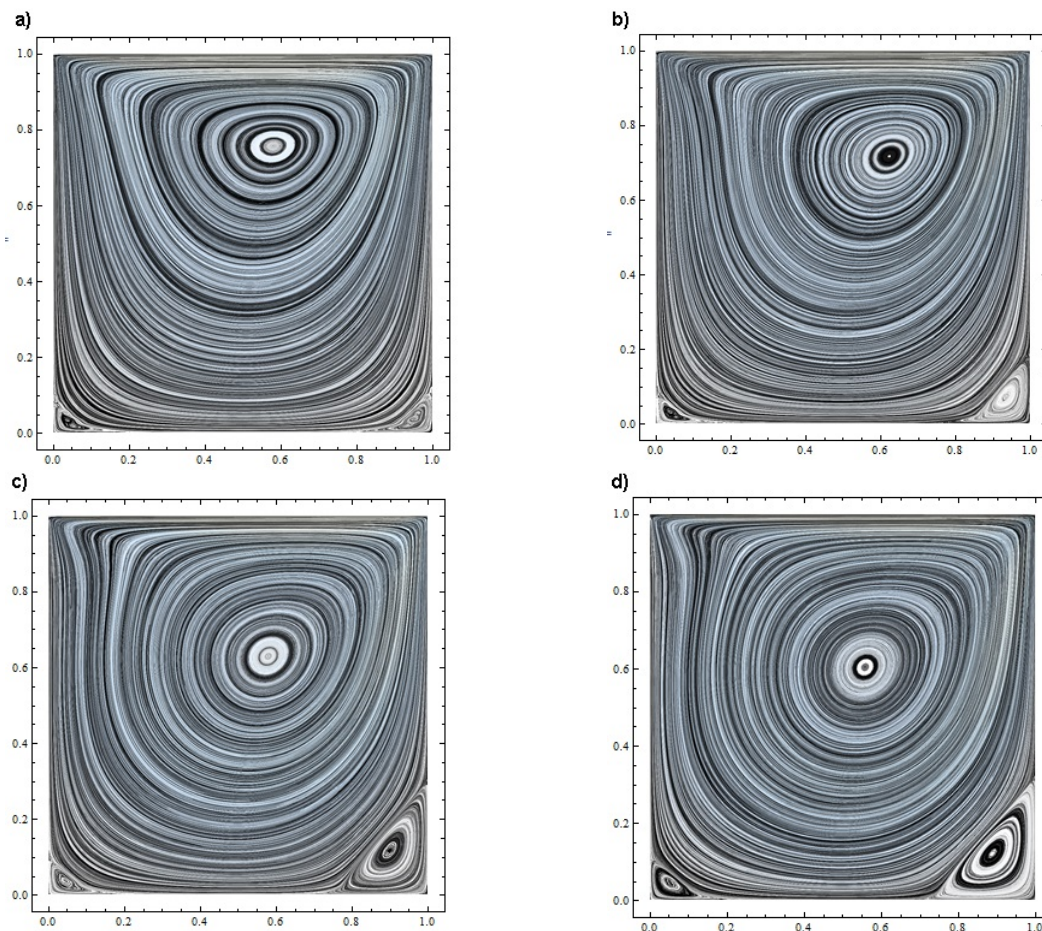
$$\begin{aligned}
 u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{dp}{dx} + \left(\frac{1}{\text{Re}}\right) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \\
 u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{dp}{dy} + \left(\frac{1}{\text{Re}}\right) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \\
 \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Solusi analitik dari ketiga persamaan di atas untuk sistem aliran fluida pada Gambar 3 sulit untuk diperoleh. Sehingga salah satu alternatif yang memungkinkan untuk dapat digunakan adalah melalui metode numerik. Algoritma yang kami gunakan dalam makalah ini merujuk pada algoritma yang disusun oleh Mokashi [6] sebagai berikut,

1. Membuat domain dan mendiskritisasinya sehingga solusi $u(x)$ dihitung untuk tiap titik diskrit x_i atau dengan kata lain solusi yang diperoleh merupakan solusi pada $u(x_i)$.
2. Solusi diferensial dinyatakan sebagai kombinasi linear dari $u(x_i)$.
3. Sistem final diubah dari sistem yang merupakan persamaan diferensial menjadi sistem persamaan aljabar untuk $u(x_i)$ dimana hal ini dapat diselesaikan dengan menggunakan *root finding algorithm*.

PEMBENTUKAN VORTEKS MINYAK MENTAH TERHADAP TEMPERATUR

Dengan menggunakan algoritma di atas dan data bilangan Reynolds pada Gambar 2, maka diperoleh hasil pembentukan vorteks untuk beberapa temperatur minyak mentah (API = 22) seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Vorteks yang terbentuk pada minyak mentah (API = 22) untuk berbagai temperatur: a) 20°C, b) 40°C, c) 60°C, dan d) 70°C

Dari hasil tersebut tampak bahwa temperatur memiliki peranan yang cukup signifikan dalam menentukan bentuk aliran minyak mentah. Pada temperatur 20°C vorteks yang berukuran besar (pusat) memiliki bentuk yang relatif simetris. Selain itu terdapat dua vorteks kecil yang berada pada sudut kanan (ukuran sekitar 0,1) dan kiri bawah (ukuran sekitar 0,1). Adapun pada temperatur 40°C dapat dilihat bahwa vorteks pusat mulai tidak simetris dan ukuran vorteks kecil pun makin membesar. Kondisi ini terus berlanjut hingga temperatur 70°C, pada temperatur ini tampak bahwa vorteks pusat semakin tertarik ke sisi kiri atas sebagai indikasi adanya calon vorteks baru. Selain itu juga tampak bahwa ukuran vorteks kecilnya mencapai ukuran terbesar yaitu 0,3. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi temperatur minyak mentah maka dapat menyebabkan proses pembentukan vorteks yang semakin besar.

Hasil ini dapat dipahami sebagai akibat perubahan bilangan Reynolds terhadap temperatur. Semakin tinggi nilai bilangan Reynolds maka viskositasnya juga makin rendah. Viskositas yang rendah mengindikasikan bahwa minyak mentah makin mudah untuk bergerak dibandingkan minyak mentah yang memiliki viskositas lebih besar. Adapun perubahan ukuran vorteks kecil menjadi makin besar seiring kenaikan temperatur dapat dipandang sebagai akibat hukum kekekalan momentum pada aliran minyak mentah.

KESIMPULAN

Berbagai karakteristik fisis minyak mentah seperti viskositas dan densitas dipengaruhi oleh temperatur. Hal ini menyebabkan bilangan Reynolds yang mendeskripsikan pola aliran suatu fluida juga dapat dinyatakan dalam fungsi temperatur. Dengan memecahkan persamaan Navier-Stokes melalui metode beda hingga kami telah berhasil menggambarkan pembentukan vorteks pada aliran minyak mentah untuk temperatur yang berbeda-beda. Semakin tinggi temperatur maka vorteks yang terbentuk akan semakin besar dan semakin tidak simetris.

REFERENSI

1. S.J. Ball, A.R.H. Goodwin, dan J.P.M Trusler, *Phase Behavior and Physical Properties of Petroleum Reservoir Fluids from Acoustic Measurements*, J. Petrol. Sci. Eng. **34** (2002): 1-11.
2. A.K. George, R.N. Singh, dan S. Arafin, *Equation of State of Crude Oil Samples*, J. Pet. Environ. Biotechnol. **4** (2013): 1000162.
3. O. Glaso, *Generalized Pressure-Volume Temperature Correlations*, J. Pet. Technol. **32** (1980):785-795.
4. A.M. Elsharkawy dan A.A. Alikhan, *Models for Predicting the Viscosity of Middle East Crude Oils*, Fuel **78** (1999): 891-903.
5. O. Alomair, A. Elsharkawy, dan H. Alkandari, *A Viscosity Prediction Model for Kuwaiti Heavy Crude Oils at Elevated Temperatures*, J. Petrol. Sci. Eng. **120** (2014): 102-110.
6. P. Mokashi, *Using Mathematica to Simulate and Visualize Fluid Flow in a Box*, <http://blog.wolfram.com/2013/07/09/using-mathematica-to-simulate-and-visualize-fluid-flow-in-a-box/>, diakses pada 14 November 2015.