

# Studi Pengaruh *Tubing* pada Performa *In-Situ Well Repair* Menggunakan Material *Polyacrylamide* dengan *Coupled CFD-FEM*

Arifa Nuriyani, Mas Irfan P. Hidayat, Sungging Pintowantoro, dan Sonny Irawan  
Departemen Teknik Material, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: masirfan.ph@gmail.com

**Abstrak**—*Tubing* N80 sering digunakan sebagai *production tubing*, namun sering dilaporkan sering mengalami kebocoran akibat kontak langsung dengan fluida. Beberapa faktor penyebab kebocoran *tubing* ini yaitu perbedaan temperatur dan tekanan yang berlebih. Terdapat teknologi terbaru yaitu metode *patch repair* dengan menggunakan material non-logam, polimer *superabsorbent*. Polimer yang digunakan adalah *Polyacrylamide*, yang memiliki sifat unik dalam menyerap dan memelihara aliran fluida bertekanan. Akibat keterbatasan informasi tentang teknologi ini, maka mulai dikembangkan simulasi *patch* terhadap kebocoran *tubing*. Dalam penelitian ini akan menganalisis distribusi thermal dan deformasi pada *tubing* beserta *patch*-nya, dengan temperatur operasi yang berbeda. Pembuatan geometri dan simulasi dilakukan dengan menggunakan *software ANSYS Mechanical APDL Release 18.0* berdasarkan metode elemen hingga. Penelitian ini diharapkan dapat membantu industri minyak dan gas mensimulasikan kinerja *patch* terhadap kebocoran *tubing*, sebelum dilakukan secara praktik.

**Kata Kunci**—*Leaking Repair, Patch, Polyacrylamide, Superabsorbent, Tubing*

## I. PENDAHULUAN

INDUSTRI *oil and gas* melakukan pengeboran sumur untuk mendapatkan hidrokarbon dari *reservoir* menuju permukaan. Agar mutu hidrokarbon dari sumur ini terjaga dengan baik dan produksi terus tetap dilakukan, siklus *lifetime* sebuah sumur harus tetap dijaga. Terdapat 5 tahap proses pengeboran sumur yaitu eksplorasi, penilaian, pengembangan, produksi, dan pembuangan. Tahap produksi adalah tahap yang paling penting ketika dilakukan pengaliran hidrokarbon dari formasinya di dalam tanah. Dalam era ini, industri *oil and gas* melaporkan permasalahan yang cukup signifikan mempengaruhi produksi minyak bumi dan gas alam. Banyak industri *oil and gas* memiliki laporan bahwa adanya kebocoran pada *casing*, salah satu komponen yang mengalami kebocoran adalah *tubing* yang terekspos secara langsung dengan hasil produksi. *Tubing* yang mengalami kebocoran ini disebabkan oleh korosi, *sand blasting*, perbedaan temperatur, adanya *shrinkage*, dan tekanan yang berlebih. Kebocoran ini dapat

memberikan efek bocornya hasil produksi dari *tubing* selama proses produksi berlangsung. Maka, *tubing* harus ditutup [1].

Namun, metode konvensional untuk memperbaiki sumur pada aplikasinya membutuhkan biaya yang mahal, banyak waktu, dan beresiko pada pengerjaan *rig* karena telah menghentikan atau harus melakukan *shutdown* pada sumur bor. Metode ini adalah dengan mengganti *tubing* produksi dan *packer*, lalu menjalankan kembali proses yang sempat terhenti. Selain itu, terdapat metode penambalan *casing* yang kurang praktis dan membuat *tubing* produksi beroperasi pengerjaan selanjutnya sulit dilakukan [2].

Polimer *superabsorbent* merupakan metode yang mulai dikembangkan dalam berbagai bidang, seperti pertanian, produk kebersihan, pengolahan air limbah, bahan penyegel, dan peningkatan perbaikan mutu minyak. Karena polimer ini memiliki sifat yang unik yaitu mampu menyerap dan memelihara sejumlah besar fluida yang bertekanan tertentu dan dapat digunakan untuk mencegah atau membatasi aliran fluida terhadap kebocoran pada *tubing*. Material polimer *superabsorbent* yang digunakan adalah *Polyacrylamide* [3]. Oleh karena itu, perlu adanya simulasi analisis numerik tentang polimer *superabsorbent* ini terhadap variasi temperatur aliran fluida berupa minyak mentah dari *reservoir* tanpa menghentikan atau *shutdown* proses produksi yang sedang berlangsung. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh temperatur *tubing* terhadap kemampuan *patch repair polyacrylamide* dan temperatur optimum *tubing* yang paling tepat untuk dilakukan *patch repair* menggunakan *polyacrylamide*.

## II. METODE PENELITIAN

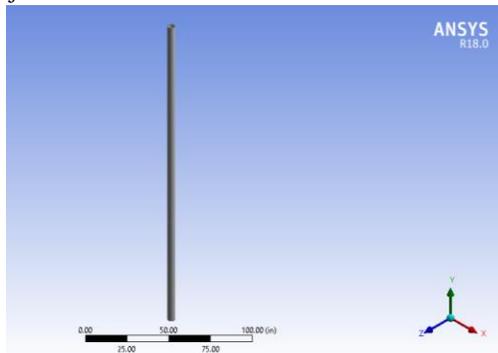
### A. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat lunak (*software*) berbasis elemen hingga yaitu *ANSYS Workbench Release 18.0* dengan modul *Fluent* dan *Transient Structural* yang digunakan untuk membuat permodelan geometri dan memodelkan simulasi *in-situ well repair* dengan menggunakan material *polyacrylamide*.

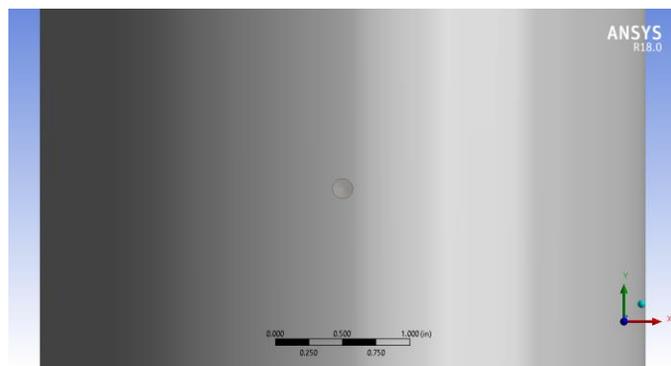
### B. Geometri

Geometri yang digunakan pada penelitian ini adalah *tubing*

N80 dengan permukaan berlubang sebanyak 5 buah. Masing-masing lubang memiliki diameter sebesar 0,15 inci. Posisi lubang pada *tubing* N80 yaitu 3 lubang berada di permukaan bawah berdasarkan tampak depan, dan 2 lubang berada di permukaan atas berdasarkan tampak belakang. Antarlubang memiliki jarak sebesar 36 inci.



Gambar 1. Geometri *Tubing* N80 Tampak Depan



Gambar 2. Geometri *Patch*

C. *Material Properties*

Pada penelitian, material yang disimulasikan adalah tubing dengan grade N80. N80 adalah salah satu jenis baja karbon yang hanya memiliki sedikit unsur paduan. N80 memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi Material Tubing N80 [4]

<i>Material Specifications</i>	<i>Value</i>
<i>Density</i>	8030 kg/m <sup>3</sup>
<i>Min. Yield Strength</i>	552 MPa
<i>Max. Yield Strength</i>	758 MPa
<i>Min. Tensile Strength</i>	689 MPa
<i>Max. Hardness</i>	-
<i>Total Elongation under Load (%)</i>	0,500
<i>Young Modulus</i>	207.000 MPa
<i>Specific Heat</i>	502,48 J/kg.K
<i>Thermal Conductivity</i>	16,27 W/m.K
<i>Heat Transfer Coefficient</i>	150 W/m <sup>2</sup> .K
<i>OD</i>	4,5 inch
<i>Wall Thickness</i>	0,271 inch
<i>Length</i>	18 feet

Dalam penelitian ini, *polyacrylamide* digunakan sebagai material *patch repair* dengan sifat mekanik sebagai berikut:

Tabel 2. Sifat Material *Polyacrylamide* [5]

<i>Material Specifications</i>	<i>Value</i>
<i>Density</i>	1189 kg/m <sup>3</sup>
<i>Young Modulus</i>	7111 Pa
<i>Poisson's Ratio</i>	0,48
<i>Specific Heat</i>	3810 J/kg.K
<i>Thermal Conductivity</i>	0,56 W/m.K
<i>Molar Cohesive Energy</i>	39.800 J/mol

Selain itu terdapat sifat dari material fluida yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

Tabel 3. Sifat Minyak Mentah dan Gas Alam [6]

<b>Minyak Mentah</b>	
<i>Material Specifications</i>	<i>Value</i>
<i>Density</i>	960 kg/m <sup>3</sup>
<i>Specific Heat</i>	1880 J/kg.K
<i>Thermal Conductivity</i>	0,12 W/m.K
<i>Viscosity</i>	0,048 kg/m.s
<i>Molecular Weight</i>	258,19 kg/kmol
<b>Gas Alam</b>	
<i>Material Specifications</i>	<i>Value</i>
<i>Density</i>	0,6679 kg/m <sup>3</sup>
<i>Standard State Enthalpy</i>	-7,489518e+007 J/kmol
<i>Thermal Conductivity</i>	0,0332 W/m.K
<i>Viscosity</i>	1,087e-005 kg/m.s
<i>Molecular Weight</i>	16,04303 kg/kmol

D. *Pengaturan Permodelan*

1) *Analisis Modul Fluent*

Dalam melakukan simulasi permodelan *tubing* N80, langkah pertama yang dilakukan adalah menentukan *General Setup* yaitu tipe pembebanan yang digunakan berdasarkan tekanan dan tidak bergantung pada waktu. Kecepatan fluida yang mengalir adalah absolut. Percepatan gravitasi bumi yang digunakan adalah 9,8 m/s<sup>2</sup>. Nilai minus menunjukkan arah percepatan menjauhi pusat bumi.

Pada *Setup* selanjutnya, simulasi ini menggunakan model fluida *multiphase* dengan tipe *volume of fluid*, *energy* diaktifkan, dan *viscous* fluida dengan tipe laminar dalam *tubing*.

*Material properties* dapat diatur dalam menu setup ini, dengan menginput data dari Tabel 1. dan 2. sebagai *solid material* serta 3. sebagai *fluid material*. *Setup* dari *Cell Zone Conditions* dan *Boundary Conditions* disesuaikan dengan hasil *meshing* pada prosedur sebelumnya. Pada *inlet*, diatur dengan tipe *velocity-inlet* dan terdapat kondisi operasi berupa kecepatan 0,24 m/s (konstan) serta temperatur dalam tabulasi Thermal diinput sesuai dengan variabel bebas yang akan dianalisis. Sedangkan pada pengaturan nama interior menyesuaikan prosedur *meshing* sebelumnya. Pada *outlet*, simulasi ini diatur dengan tipe *pressure-outlet*. Kondisi *wall* diatur pada tabulasi thermal dengan nama material sebagai baja dengan nilai koefisien transfer panas sebesar 150 W/m<sup>2</sup>.K dan ketebalan tubing sebesar 0,271 inci. *Dynamic Mesh* dan

Reference Values dalam simulasi ini adalah pengaturan default.

Pada pengaturan Solution, metode analisis yang digunakan adalah pengaturan default dengan scheme berupa SIMPLE. Tabulasi controls juga diatur default.

2) Analisis Modul Transient Structural

Setelah melakukan analisis fluent, dapat dilakukan analisis thermal pada struktur tubing N80. Modul yang digunakan adalah transient structural dengan melakukan sistem coupling dari analisis fluent. Dalam analisis ini, pengaturan yang harus dilakukan yang pertama adalah meshing diperhalus dengan menggunakan refinement pada tubing, setelah itu meshing yang dilakukan pada analisis ini menggunakan fungsi curvature dengan kehalusan meshing sedang dengan menggunakan ukuran minimal meshing sebesar 0,01 inci pada tabulasi span angle center. Agar pada geometri patch terbentuk meshing yang halus, maka tabulasi inflation diatur dengan menggunakan smooth transition dengan maksimal sebanyak 15 layer.

Pada tabulasi transient, temperatur lingkungan di sekitar tubing sebesar variabel yang akan dianalisis. Analysis setting pada simulasi ini menggunakan step end time sebesar 22,86 detik.

E. Kondisi Temperatur Inlet

Variasi temperatur inlet yang diambil dari 323 K – 673 K (323 K, 373 K, 423 K, 473 K, 523 K, 573 K, 623 K, dan 673 K).

Variasi temperatur inlet yang diambil bertujuan untuk menunjukkan daya lekat patch yang masih baik atau tidak pada temperatur tinggi atau lebih rendah dari titik leleh polyacrylamide. Geometri yang dibuat selanjutnya di-meshing hingga memperoleh sebanyak 264.446 elemen dan 496.602 node. Geometri ini sesuai dengan simulasi karena tidak terjadi error analysis selama software bekerja. Apabila elemen dan node dari meshing jumlahnya kurang dari nilai tersebut, hal ini akan menyebabkan kurangnya keakuratan dalam perhitungan dan bentuk nyata dari geometri kurang terbentuk. Hal tersebut telah terjadi ketika meshing. Apabila elemen dan node berjumlah lebih banyak, software secara otomatis melaporkan error analysis.

F. Distribusi Thermal pada Analisis Modul Fluent

Berdasarkan analisis data yang diperoleh, dapat ditunjukkan bahwa fluida mengalami temperatur loss selama fluida mengalir di sepanjang tubing. Hal ini terjadi karena adanya perpindahan panas secara konveksi dari fluida bertemperatur lebih tinggi menuju dinding tubing dan patch. Distribusi thermal yang tidak merata diakibatkan adanya perbedaan material properties antara baja dengan polimer, yaitu memiliki titik lebur yang berbeda. Baja memiliki titik lebur >1.773 K dan polyacrylamide memiliki titik lebur >573 K, hal ini menyebabkan polyacrylamide akan mengalami defect pertama kali daripada tubing. Defect yang terjadi dapat berupa berkurangnya daya lekat patch, lepasnya patch, hingga patch meleleh. Sedangkan perpindahan panas antara tubing dan

patch terjadi secara konduksi [7]. Tubing N80 yang memiliki konduktivitas thermal yang lebih tinggi daripada polyacrylamide, menunjukkan bahwa tubing N80 semakin baik dalam menghantarkan panas. Oleh karena itu pada analisis fluent ditunjukkan temperatur fluida mengalami distribusi thermal yang merata di sepanjang tubing daripada di sekitar patch.

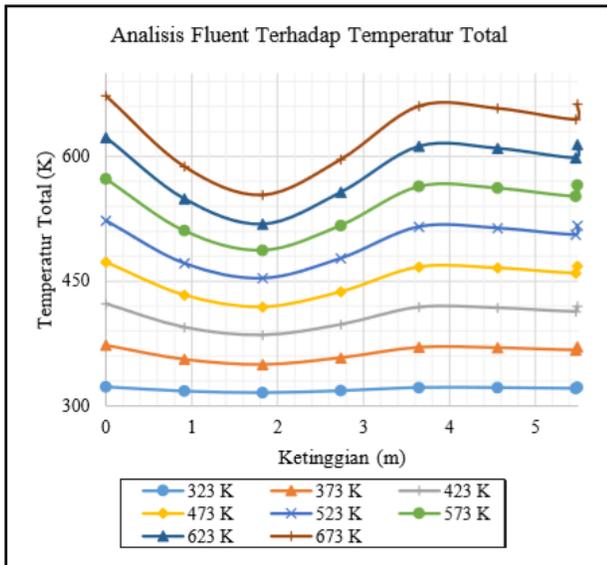
Beberapa patch repair yang dilakukan memiliki dampak pada distribusi thermal. Patch repair yang terbentuk akan menyebabkan tonjolan ke dalam tubing dan menyebabkan penyempitan area tubing. Fluida yang mengalir akan mendorong dan bergesekan dengan tonjolan patch, hal ini menyebabkan temperatur di sekitar tonjolan patch meningkat akibat gesekan dan pemampatan volume fluida. Temperatur loss masing-masing variabel dapat ditunjukkan pada tabel dan grafik sebagai berikut:

Tabel 4. Perbandingan Selisih Temperatur (ΔT) antar Titik

Temperatur Inlet (K)	323	373	423	473	523	573	623	673
0	-	-	-	-	-	-	-	-
0,911	5.18	16.88	28.2	39.51	51.32	62.31	73.7	84.9
5	5	9	2	4	5	7	8	3
1,822	1.82	6.267	9.39	14.28	18.01	23.48	30.5	34.3
9	9	9	5	5	7	8	8	8
2,734	-2.31	-	-12.6	-	-	-	-38.3	-42.7
4	-	8.147	-	18.21	23.95	29.93	-	-
3,645	-3.95	12.60	-20.9	29.85	38.02	46.83	-55.4	-64.2
9	-	-	-	-	-	-	-	-
4,557	0.17	0.547	0.93	1.265	1.671	2.057	2.45	2.74
4	1	-	6	-	-	-	6	-
5,468	0.80	2.549	4.28	6.045	7.793	9.52	11.2	13.0
8	3	-	2	-	-	-	7	1
5,486	-1.12	-	-6.00	-	-	-	-15.8	-18.2
4	-	3.565	-	8.439	10.89	13.32	-	-
ΔT(T <sub>in</sub> -T <sub>out</sub> )	0.61	1.945	3.27	4.608	5.943	7.278	8.61	9.93
	2	-	2	-	-	-	3	7

Tabel 5. Nilai Deformasi Total

Temperatur Inlet (K)	Deformasi Total Minimum (meter)	Deformasi Total Maksimum (meter)
323	0,000018791	0,00061733
373	0,000059599	0,001959
423	0,00010049	0,0032998
473	0,00013924	0,0046395
523	0,00018123	0,0059797
573	0,00022014	0,0073181
623	0,00026273	0,0086574
673	0,00029928	0,009994



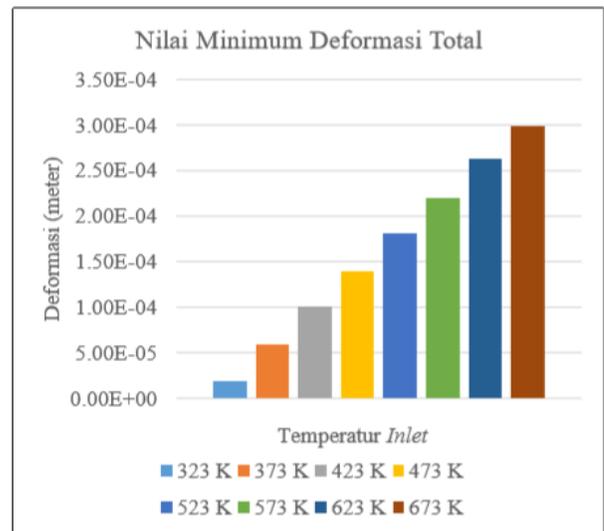
Gambar 3. Grafik Temperatur Total pada Analisis *Fluent* Selama Fluida Mengalir

Dari hasil analisis, temperatur *loss* terbesar terjadi pada temperatur *inlet* sebesar 673 K yaitu 9,937K dari temperatur *inlet* menuju *outlet*. Temperatur *tubing* yang terlalu panas akan membuat kemampuan lekat *patch* menurun. Oleh karena itu, kondisi temperatur *inlet* di atas 573 K tidak dianjurkan.

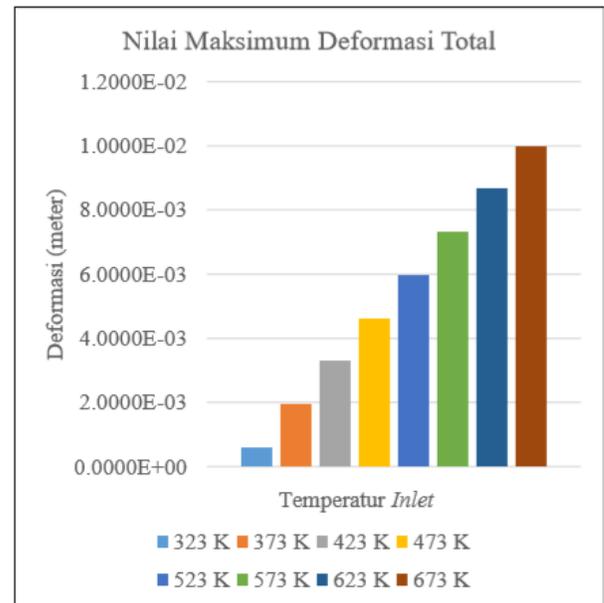
G. Distribusi Thermal pada Analisis Modul Transient Structural

Deformasi total pada penelitian ini untuk menunjukkan seberapa besar deformasi akibat temperatur operasi yang dilakukan pada inlet. Tegangan *von mises* yang dianalisis merealisasikan tegangan thermal yang terjadi pada *tubing* N80 ketika diberi temperatur operasi tertentu pada *inlet*. Apabila kedua nilai ini semakin tinggi dari batas nilai dari material, akan menyebabkan menyebabkan terjadi thermal *stress* yang dapat menurunkan kualitas material itu sendiri [8] Hal ini akan menyebabkan adanya kavitasi lokal, keausan dan timbulnya korosi [9].

Berdasarkan masing-masing temperatur *inlet*, nilai terendah berada di temperatur inisiasi 323 K yaitu sebesar 0,000018791 meter untuk nilai minimum dan 0,00061733 meter untuk nilai deformasi maksimumnya. Sedangkan nilai deformasi tertinggi berada di temperatur inisiasi 673 K yaitu dengan nilai minimum 0,00029928 meter dan nilai maksimum 0,009994 meter. Hal ini dapat menunjukkan semakin besar temperatur inisiasi pada *inlet* maka semakin besar deformasi yang terjadi di sepanjang struktural.



Gambar 4. Grafik Temperatur Operasi pada *Inlet* terhadap Nilai Minimum Deformasi



Gambar 5. Grafik Temperatur Operasi pada *Inlet* terhadap Nilai Maksimum Deformasi

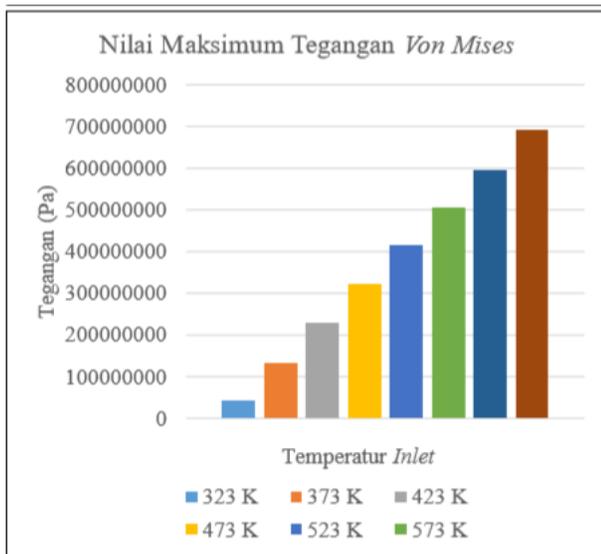
Tegangan *von mises* digunakan untuk menunjukkan *thermal stress* pada *tubing* dan *patch* selama 22,86 detik fluida mengalir. Tegangan yang bervariasi ditunjukkan akibat adanya temperatur inisiasi yang berbeda. Berdasarkan analisis data pada sub-bab sebelumnya, tegangan terbesar berada di *patch* kedua. Tegangan terbesar terjadi diantara sambungan *patch* dan *tubing*. Hal ini dapat menunjukkan daya lekat *patch* terhadap *tubing*.

Berdasarkan masing-masing temperatur *inlet*, nilai terendah berada di temperatur inisiasi 323 K yaitu sebesar 42,983 MPa. Sedangkan nilai tegangan *von mises* tertinggi berada di temperatur inisiasi 673 K yaitu dengan nilai minimum 0,00029928 meter dan nilai maksimum 0,009994 meter. Hal ini juga dapat menunjukkan semakin besar temperatur inisiasi

pada *inlet* maka semakin besar tegangan *von mises* yang terjadi di antara sambungan *patch* dan *tubing*.

Tabel 6.  
Nilai Tegangan Von Mises Maksimal

Temperatur Inlet (K)	Tegangan Von Mises Maksimal (MPa)
323	42,983
373	134,27
423	230,74
473	323,12
523	416,8
573	507,18
623	596,75
673	691,47



Gambar 6. Grafik Temperatur Operasi pada *Inlet* terhadap Nilai Maksimum Tegangan *Von Mises*

Nilai perpindahan dan tegangan *von mises* terbesar juga terjadi pada temperatur *inlet* 673 K ini dengan masing-masing nilai 0,009994 meter di ujung *tubing* dan 691,47 MPa terjadi di sekitar *patch* kedua. Karena tegangan dari *polyacrylamide* sebesar 665,8 MPa, maka temperatur *inlet* lebih dari sama dengan 673 K tidak dianjurkan.

Dari hasil kedua analisis dengan modul *fluent* dan *transient analysis* ini, temperatur optimum yang dapat dioperasikan sekitar 323 K hingga 523 K. Hal ini dapat didukung dengan studi sebelumnya milik Hidayat, et. al 2016 [10]. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kemampuan *casing* untuk menahan tekanan formasi diturunkan seiring dengan banyaknya siklus thermal yang meluas, sehingga menyebabkan degradasi kekuatan *casing* pada aplikasi thermal. Sebagai rekomendasi dalam operasi secara praktik, disarankan agar temperatur kerja maksimum dari injeksi uap lebih baik berada di bawah 360°C, misalnya 300°C atau setara dengan 573 K. Pada temperatur ini, ditunjukkan bahwa *casing* memiliki tegangan thermal yang lebih rendah serta kemampuan yang lebih baik pada tekanan yang menurun.

### III. KESIMPULAN

Temperatur *tubing* dapat mempengaruhi daya lekat *patch repair polyacrylamide* karena semakin tinggi temperatur *tubing* hingga melebihi titik leleh *polyacrylamide*, maka semakin berkurang daya lekat dan menurunnya kemampuan *patch repair*.

Temperatur optimum *tubing* yang paling tepat untuk dilakukan *patch repair* menggunakan *polyacrylamide* adalah di bawah titik leleh *polyacrylamide* yaitu 323 K hingga 523 K, namun temperatur paling optimum adalah temperatur di bawah 323 K ditinjau dari nilai perpindahan dan tegangan *von mises* yang semakin kecil.

### LAMPIRAN

#### A. Perhitungan Kecepatan Alir Fluida

Diketahui *cross sectional area* dari geometri *tubing* dalam simulasi sebesar 12,304 in<sup>2</sup>. Untuk *flow rate* proses pengeboran minyak mentah memiliki rentang nilai sebesar 1.000 hingga 1.200 barel/hari. Dalam simulasi ini, *flow rate* yang digunakan sebesar 1.050 barel/hari dengan konversi sebagai berikut:

$$1 \text{ barrels/day} = 0,0000018 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$1.050 \text{ barrels/day} = 0,00189 \text{ m}^3/\text{s}$$

Lalu konversi *area* sebesar:

$$12,304 \text{ in}^2 = 0,00793804864 \text{ m}^2$$

Maka, diperoleh kecepatan alir fluida, sebesar:

$$v = \frac{\text{flow rate}}{\text{cross sectional area}} = \frac{0,00189 \text{ m}^3/\text{s}}{0,00793804864 \text{ m}^2}$$

$$v = 0,238093779 \text{ m/s} \cong 0,24 \text{ m/s}$$

#### B. Perhitungan Waktu Alir Fluida

$$v = \frac{s}{t}$$

$$t = \frac{s}{v}$$

$$t = \frac{5,4864 \text{ m}}{0,24 \text{ m/s}}$$

$$t = 22,86 \text{ detik}$$

#### C. Perhitungan Tegangan Polyacrylamide

Diketahui daya kohesi *polyacrylamide* sebesar 39.800 J/mol, memiliki densitas sebesar 1189 kg/m<sup>3</sup> dan volume sebesar 0,0047881 in<sup>3</sup> (7,8311x10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>). Berat molekul dari *polyacrylamide* yaitu 71,08 gr/mol.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho \times V$$

$$m = 1189 \times 7,8311 \cdot 10^{-8}$$

$$m = 9,311 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

$$m = 0,09311 \text{ gram}$$

$$\frac{39800 \text{ J}}{\text{mol}} \times \frac{\text{mol}}{71,08 \text{ gr}} = 559,932 \text{ J/gr}$$

$$\frac{559,392 \text{ J}}{\text{gram}} \times 0,9311 \text{ gram} = 52,136 \text{ J} = 52,136 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3$$

$$\sigma = \frac{52,136 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3}{7,83311 \times 10^{-8} \text{ m}^3} = 665,759,707,4 \text{ Pa} = 665,8 \text{ MPa}$$

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia yang telah memberikan dukungan finansial melalui Beasiswa Bidik Misi tahun 2014-2018”.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. K. Khandka, *Leakage Behind Casing*. Norway: NTNU, 2007.
- [2] J. R. Styler, J. W., Al-Suwailem, S. S., Akhnoukh, R. L. & Leighton, *A Unique Rigless Casing Leak Repair, Ghawar Field, Saudi Arabia*. Saudi Arabia: Society of Petroleum Engineers, 2001.
- [3] S. Ibrahim, M. A. b. & Irawan, *Absorption Properties of Superabsorbent Polymers for Sealing Tubing Leaks*. Bandar Seri Iskandar: Universiti Teknologi Petronas, 2016.
- [4] API, *Specification for Casing and Tubing*. Washington: American Petroleum Institute, 2005.
- [5] C. Book, “Polyacrylamide,” 2017. .
- [6] H. Devold, *Oil and Gas Production Handbook: An Introduction to Oil and Gas Production, Transport, Refining, and Petrochemical Industry*. ABB Oil and Gas, 2013.
- [7] C. J. Geankoplis, *Transport Processes and Unit Operations*, 3rd editio. New Delhi, 1997.
- [8] W. D. Callister, *Material Science and Engineering an Introduction*. USA: John Wiley & Sons, Inc, 2009.
- [9] M. Z. Hidayat, M. I. P., Irawan, S. & Abdullah, *Effect of Casing Imperfection on the Casing Strength in Steam Injection Wells*. Surabaya: IOP Publishing, 2017.
- [10] M. Z. Hidayat, M. I. P., Irawan, S. & Abdullah, *Casing Strength Degradation in Thermal Environment of Steam Injection Wells*. Surabaya: IOP Publishing, 2016.