

RUMUSAN KONSEPTUAL NERACA MASSA SEBAGAI ALTERNATIF UNTUK MONITORING LAJU MASSA PRODUKSI DI TITIK SEPARATOR FLUIDA DUA FASA PANASBUMI

Basith Furqon Prasetyo Hadi

Universitas Pertamina

E-mail: basithfurqon@gmail.com

ABSTRACT

In geothermal fluid transportation using piping network, fluid parameter monitoring is certainly important, such as pressure and temperature measurement, flow rate or mass rate measurement, and chemical composition determination. Measuring tools are used for monitoring purpose and usually having several constraints. Rather than using difficult measuring tools to analyze geothermal fluid mass rate in the separator, we can calculate by using mass balance theory, which is correlating the concentration of some chemical components on geothermal fluid with its mass rate. It is expected that this way of calculation will provide an easier way than using measuring tools.

Keywords: *Geothermal, Mass Balance, Monitoring*

ABSTRAK

Dalam suatu operasi transportasi fluida panasbumi menggunakan jaringan pipa, sangat penting adanya monitoring parameter, seperti penentuan tekanan dan temperatur, penentuan laju massa atau laju alir fluida serta komposisi kimia fluida yang mengalir. Alat ukur digunakan dalam upaya monitoring dan biasanya memiliki beberapa batasan. Dibandingkan dengan menggunakan alat ukur yang sulit digunakan untuk mengukur laju massa di separator, penentuan laju massa dapat menggunakan konsep neraca massa, yaitu mengorelasikan banyaknya suatu komponen tertentu yang terkandung dalam fluida dengan jumlah laju massa fluida. Diharapkan konsep ini dapat dijadikan suatu alternatif perhitungan laju massa fluida yang lebih mudah daripada menggunakan alat ukur.

Kata kunci: *Panasbumi, Neraca Massa, Monitoring*

1. PENDAHULUAN

Dalam operasi transportasi fluida panasbumi menggunakan jaringan pipa, *monitoring* parameter fluida merupakan suatu hal yang perlu dilakukan untuk menjamin kelancaran dan keamanan operasi tersebut yang selanjutnya akan digunakan dalam aspek manajemen. Parameter yang biasanya diperhatikan antara lain tekanan, suhu/temperatur, laju massa/laju alir, serta komposisi dan sifat kimia dari fluida. Adapun untuk mengukur parameter tersebut dilakukan menggunakan alat ukur seperti *pressure gauge/sensor* untuk mengukur tekanan, *thermometer* untuk mengukur suhu/temperatur serta *flowmeter* atau *orifice meter* untuk mengukur laju alir / laju massa fluida.

Namun pada kenyataannya, penggunaan alat ukur tersebut bisa saja menemui kendala atau bahkan tidak dapat dilakukan. Penyebabnya berbagai macam, mulai dari spesifikasi alat, kondisi jaringan pipa, serta kondisi dan komposisi fluida yang berpotensi mempengaruhi kinerja alat. Potensi masalah-masalah yang dihadapi dapat berupa terjadinya korosi, pembentukan kerak (*scale*), serta pola aliran yang merusak (biasanya pola aliran dua fasa *slug flow*). Dari berbagai macam sebab tersebut, maka tidak jarang alat ukur yang ada mengalami kegagalan (*failure*) atau kerusakan. Di sisi lain, *monitoring* parameter fluida harus tetap berjalan untuk mengetahui kondisi terkini dan pencegahan terhadap potensi bahaya yang dapat terjadi.

Kajian akan difokuskan pada salah satu titik yang dinilai cukup penting, yaitu analisa laju massa fluida di titik separator pembangkit listrik. Fluida yang keluar dari sumur panasbumi akan dipisahkan antara fasa uap (*steam/vapor*) dan fasa cair (*liquid/brine*) oleh separator. Fasa uap yang telah dipisahkan dari fluida keluaran sumur akan dikirim ke turbin untuk memutar sudu (*blade*) dari turbin sehingga turbin dapat menghasilkan listrik. Sedangkan untuk fasa cair (*liquid/brine*) biasanya akan diinjeksi kembali ke dalam reservoir panasbumi untuk mengembalikan massa reservoir yang hilang. Oleh sebab itu, laju massa di titik separator dapat dijadikan gambaran atau patokan keberhasilan suatu sumur atau lapangan dalam menghasilkan energi.

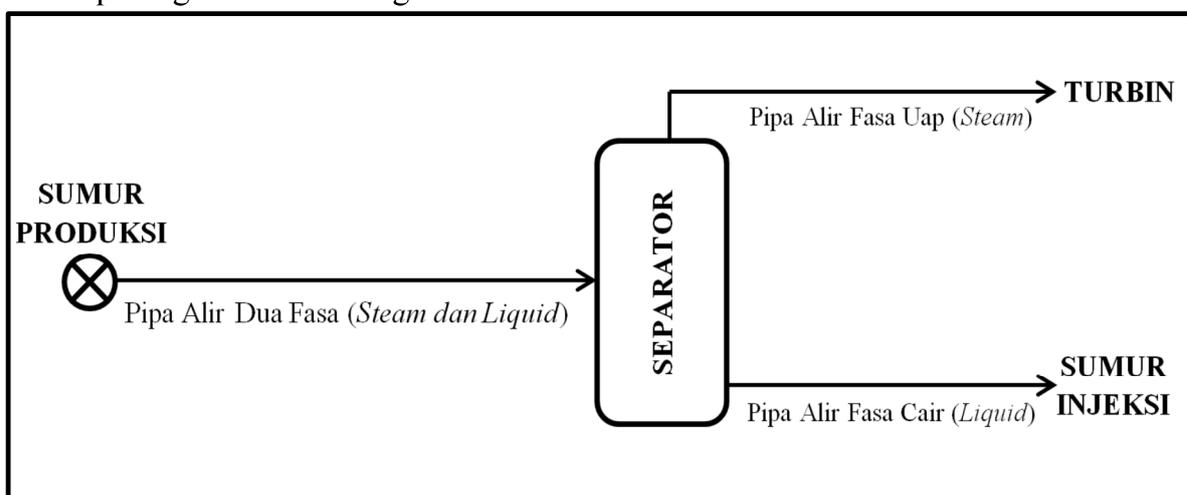
2. DASAR TEORI DAN PERANCANGAN

2.1. Transportasi Fluida Dua Fasa Panasbumi

Fluida panasbumi yang dimanfaatkan kebanyakan berasal dari sistem hidrothermal, dimana pada sistem ini pori-pori batuan mengandung air dan/atau uap, dan reservoir panasbumi tersebut umumnya letaknya tidak terlalu dalam sehingga masih ekonomis untuk diusahakan. Fluida panasbumi yang telah diproduksi memiliki energi panas yang dapat dimanfaatkan, seperti untuk menghasilkan energi listrik. Hal

ini dimungkinkan oleh suatu sistem konversi energi fluida panas bumi (*geothermal power cycle*) yang mengubah energi panas dari fluida menjadi energi listrik.

Untuk menghasilkan energi listrik, fluida panasbumi yang digunakan adalah fluida panasbumi yang berupa fasa uap (*steam/vapor*) yang nantinya fluida panasbumi tersebut akan dialirkan menuju turbin dan akan memutar turbin penghasil energi listrik. Pada sumur panasbumi yang menghasilkan fluida dua fasa, yaitu fasa uap (*steam/vapor*) dan fasa cair (*liquid/brine*), fluida panasbumi tersebut harus dipisahkan terlebih dahulu sehingga fasa uap dapat terpisahkan. Adapun proses separasi / pemisahan fluida dua fasa panasbumi menggunakan alat berupa separator dan dapat digambarkan sebagai Gambar 1.



Gambar 1. Skema Aliran Fluida Dua Fasa Panasbumi sebelum Dialirkan ke Turbin

Pada proses pemisahan fluida melalui separator ini, berlaku persamaan neraca panas sebagai berikut:

$$h_{VL} = x_{sep} \cdot h_{g,sep} + (1-x_{sep}) \cdot h_{f,sep} \quad (1)$$

atau

$$h_{VL} = h_{f,sep} + x_{sep} \cdot h_{fg,sep} \quad (2)$$

dengan

$$x_{sep} = \frac{M_{Vsep}}{M_{Tsep}} \text{ atau } \frac{M_{Vsep}}{M_{Vsep} + M_{Lsep}} \quad (3)$$

keterangan:

$h_{f,sep}$ = entalpi *liquid water* kondisi separator (kJ/kg)

$h_{fg,sep}$ = entalpi *latent water* kondisi separator (kJ/kg)

$h_{g,sep}$ = entalpi *steam water* kondisi separator (kJ/kg)

h_{VL} = entalpi total pada pipa alir dua fasa (kJ/kg)

M_L = Massa fasa cair (*liquid*) keluaran separator (kg/s atau ton/jam)

M_T = Massa total sistem fluida masukan separator (kg/s atau ton/jam)

M_V = Massa fasa uap (*vapor*) keluaran separator (kg/s atau ton/jam)

x_{sep} = *dryness fraction* kondisi separator

Biasanya, untuk menentukan dan memonitor laju massa fluida produksi di titik keluaran separator secara riil digunakanlah sebuah alat ukur. Alat ukur tersebut dapat berupa *flowmeter* atau *orifice meter* yang biasanya dipasang pada pipa alir fluida keluaran separator. Dengan diketahuinya laju massa fluida yang keluar dari separator, maka fluida keluaran sumur panasbumi dapat ditentukan dengan menjumlahkan laju massa yang ada di pipa alir fasa uap dan pipa alir fasa cair.

2.2. Kandungan Kimia Fluida Panasbumi

Fluida panasbumi yang mencapai permukaan mengandung beberapa unsur atau senyawa karena sifat fluida panasbumi yang melarutkan unsur disekitarnya. Beberapa unsur atau senyawa ini biasanya digunakan untuk kepentingan analisa mendalam, seperti sumber fluida, jenis batuan, interaksi fluida dengan lingkungan sekitar, tingkat “maturasi” suatu sistem panasbumi, atau perkiraan temperatur (*geothermometer*) pada tahap survey awal. Sedangkan pada kondisi fluida panasbumi yang akan atau sudah diproduksi, unsur atau senyawa ini biasanya dijadikan pertimbangan alat yang digunakan dan perawatan (*maintenance*) yang perlu dilakukan agar proses produksi tetap berjalan dengan lancar serta analisa potensi masalah yang mungkin terjadi.

Salah satu sifat senyawa kimia adalah memiliki kecenderungan untuk terlarut ketika mencapai suatu bentuk fasa tertentu. Hal ini dapat dijadikan acuan untuk menganalisa fasa secara lebih spesifik. Contoh senyawa kimia yang merupakan kandungan fluida panasbumi yang terlarut pada fasa tertentu dapat dilihat di Tabel 1 dibawah ini:

Tabel 1. Contoh Senyawa atau Unsur Kimia yang Terkandung dalam Fluida Panasbumi

Larut dalam Cairan (<i>Liquid</i>)	Larut dalam Uap (<i>Steam</i>)
Na ⁺	CO ₂
K ⁺	N ₂
Li ⁺	H ₂ S
Cl ⁻	H ₂
F ⁻	CH ₄
Ca ²⁺	
Mg ²⁺	
SiO ₂	

2.3. Neraca Massa

Neraca massa adalah suatu perhitungan yang tepat dari semua bahan-bahan yang masuk, yang terakumulasi dan yang keluar dalam waktu tertentu. Pernyataan tersebut sesuai dengan hukum kekekalan massa yang menyatakan bahwa massa tak dapat dijelmakan atau dimusnahkan [1] dan hukum termodinamika pertama yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan tetapi hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain [2]. Persamaan umum untuk neraca massa dengan mempertimbangkan tidak ada massa yang hilang saat adanya suatu proses adalah:

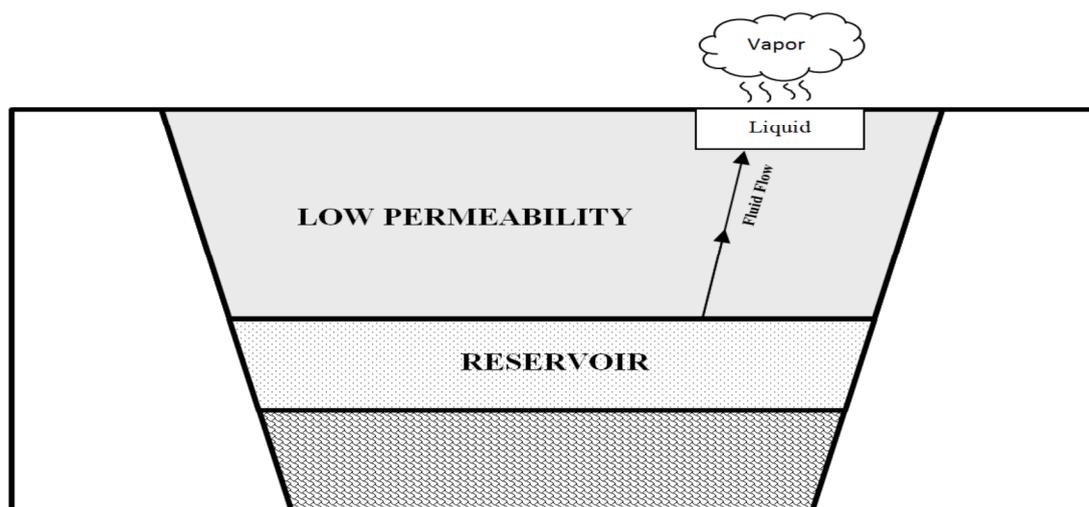
$$\text{Massa Masuk} = \text{Massa Keluar} + \text{Massa Terkumulasi} \quad (4)$$

Apabila tidak ada massa yang terakumulasi, maka persamaan menjadi:

$$\text{Massa Masuk} = \text{Massa Keluar} \quad (5)$$

Konsep neraca massa ini dapat digunakan untuk berbagai aspek dan bidang, termasuk analisa fluida panasbumi yang mengalir dari reservoir ke permukaan.

Saat fluida terakumulasi pada batuan reservoir dan mendapatkan suatu paparan temperatur dan tekanan, maka senyawa atau unsur kimia volatil seperti CO₂ akan terkonsentrasi di fasa uap yang terpisah, sedangkan senyawa atau unsur kimia *solute* seperti Cl⁻ akan tertinggal dan terkonsentrasi di air [3]. Konsep neraca massa dapat menginterpretasi konsentrasi suatu senyawa atau unsur kimia terlarut di reservoir dengan data konsentrasi senyawa atau unsur kimia terlarut di fluida panasbumi yang merembes sampai permukaan.



Gambar 2. Skema Rembesan Fluida Panasbumi dari Reservoir Panasbumi ke Permukaan

$$C_{i,res} = x C_{i,V} + (1 - x) C_{i,L} \quad (6)$$

$$x = \frac{M_V}{M_T} \text{ atau } \frac{M_V}{M_V + M_L} \quad (7)$$

dengan catatan

$$M_T = M_V + M_L \quad (8)$$

keterangan :

$C_{i,L}$ = konsentrasi massa unsur/senyawa “i” pada fasa cair (*liquid*) yang terpisah (mg/kg)

$C_{i,res}$ = konsentrasi massa unsur/senyawa “i” pada fluida reservoir (mg/kg)

$C_{i,V}$ = konsentrasi massa unsur/senyawa “i” pada fasa uap (*vapor*) yang terpisah (mg/kg)

M_L = massa atau laju massa fasa cair / *liquid* (kg/s atau ton/jam)

M_T = massa total atau laju massa total sistem fluida (kg/s atau ton/jam)

M_V = massa atau laju massa fasa uap / *vapor* (kg/s atau ton/jam)

x = *dryness fraction*

Apabila menentukan konsentrasi unsur atau senyawa (C_i) dilakukan dengan perhitungan laju massa fluida, maka Persamaan (7) dan (8) dapat dimasukkan ke Persamaan (6) menjadi:

$$M_T C_{i,res} = M_T \frac{M_V}{M_T} C_{i,V} + M_T \left(1 - \frac{M_V}{M_T}\right) C_{i,L} \quad (9)$$

$$M_T C_{i,res} = M_V C_{i,V} + (M_T - M_V) C_{i,L} \quad (10)$$

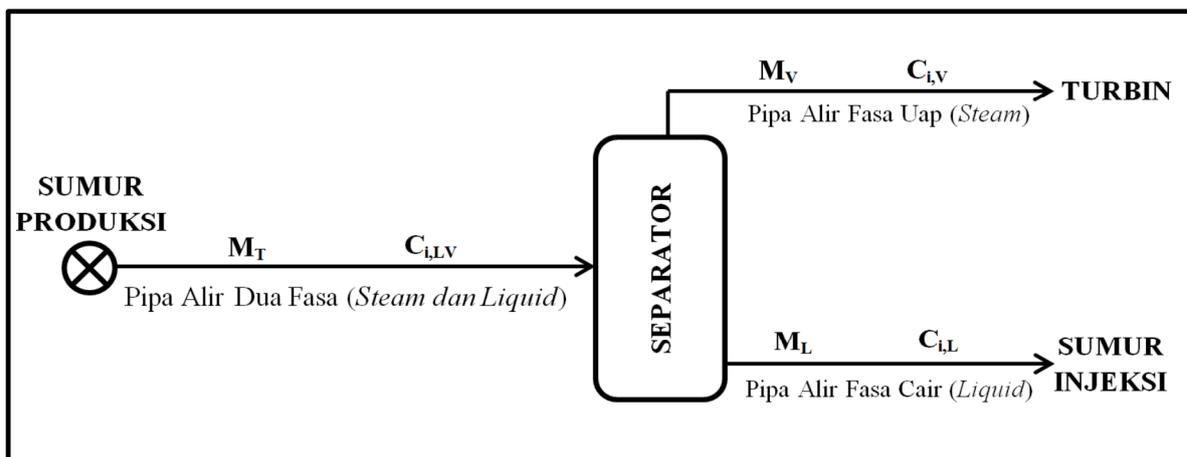
atau

$$M_T C_{i,res} = M_V C_{i,V} + M_L C_{i,L} \quad (11)$$

2.4. Konsep Neraca Massa dalam Penentuan Laju Massa pada Separator

Dalam penentuan laju massa menggunakan neraca massa, perlu diperhatikan bahwa unsur atau senyawa di dalam fluida yang mengalir tersebut harus mempunyai massa yang konstan, mulai dari keluaran sumur produksi hingga keluaran separator. Maka dari itu, perlu adanya penentuan jenis unsur atau senyawa kimia yang sesuai dengan kondisi aliran di pipa untuk dianalisa.

Dengan separasi aliran dua fasa di media pipa seperti Gambar 1 dengan adanya pemisahan fasa seperti pada Gambar 2, maka dapat digambarkan kondisi dan komposisi aliran dari sumur panasbumi adalah sebagai Gambar 3.



Gambar 3. Skema Kondisi Separasi Aliran Dua Fasa dengan Kandungan Kimianya

Untuk memenuhi kondisi dalam menggunakan neraca massa, yaitu massa unsur atau senyawa dalam fluida harus memiliki jumlah yang sama, tetap, tidak berubah mulai

dari keluaran sumur produksi hingga keluaran separator, maka dalam rumusan ini terdapat beberapa asumsi dan batasan parameter:

- Unsur atau senyawa dalam fluida tidak mengalami reaksi dengan unsur lain dalam aliran.
- Unsur atau senyawa dalam fluida tidak mengalami perubahan kelarutan dalam kondisi aliran.
- Unsur atau senyawa dalam fluida dianggap tersebar secara merata.
- Aliran fluida tidak meninggalkan sistem aliran.
- Semua konsentrasi unsur atau senyawa pada pipa alir sudah diketahui.
- Salah satu dari laju massa fluida yaitu laju massa dua fasa masuk separator, laju massa fasa uap/gas keluar separator atau laju massa fasa cair keluar separator sudah diketahui.

sehingga perhitungan neraca massa pada sistem Gambar 3 dapat dituliskan menjadi:

$$M_T C_{i,LV} = M_V C_{i,V} + M_L C_{i,L} \quad (12)$$

dengan catatan

$$M_T = M_V + M_L \quad (13)$$

keterangan :

$C_{i,L}$ = konsentrasi massa unsur/senyawa “i” dalam pipa alir fasa cair (mg/kg)

$C_{i,LV}$ = konsentrasi massa unsur/senyawa “i” dalam pipa alir dua fasa (mg/kg)

$C_{i,V}$ = konsentrasi massa unsur/senyawa “i” dalam pipa alir fasa uap (mg/kg)

M_L = laju massa fluida dalam pipa alir fasa cair (kg/s atau ton/jam)

M_T = laju massa fluida total dalam pipa alir dua fasa (kg/s atau ton/jam)

M_V = laju massa fluida dalam pipa alir fasa uap (kg/s atau ton/jam)

Menggunakan Persamaan (12) dengan memasukkan Persamaan (13), maka didapatkan persamaan untuk menemukan laju massa fluida dengan variable dua laju massa fluida sebagai berikut:

$$M_T C_{i,LV} = (M_T - M_L) C_{i,V} + M_L C_{i,L} \quad (14)$$

$$M_T C_{i,LV} = M_V C_{i,V} + (M_T - M_V) C_{i,L} \quad (15)$$

Apabila yang diketahui hanyalah laju massa pada pipa alir fasa cair, maka Persamaan (13) dan Persamaan (14) dapat diturunkan menjadi Persamaan (17) untuk

menentukan laju massa pipa alir dua fasa dan/atau Persamaan (20) untuk menentukan laju massa pipa alir fasa uap:

$$M_T (C_{i,LV} - C_{i,V}) = M_L (C_{i,L} - C_{i,V}) \quad (16)$$

$$M_T = \frac{M_L (C_{i,L} - C_{i,V})}{(C_{i,LV} - C_{i,V})} \quad (17)$$

$$M_V = M_T - M_L \quad (18)$$

$$M_V = \frac{M_L (C_{i,L} - C_{i,V})}{(C_{i,LV} - C_{i,V})} - M_L \quad (19)$$

$$M_V = M_L \left(\frac{(C_{i,L} - C_{i,V})}{(C_{i,LV} - C_{i,V})} - 1 \right) \quad (20)$$

Sedangkan jika yang diketahui hanyalah laju massa pipa alir fasa uap, maka Persamaan (13) dan Persamaan (15) dapat diturunkan menjadi Persamaan (22) untuk menentukan laju massa pipa alir dua fasa dan/atau Persamaan (25) untuk menentukan laju massa pipa alir fasa cair:

$$M_T (C_{i,LV} - C_{i,L}) = M_V (C_{i,V} - C_{i,L}) \quad (21)$$

$$M_T = \frac{M_V (C_{i,V} - C_{i,L})}{(C_{i,LV} - C_{i,L})} \quad (22)$$

$$M_L = M_T - M_V \quad (23)$$

$$M_L = \frac{M_V (C_{i,V} - C_{i,L})}{(C_{i,LV} - C_{i,L})} - M_V \quad (24)$$

$$M_L = M_V \left(\frac{(C_{i,V} - C_{i,L})}{(C_{i,LV} - C_{i,L})} - 1 \right) \quad (25)$$

Adapun bila ditentukan laju pipa dua fasa terlebih dahulu (bisa dilakukan dengan anggapan bahwa laju pipa alir dua fasa pada tekanan kepala sumur sesuai dengan plot *output curve*), maka Persamaan (13) dan Persamaan (16) dapat diturunkan menjadi Persamaan (26) untuk menentukan laju massa pipa alir fasa cair dan/atau Persamaan (29) untuk menentukan laju massa pipa alir fasa uap:

$$M_L = \frac{M_T (C_{i,LV} - C_{i,V})}{(C_{i,L} - C_{i,V})} \quad (26)$$

$$M_V = M_T - M_L \quad (27)$$

$$M_V = M_T - \frac{M_T (C_{i,LV} - C_{i,V})}{(C_{i,L} - C_{i,V})} \quad (28)$$

$$M_V = M_T \left(1 - \frac{(C_{i,LV} - C_{i,V})}{(C_{i,L} - C_{i,V})} \right) \quad (29)$$

atau Persamaan (13) dan Persamaan (21) menjadi Persamaan (30) untuk menentukan laju massa pipa alir fasa uap dan/atau Persamaan (33) untuk menentukan laju massa pipa alir fasa cair:

$$M_V = \frac{M_T (C_{i,LV} - C_{i,L})}{(C_{i,V} - C_{i,L})} \quad (30)$$

$$M_L = M_T - M_V \quad (31)$$

$$M_L = M_T - \frac{M_T (C_{i,LV} - C_{i,L})}{(C_{i,V} - C_{i,L})} \quad (32)$$

$$M_L = M_T \left(1 - \frac{(C_{i,LV} - C_{i,L})}{(C_{i,V} - C_{i,L})} \right) \quad (33)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam kajian panasbumi sebagai pembangkit listrik, fluida panasbumi mempunyai peranan penting dalam menghasilkan energi. Untuk menghasilkan energi listrik sendiri melalui Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi (PLTP), fluida yang digunakan adalah fluida uap yang nantinya fluida uap tersebut akan digunakan untuk memutar sudu turbin pembangkit listrik. Fluida uap untuk memutar turbin berasal dari pemisahan fluida keluaran sumur panasbumi yang dipisahkan di separator. Mengingat pentingnya produksi fasa uap tersebut, maka dilakukan *monitoring* laju massa fluida yang mengalir di sistem pemipaan.

Konsep neraca massa dinilai cukup fleksibel untuk diterapkan di berbagai bidang, tidak terkecuali untuk bidang panasbumi. Konsep neraca massa cukup potensial untuk digunakan dalam *monitoring*, seperti menentukan laju massa fluida masuk separator dan laju massa fluida keluaran separator. Dengan mengolah persamaan yang diambil dari persamaan neraca massa fluida panasbumi saat fluida

tersebut merembes/ mengalir dari reservoir ke permukaan, beberapa rumus dapat diformulasikan dengan mengasumsikan massa unsur atau senyawa yang ada di dalam fluida panasbumi adalah tetap serta parameter konsentrasi unsur atau senyawa yang masuk dan keluar separator diketahui:

1. Apabila hanya diketahui data laju massa dalam pipa alir fasa cair, maka dapat menggunakan Persamaan (17) untuk mencari laju massa total pada pipa dua fasa dan Persamaan (20) untuk mencari laju massa pada pipa alir fasa uap.
2. Apabila hanya diketahui data laju massa dalam pipa alir fasa uap, maka dapat menggunakan Persamaan (22) untuk mencari laju massa total pada pipa alir dua fasa dan Persamaan (25) untuk mencari laju massa pada pipa alir fasa cair.
3. Apabila hanya diketahui data laju massa pipa dua fasa masuk ke separator (dapat ditentukan dengan menganggap keluaran sumur sesuai dengan plot *output curve*), maka laju massa pipa alir fasa cair dapat menggunakan Persamaan (26) atau Persamaan (33) dan laju massa alir pipa uap dapat menggunakan Persamaan (29) atau Persamaan (30).

Selain untuk menentukan laju massa fluida panasbumi pada separator, neraca massa juga dapat digunakan untuk mengetahui kualitas fasa uap yang dipisahkan dengan menghitung nilai efisiensi separator [4]. Penentuan efisiensi separator berguna untuk mengidentifikasi potensi masalah di pipa alir fasa uap. Hal ini berkaitan dengan adanya dampak yang dapat ditimbulkan oleh fasa cair di dalam pipa alir fasa uap. Fraksi fasa cair tersebut berpotensi menyebabkan korosi, kerak (*scale*) atau mempengaruhi kehilangan tekanan dan panas dari fluida yang dialirkan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Konsep neraca massa dapat diformulasikan untuk menentukan laju massa fluida yang dialirkan dan dipisahkan di wilayah separator dengan menggunakan konsentrasi unsur atau senyawa kimia dalam fluida yang masuk dan keluar separator serta satu parameter laju massa yang diketahui. Untuk data yang diperlukan sendiri adalah data konsentrasi unsur atau senyawa kimia dalam semua pipa alir serta salah satu dari parameter: laju massa fluida pada pipa alir dua fasa, pipa alir fasa uap atau pipa alir fasa cair. Secara teoritis, formulasi neraca massa dapat digunakan sebagai alternatif pengganti alat ukur laju massa fluida. Oleh sebab itu, penggunaan neraca massa dapat digunakan untuk keperluan *monitoring* laju massa fluida di wilayah separator meskipun terkendala masalah pada alat ukur.

Namun formulasi dari penurunan rumus neraca massa tersebut masih perlu dibuktikan dengan praktik penggunaannya pada separator yang dialiri fluida panasbumi, baik dalam tingkat penelitian maupun industri untuk menentukan laju massa yang tepat. Kajian dalam penggunaan konsep ini sendiri perlu lebih

diperhatikan secara seksama untuk variasi sistem pemipaan dan penentuan laju massa dari dua fasa fluida di pipa yang dapat membentuk pola aliran yang beragam (seperti pola *bubbly flow*, *slug flow*, *churn flow*, *annular flow* atau *mist flow*) karena menurut penulis dapat berpengaruh pada persebaran unsur atau senyawa kimia fluida.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Wuryanti, *Neraca Massa dan Energi*, Bandung: Jurusan Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Bandung, 2016.
- [2] P. R. Ansyah dan M. N. Ramadhan, *Termodinamika Teknik I*, Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lambung Mangkurat, 2018.
- [3] K. Nicholson, *Geothermal Fluids Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag, 1993.
- [4] S. J. Zarrouk and M. H. Purnanto, “Geothermal steam-water separators: Design overview”, *J. Geothermics*, vol. 53, pp. 236 – 254, Jan. 2015.
- [5] N. M. Saptadji, *Teknik Panasbumi*, Bandung: Kelompok Studi Panasbumi Institut Teknologi Bandung, 2001.
- [6] M. A. Grant, G. L. Donaldson, and F. P. Bixley, *Geothermal Reservoir Engineering*, Second Edition, New York: Academic Press Inc, 1982.
- [7] T. A. Adler et al, *ASM Handbook Volume 13A Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*, ASM International, 2003.
- [8] C. E. Brennen, *Fundamentals of Multiphase Flows*, Cambridge University Press, 2008.
- [9] R. DiPippo, *A Simplified Method For Estimating The Silica Scaling Potential in Geothermal Power Plant*, United States, 1985.
- [10] R. DiPippo, *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*, Third Edition, Butterworth-Heinemann, 2012.
- [11] J. R. Thome, *Encyclopedia of Two Phase Heat Transfer and Flow*, Singapore: World Scientific Publishing Co., 2016.
- [12] A. Yushantarti, N. M. Nurdin, dan M. Kholid, “Monitoring Sumur-Sumur Eksplorasi Lapangan Panas Bumi Mataloko, Kabupaten Ngada, Provinsi Nusa Tenggara Timur Tahun 2015”, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panasbumi – Badan Geologi, [Online]. Tersedia: http://psdg.geologi.esdm.go.id/kolokium/2015_2/pb/1.18%20Makalah_monitoring_mataloko2016.pdf [Diakses: 14 Mei 2019].