

ANALISIS NUMERIK SIFAT-SIFAT TRANSIEN ALIRAN FLUIDA PANAS BUMI

Khasani

Jurusan Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281, Indonesia
Phone: +62-274-521673, FAX: +62-274-521673, E-mail: khasani@ugm.ac.id

ABSTRAK

Kemampuan produksi sebuah sumur panas bumi dievaluasi dengan cara mengukur tekanan kepala sumur dan laju aliran massa pada beberapa nilai tekanan kepala sumur. Dengan melakukan kontrol terhadap katup utama akan dihasilkan perubahan tekanan kepala sumur dan laju aliran massa. Namun demikian, waktu yang dibutuhkan oleh variabel-variabel ini untuk menuju keadaan stabil tergantung pada sifat-sifat aliran dari campuran aliran dua fasa air-uap di dalam sumur. Kemampuan produksi sumur juga ditentukan oleh parameter-parameter reservoir di antaranya permeabilitas reservoir, suhu dan tekanan reservoir. Dengan demikian, sifat-sifat transien produksi sumur penting untuk dianalisis. Dalam penelitian ini simulator WELBORE (Miller, 1980) akan digunakan untuk keperluan tersebut. Untuk mengevaluasi pengaruh lama waktu operasi pengontrolan katup terhadap sifat-sifat transien produksi sumur, akan dipilih perubahan nilai laju alir massa berupa fungsi tangga dan linier dengan beberapa interval waktu di kepala sumur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan oleh tekanan kepala sumur untuk stabil pada peningkatan laju aliran massa yang diberikan dalam bentuk fungsi tangga akan lebih lama dibandingkan dengan peningkatan laju aliran massa berupa fungsi linier. Semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk membuka katup utama akan menghasilkan kondisi stabil yang lebih cepat untuk tekanan kepala sumur.

Kata Kunci: Sifat-sifat transien, aliran fluida, produksi sumur, analisis numerik

1. Pendahuluan

Dalam manajemen sebuah sumber daya panas bumi, kegiatan pemantauan reservoir panas bumi selama masa eksploitasi merupakan satu hal yang perlu mendapat perhatian dengan sungguh-sungguh. Hal ini disebabkan karena pengambilan fluida dari reservoir panas bumi akan menyebabkan penurunan tekanan pada reservoir. Penurunan tekanan reservoir ini akan mengakibatkan perubahan aktivitas permukaan, penurunan produksi sumur dan peningkatan *boiling* pada reservoir suhu tinggi. Beberapa parameter yang perlu dipantau adalah laju produksi sumur, entalpi fluida, tekanan kepala sumur, tekanan dan suhu reservoir.

Kurva produksi yang menampilkan hubungan antara tekanan kepala sumur dan laju aliran massa fluida diperoleh melalui pengukuran kedua variabel untuk beberapa titik dengan cara memutar katup kepala sumur untuk bukaan yang berbeda. Selama pengukuran kemampuan produksi sumur, selang waktu antara pengukuran tekanan kepala sumur dan laju aliran massa ditentukan berdasarkan pengalaman operator. Waktu yang dibutuhkan oleh kedua variabel untuk stabil

tergantung pada beberapa parameter, di antaranya adalah permeabilitas reservoir, suhu fluida reservoir dan kedalaman titik *flashing*. Selanjutnya, lama waktu pemutaran katup diperkirakan mempengaruhi kestabilan karakteristik sumur. Oleh karena itu, untuk merancang pengukuran karakteristik sumur, waktu yang dibutuhkan oleh fluida untuk stabil perlu dievaluasi secara kuantitatif, di antaranya melalui analisis numerik.

Itoi dkk. (1983) mempelajari perubahan karakteristik aliran sebuah sumur produksi terhadap peningkatan kedalaman pengeboran. Hasil simulasi dan pengukuran tekanan kepala sumur dan laju aliran massa dibandingkan terhadap sumur produksi Hatchobaru (H-4) dan Otake (O-7) di Jepang. Miller (1980) mendiskusikan studi numerik secara transien untuk produksi sumur. Studi tersebut lebih menitikberatkan pada analisis uji sumur dengan menggabungkan antara simulator sumur dan reservoir.

Makalah ini akan membicarakan sifat-sifat produksi sumur akibat perubahan laju aliran massa di kepala sumur. Pengaruh parameter reservoir terhadap produksi sumur juga akan didiskusikan. Untuk keperluan



tersebut, sebuah model reservoir yang digabungkan dengan model sumur sebagaimana produksi sumur sebagian tergantung pada karakteristik reservoir. Aliran radial dalam reservoir digunakan dalam analisis ini dengan menggunakan software WELBORE (Miller, 1980).

2. Landasan Teori

Simulator WELBORE dibuat dengan menggunakan persamaan atur baik untuk sumur maupun reservoir. Persamaan dasar untuk aliran fluida diturunkan dengan beberapa asumsi sebagai berikut:

- 1) reservoir radial simetri dan horizontal dengan ketebalan konstan
- 2) aliran fluida mengikuti hukum Darcy
- 3) perpindahan kalor antara fluida dalam sumur dan formasi batuan diperhitungkan

Kekekalan massa:

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

di mana ρ adalah massa jenis fluida total (kg/m^3), v adalah kecepatan fluida (m/s), t adalah waktu (s) dan x adalah jarak (m).

Kekekalan momentum:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}[\alpha \rho_s v_s^2 + (1 - \alpha) \rho_w v_w^2] + \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g + \frac{\lambda \rho v^2}{4r_w} = 0 \quad (2)$$

di mana α adalah fraksi hampa (-), ρ_s adalah massa jenis fraksi uap (kg/m^3), ρ_w adalah massa jenis fraksi air (kg/m^3), v_s adalah kecepatan uap (m/s), v_w adalah kecepatan air (m/s), P adalah tekanan (Pa), dan r_w adalah radius sumur.

Faktor gesekan λ dievaluasi menggunakan *two-phase multiplier* dan tidak tergantung pada rejim aliran (Chisholm, 1973).

Kekekalan energi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho e) + \frac{\partial}{\partial x}[\alpha \rho_s v_s e_s + (1 - \alpha) \rho_w v_w e_w] = -P \left\{ \frac{\partial}{\partial x}[\alpha v_s + (1 - \alpha) v_w] \right\} + \frac{H}{2r_w} (T - T_{r_w}) \quad (3)$$

di mana e adalah internal energi fluida total (J/kg), e_s adalah internal energi uap (J/kg), e_w adalah internal energi air (J/kg), H adalah koefisien perpindahan kalor ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), T adalah suhu fluida ($^\circ\text{C}$), dan T_{r_w} adalah suhu dinding sumur ($^\circ\text{C}$).

Persamaan keadaan:

$$\Delta \rho = \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \Delta P + \left(\frac{\partial \rho}{\partial e} \right) \Delta e \quad (4)$$

di mana simbol Δ menunjukkan perubahan parameter yang mengikutinya.

3. Prosedur Perhitungan

Simulasi numerik dilakukan mengikuti tahap-tahap sebagai berikut:

- 1) Tentukan parameter-parameter untuk sumur dan reservoir seperti kedalaman sumur, tekanan dasar sumur, laju aliran massa, internal energi fluida dari reservoir seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Selanjutnya sifat-sifat reservoir seperti *permeability-thickness* (kh), lebar reservoir secara horizontal dan storativitas (ϕCh) juga harus diberikan. Parameter-parameter yang lain adalah konduktivitas panas batuan dan difusivitas panas. Diasumsikan bahwa profil suhu formasi secara linier sebesar 25°C di batas atas dan 280°C di batas bawah.

Tabel 1. Parameter Reservoir dan Sumur

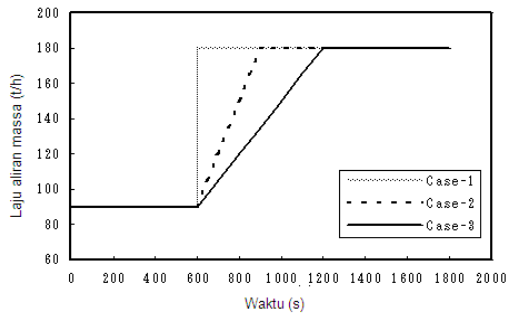
Reservoir	Wellbore
Horizontal Extent : 1500m	Diameter : 0.2 m
Permeability Thickness : 3×10^{-12} and $6 \times 10^{-12} \text{ m}^3$	Length : 1000 m
Storativity : $5 \times 10^{-7} \text{ m Pa}^{-1}$	Roughness : $4.6 \times 10^{-5} \text{ m}$
Thermal Diffusivity : $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	
Thermal Conductivity : $1.8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$	
Temperature Distribution at Rock Formation : 25°C at the top and 280°C at the bottom	

^{*)} Miller (1980a)

- 2) Temukan profil tekanan dan suhu dalam sumur dan distribusi tekanan dalam reservoir pada kondisi awal. Parameter pada kondisi awal terdiri atas tekanan dasar sumur, energi dalam aliran fluida dari reservoir dan laju aliran massa keluar dari sumur.
- 3) Ketika kondisi stabil baik pada sumur maupun reservoir sudah tercapai, aliran pada kepala sumur diubah untuk mempelajari sifat-sifat transien dari variabel-variabel lain. Sebagaimana diperkirakan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mengoperasikan katup akan mempengaruhi sifat-sifat transien tekanan pada kepala sumur dan dasar sumur, laju aliran massa pada kepala sumur akan dinyatakan sebagai fungsi waktu. Untuk mempelajari lama interval waktu perubahan laju aliran massa, selang waktu 0 s (fungsi tangga), 300 s dan 600 s telah



ditentukan seperti ditunjukkan pada Gbr. 1. Laju aliran massa dijaga konstan sebesar 90 t/h (25 kg/s), kemudian pada 600 s dinaikkan sampai 180 t/h (50 kg/s) dalam bentuk yang berbeda-beda tergantung pada selang waktu dari perubahan laju aliran massa. Perhitungan dihentikan setelah proses berjalan selama 1800 s. Pada dasar sumur, tekanan ditentukan dengan menggunakan model reservoir.

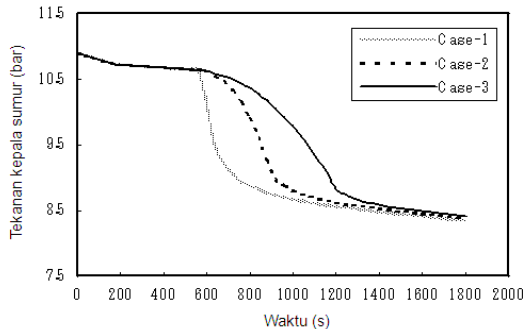


Gambar 1. Laju aliran massa terhadap waktu untuk interval waktu yang berbeda.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Pengaruh selang waktu perubahan aliran terhadap produksi sumur

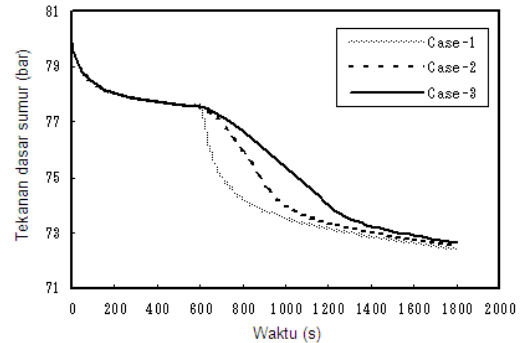
Gambar 2 menunjukkan perubahan tekanan kepala sumur (P_{wh}) terhadap waktu untuk tiga kasus berbeda.



Gambar 2. Tekanan kepala sumur terhadap waktu untuk interval waktu yang berbeda.

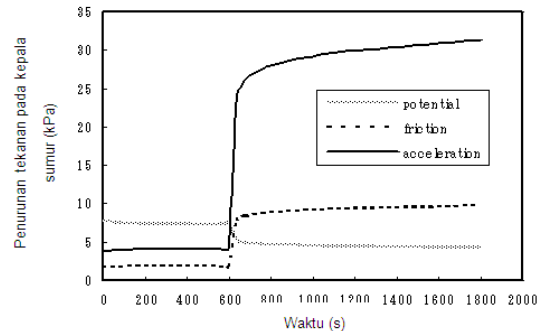
Permeability-thickness (kh) sebesar 3 darcy-m digunakan untuk kasus-kasus ini. Perubahan laju aliran dari 90 t/h menjadi 180 t/h ditentukan, dan selang waktu 0 s (Kasus-1), 300 s (Kasus-2) dan 600 s (Kasus-3) akan diinvestigasi. P_{wh} untuk Kasus-1 turun secara cepat sebesar 2 bar dan kemudian turun perlahan-lahan terhadap waktu. Dua kasus lain, Kasus-2 dan Kasus-3, menunjukkan penurunan yang kecil pada waktu awal, tetapi turun secara cepat sampai menuju tekanan stabil. Waktu saat laju penurunan secara moderat bersesuaian dengan waktu saat aliran mencapai 180 t/h. Sebaliknya, P_{wb} untuk semua kasus penurunan terhadap waktu dan laju penurunannya direfleksikan oleh bentuk perubahan laju aliran (Gbr. 1).

Gambar 3 memperlihatkan hasil simulasi tekanan dasar sumur (P_{wb}).



Gambar 3. Tekanan dasar sumur terhadap waktu untuk interval waktu yang berbeda.

Sifat-sifat transien P_{wh} dan P_{wb} dapat dianalisis menggunakan persamaan-persamaan (1) sampai (3). Dengan menggabungkan persamaan-persamaan ini, distribusi tekanan dalam sumur dapat ditentukan. Penurunan tekanan dalam sumur terdiri atas penurunan karena potensial, percepatan dan gesekan. Gambar 4 menunjukkan perbandingan komponen penurunan tekanan di kepala sumur untuk Kasus-1.



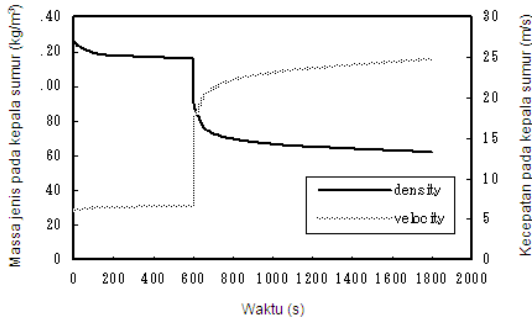
Gambar 4. Komponen penurunan tekanan terhadap waktu.

Untuk laju aliran yang kecil dengan kondisi stabil sampai 600 s, penurunan tekanan didominasi oleh komponen potensial. Kenaikan laju aliran massa dari 90 t/h sampai 180 t/h pada 600 s diikuti oleh kenaikan penurunan tekanan untuk komponen gesekan dan percepatan. Sebaliknya, penurunan tekanan karena komponen potensial mengalami penurunan. Hal ini mengindikasikan bahwa kenaikan laju aliran massa menyebabkan kenaikan kecepatan fluida terutama untuk daerah aliran dua fasa, yang selanjutnya akan menyebabkan peningkatan penurunan tekanan karena percepatan.

Perubahan dalam massa jenis dan kecepatan aliran dua fasa pada kepala sumur ditunjukkan oleh Gbr. 5.



Pada laju aliran rendah, massa jenis fluida lebih tinggi daripada massa jenis pada laju aliran tinggi setelah 600 s. Namun sebaliknya, kecepatan fluida meningkat setelah perubahan laju aliran massa pada 600 s.



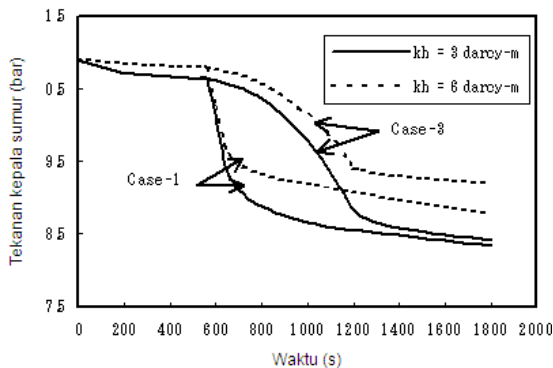
Gambar 5. Massa jenis dan kecepatan fluida pada kepala sumur terhadap waktu.

Karakteristik perubahan massa jenis dan kecepatan inilah yang mungkin menyebabkan penurunan tekanan pada laju aliran rendah didominasi oleh komponen potensial daripada komponen percepatan di mana kecepatan satu fasa air adalah rendah. Sementara itu, untuk laju aliran tinggi penurunan tekanan oleh komponen percepatan akibat kecepatan fluida yang tinggi.

4.2. Pengaruh permeability-thickness (kh)

4.2.1. Pada tekanan kepala sumur dan dasar sumur

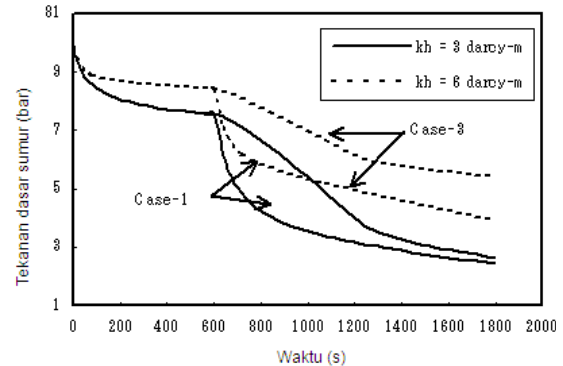
Pengaruh kh terhadap P_{wh} dan P_{wb} ditunjukkan masing-masing oleh Gbr. 6 dan 7 untuk Kasus-1 dan Kasus-3. Nilai kh sebesar 3 dan 6 darcy-m akan digunakan untuk analisis dalam studi ini.



Gambar 6. Tekanan kepala sumur terhadap waktu untuk kh yang berbeda.

Pada waktu permulaan, P_{wh} dan P_{wb} turun terhadap waktu dan menunjukkan penurunan kecil seiring dengan bertambahnya waktu. Setelah kenaikan laju aliran massa dari 90 t/h ke 180 t/h pada 600 s untuk Kasus-1 dan Kasus-3, P_{wh} dan P_{wb} turun terhadap waktu dan

membutuhkan cukup waktu untuk mencapai kondisi stabil. Lama waktu yang dibutuhkan untuk mengubah laju aliran massa (Kasus-1 dan Kasus-3) menghasilkan nilai yang serupa untuk P_{wh} dan P_{wb} .



Gambar 7. Tekanan dasar sumur terhadap waktu untuk kh yang berbeda.

Untuk Kasus-1, perubahan laju aliran menyebabkan penurunan P_{wh} secara tajam, kemudian mengalami penurunan secara perlahan-lahan sampai akhirnya mencapai kondisi stabil. Namun sebaliknya, untuk Kasus-3, perubahan laju aliran menyebabkan penurunan P_{wh} pada awalnya dan laju penurunan menjadi semakin besar seiring dengan waktu. Kemudian segera setelah laju aliran yang lebih tinggi telah tercapai pada 1200 s P_{wh} menunjukkan penurunan yang kecil dan menuju kondisi stabil. Dapat dilihat bahwa waktu yang dibutuhkan bagi P_{wh} untuk stabil lebih singkat pada Kasus-3 dibandingkan dengan Kasus-1. Penurunan secara cepat bagi P_{wb} juga dapat dilihat untuk Kasus-1, kemudian diikuti dengan penurunan kecil seiring dengan waktu. Stabilisasi baik untuk Kasus-1 maupun Kasus-3 untuk kh rendah (3 darcy-m) lebih cepat dibandingkan untuk kh tinggi (6 darcy-m).

Setelah kenaikan laju aliran, P_{wh} dan P_{wb} bernilai rendah untuk kh kecil dan berlaku untuk kedua Kasus-1 dan Kasus-3. Untuk menjelaskan situasi ini, kita dapat mengevaluasi untuk dua titik yang berbeda; titik dengan laju aliran rendah dan tinggi. Apabila reservoir dapat diasumsikan dalam kondisi stedi ketika laju aliran sumur mencapai kondisi stabil, persamaan keadaan stedi dapat dinyatakan dengan persamaan berikut,

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu \phi C} \left[\frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial r} \right] \quad (5)$$

di mana μ adalah viskositas dinamik (Pa.s), ϕ adalah porositas (-), C adalah kompresibilitas (1/Pa), dan r adalah jarak radial (m).

Selanjutnya laju aliran dalam sumur dapat dinyatakan dengan menerapkan kondisi syarat batas sebagai berikut,



$$r = r_w \quad p = P_{wb}$$

$$r = r_e \quad p = P_e$$

kemudian,

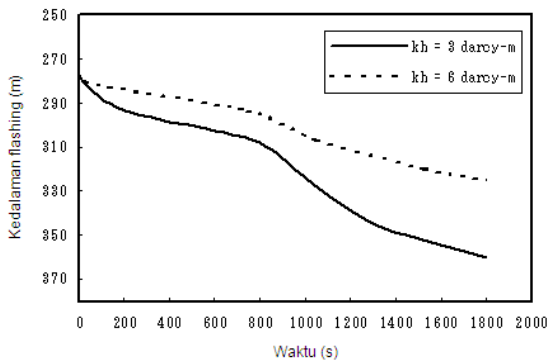
$$G = \frac{2\pi kh\rho_w(P_e - P_{wb})}{\mu_w R_e} \quad (6)$$

di mana P_e adalah tekanan reservoir pada jarak yang cukup jauh dari sumur (Pa).

Dengan asumsi bahwa μ_w dan ρ_w adalah konstan dalam reservoir, maka laju aliran hanya bergantung pada kh dan P_{wb} . Untuk laju aliran yang diberikan (180 t/h), sebuah peningkatan kh akan menyebabkan penurunan nilai $(P_e - P_{wb})$. Hal ini mengharuskan kenaikan nilai P_{wb} . Dengan demikian, P_{wb} untuk $kh = 6$ darcy-m selalu lebih tinggi daripada P_{wb} untuk $kh = 3$ darcy-m.

4.2.2. Pada kedalaman *flashing*

Kedalaman *flashing* merupakan titik di mana air panas mulai menghasilkan uap. *Flashing* dimulai saat tekanan mencapai tekanan saturasinya yang berkorespondensi dengan suhu fluida pada kedalaman tersebut. Gambar 8 menunjukkan kedalaman *flashing* terhadap waktu untuk kh yang berbeda pada Kasus-3.



Gambar 8. Kedalaman *flashing* terhadap waktu untuk kh yang berbeda.

Flashing terletak pada kedalaman 267 m untuk $kh = 3$ darcy-m dan $kh = 6$ darcy-m, pada awal simulasi, kemudian bergerak turun di mana laju aliran pada kepala sumur dijaga konstan pada 90 t/h sampai dengan 600 s dan berubah secara linier pada 180 t/h selama selang waktu 600 s ke 1200 s. Dari sudut pandang termodinamika, titik *flashing* tergantung pada tekanan dan suhu fluida pada *feed zone*. Dalam studi ini fasa fluida yang masuk ke dalam sumur selalu dalam wujud likuid, sehingga suhu fluida dapat diperlakukan konstan. Oleh karena itu, perubahan kedalaman *flashing* untuk kh yang berbeda terutama disebabkan oleh P_{wb} . Kedalaman *flashing* untuk $kh = 3$ darcy-m terletak pada 267 m dari awal simulasi dan turun ke 305 m pada 600 s. Sementara

itu, untuk $kh = 6$ darcy-m, *flashing* terletak 267 m dan turun ke 290 m. Hasil simulasi ini berkorespondensi dengan $P_{wb} = 77,5$ bar untuk $kh = 3$ darcy-m dan $P_{wb} = 78,5$ bar untuk $kh = 6$ darcy-m.

Perubahan kedalaman *flashing* juga tergantung pada kh . Ini disebabkan oleh kenyataan bahwa P_{wb} tergantung pada kh . Laju penurunan P_{wb} lebih tinggi untuk nilai kh rendah. Sebagai hasilnya, laju penurunan kedalaman *flashing* juga lebih tinggi untuk kh rendah. Untuk kasus $kh = 3$ darcy-m, penurunan P_{wb} sebesar 6 bar dari permulaan sampai 1200 s menyebabkan kedalaman *flashing* turun sebesar 70 m. Sementara untuk $kh = 6$ darcy-m penurunan P_{wb} sebesar 3,8 bar menyebabkan perubahan kedalaman *flashing* sebesar 43 m.

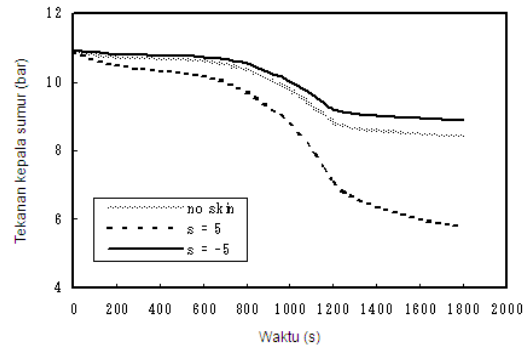
4.3. Pengaruh heterogenitas permeability-thickness (kh)

Untuk mengevaluasi perubahan permeabilitas pada zona sekitar sumur baik penurunan maupun peningkatan kh secara numerik pada karakteristik sumur dan tekanan reservoir, istilah “skin” yang biasanya muncul dalam *line source solution* akan digunakan. Dalam studi ini, istilah “skin” didefinisikan sebagai berikut (Horne, 1995),

$$s = \left(\frac{k}{k_s} - 1 \right) \ln \frac{r_s}{r_w} \quad (7)$$

Prosedur evaluasi dilakukan sebagai berikut,

- 1) Tentukan radius zona r_s yang rusak/terstimulasi
- 2) Asumsikan/perkirakan permeabilitas zona skin, k_s untuk daerah yang rusak/terstimulasi
- 3) Hitung nilai s menggunakan persamaan (7)
- 4) Nilai r_s dan k_s digunakan sebagai input data dari program.



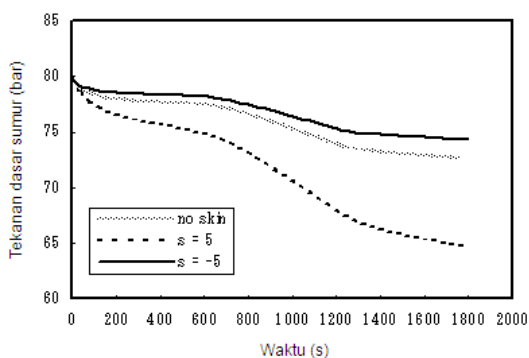
Gambar 9. Pengaruh skin pada perubahan tekanan kepala sumur (P_{wh}) terhadap waktu.

Dua nilai parameter skin, 5 dan -5 , akan dievaluasi. Nilai ini berkorespondensi dengan penurunan dan kenaikan permeabilitas masing-masing sebesar $1,1 \times 10^{-12}$ m² and $4,6 \times 10^{-12}$ m², dari permeabilitas reservoir homogen sebesar 3×10^{-12} m². Radius zona rusak/terstimulasi r_s diasumsikan sebesar 2 m. Gambar



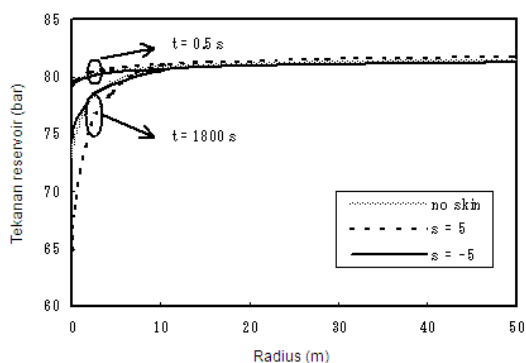
9 dan 10 menunjukkan perubahan P_{wh} dan P_{wb} terhadap waktu untuk kondisi dengan dan tanpa skin.

Untuk skin positif ($s = 5$), P_{wh} dan P_{wb} selalu lebih rendah daripada yang tanpa skin. Perbedaan P_{wh} dan P_{wb} untuk skin positif dan tanpa skin menjadi semakin besar seiring dengan waktu. Sebaliknya, untuk skin negatif (-5) P_{wh} dan P_{wb} selalu lebih tinggi daripada yang tanpa skin. Perlu dicatat bahwa meskipun nilai mutlak skin adalah sama, skin positif memberikan penurunan tekanan yang lebih besar daripada skin negatif yang menyebabkan kenaikan lebih kecil untuk P_{wh} dan P_{wb} .



Gambar 10. Pengaruh skin pada perubahan tekanan dasar sumur (P_{wb}) terhadap waktu.

Gambar 11 menggambarkan distribusi tekanan reservoir untuk kondisi di atas. Distribusi tekanan diambil untuk waktu perhitungan 0 s sampai 1800 s. Dapat dilihat bahwa pada awal perhitungan (0 s) seluruh distribusi tekanan reservoir adalah identik (hampir sama). Sementara itu perubahan yang cukup signifikan setelah 1800 s dapat teramati, khususnya untuk distribusi tekanan pada zona dekat sumur dengan jarak kurang dari 10 m. Terlihat dengan jelas bahwa pada jarak 2 m dekat dengan sumur di mana perubahan permeabilitas terjadi, distribusi tekanan reservoir menunjukkan penurunan untuk skin positif dan kenaikan untuk skin negatif apabila dibandingkan dengan kondisi tanpa skin.



Gambar 11. Pengaruh skin terhadap tekanan reservoir.

5. Kesimpulan

Dari hasil analisis di atas, beberapa kesimpulan penting dapat diambil dari studi ini sebagai berikut,

- 1) Simulasi numerik untuk kondisi sumur dan reservoir yang diberikan menunjukkan bahwa fungsi tangga dan perubahan interval waktu untuk laju aliran menghasilkan penurunan tajam tekanan kepala sumur. Perubahan interval waktu yang lebih panjang untuk laju aliran menunjukkan penurunan yang perlahan-lahan.
- 2) Waktu yang dibutuhkan oleh tekanan kepala sumur dan dasar sumur untuk stabil tercapai lebih cepat untuk perubahan interval waktu laju aliran yang lebih lama.
- 3) Nilai kh yang rendah menyebabkan tekanan dasar sumur yang lebih tinggi untuk kondisi laju alir rendah, dan akan memberikan nilai yang lebih rendah untuk kondisi laju aliran tinggi. Perubahan massa jenis fluida di dasar sumur terhadap waktu diperkirakan sebagai parameter yang menghasilkan fenomena tersebut.
- 4) Nilai kh yang tinggi menghasilkan pergerakan kedalaman *flashing* yang lebih kecil untuk kondisi laju aliran yang sama. Laju penurunan kedalaman *flashing* lebih tinggi untuk kh rendah.
- 5) Studi numerik pengaruh skin menggunakan model terintegrasi sumur dan reservoir dapat digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan perubahan permeabilitas reservoir.

Daftar Pustaka

- [1] Chisholm, D., *Pressure Gradients Due to Friction during the Flow of Evaporating Two-Phase Mixtures in Smoother Tubes and Channels*, International Journal Heat Mass Transfer, 16 (1973) 347-358.
- [2] Horne, R. N., *Modern Well Test Analysis. A Computer-Aided Approach*. 2nd Edition. Petroway, Inc., 1995.
- [3] Itoi, R., Fukuda, M., Sekoguchi, K., and Iwaki, T., *Theoretical Study on Steam and Water Flow Rates from Geothermal Production Wells*, Journal of Geothermal Research Society of Japan, 5 (1995) 235-248.
- [4] Miller, C. W., *Wellbore User's Manual*, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, (1980a).
- [5] Miller, C. W., *Eliminating the Wellbore Response in Transient Well Test Analysis*, Proceedings, 6th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, (1980b).

