

# Radius Pengurasan Efektif dari Sumur Vertikal yang Berproduksi pada Reservoir dengan *Bottom Water Aquifer*

Oleh :

Muhammad Asad \*

Dr. Ir. Taufan Marhaendrajana \*\*

## Abstract

It is a general phenomenon that a reservoir which has a bottom water aquifer, when is produced tends to increase the water level and penetrate to the wellbore known as water coning. The water coning causes loss of oil production because it obstructs the oil flow rate and the water flow rate will increase. Furthermore, the increase of water flow rate can also cause other problems that decreases the productivity of the well and increase the cost for water treatment. When water coning occurs, the drainage radius is called limited to the area that is formed by the cone. For practical purpose, around the cone area occurred effective drainage radius. The area of effective drainage radius is affected by vertical-horizontal permeability, porosity, mobility ratio, flow rate, perforation length, and aquifer strength. Therefore, making additional wells in the area where oil are not drained effectively are meant to drain the reservoir efficiently. This paper is intended to estimate the effective drainage radius of vertical wells through various sensitivity tests towards parameters which take effect. In this case, commercial 3-D simulator is used to model the reservoir and the waterconing phenomenon. Afterward, from the result of sensitivity tests will be conducted a non-linear regression, so that empiric equation is constructed to determine the effective well drainage radius.

Keywords : waterconing, drainage radius, sensitivity tests.

## Sari

Sudah menjadi fenomena umum bahwa reservoir yang memiliki *bottom water aquifer*, ketika diproduksi akan cenderung menyebabkan naiknya air menembus ke lubang sumur atau lebih sering dikenal dengan istilah kerucut air (*water coning*). Peristiwa *water coning* menyebabkan kerugian karena akan menghambat laju alir minyak dan produksi air akan naik. Selain itu, meningkatnya produksi air akibat peristiwa *water coning* dapat menyebabkan berbagai masalah lain yang akan berujung pada berkurangnya produktivitas sumur dan tingginya biaya pengolahan air dipermukaan.

Ketika peristiwa *water coning* terjadi, maka daerah pengurasan sumur dianggap terbatas oleh area terbentuknya cone tersebut. Untuk tujuan praktis, terdapat area disekitar cone dimana pengurasan sumur efektif. Luas dari daerah pengurasan efektif tersebut dipengaruhi oleh permeabilitas vertikal-horizontal, porositas, *mobility ratio*, laju produksi, panjang perforasi, dan kekuatan aquifer. Oleh karena itu dengan menempatkan sumur tambahan di area dimana minyak tidak terkuras secara efektif diharapkan mampu menguras reservoir secara efisien.

Paper ini bertujuan untuk memperkirakan radius pengurasan efektif sumur vertikal melalui serangkaian uji sensitivitas terhadap parameter-parameter yang berpengaruh. Dalam hal ini, simulator komersial 3-D digunakan untuk memodelkan reservoir dan peristiwa waterconing. Kemudian dari hasil uji sensitivitas akan dilakukan regresi non-linear, sehingga didapatkan persamaan empiris untuk menentukan radius pengurasan

Kata kunci : kerucut air, daerah pengurasan, uji sensitivitas.

\*) Mahasiswa Program Studi Teknik Perminyakan - Institut Teknologi Bandung

\*\*) Dosen Pembimbing Program Studi Teknik Perminyakan - Institut Teknologi Bandung

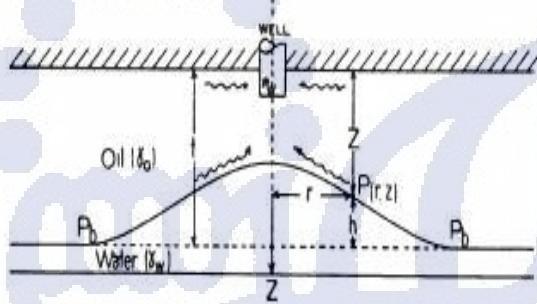
## I. PENDAHULUAN

Kebanyakan reservoir di alam memiliki kolom air dibawahnya (*Bottom Water Aquifer*) yang berfungsi sebagai tenaga pendorong (*driving mechanism*). *Aquifer* menyebabkan air yang terkumpul dibagian bawah akan berusah mendorong minyak di lapisan atasnya, sehingga tekanan reservoir biasanya akan konstan untuk selang waktu tertentu. Akibatnya, untuk reservoir yang memiliki tenaga pendorong *bottom*

*water*, sering terjadi fenomena *water coning*. Fenomena *water coning* merupakan kondisi dimana air yang berasal dari aquifer akan bergerak menuju lubang sumur seiring dengan proses produksi minyak dilapisan diatasnya. Ilustrasi *water coning* dapan dilihat pada Gambar-1.

Akibat proses produksi minyak, terjadi perbedaan tekanan antara daerah disekitar sumur dengan daerah jauh dari lubang sumur. Perbedaan tekanan tersebut menyebabkan minyak dapat mengalir

menuju lubang bor. Pada gambar diatas penurunan tekanan terjadi pada titik  $P(r,z)$ . Penurunan tekanan disekitar lubang sumur akan menyebabkan batas



Gambar-1. Skema *water coning* (Muskat & Wyckoff, 1934)

air minyak naik. Hal ini dikarenakan air akan selalu membentuk kolom ketinggian ( $h$ ) sehingga tekanan hidrostatik kolom tersebut akan sama dengan tekanan pada batas minyak-air ( $P_b$ ) yang berada jauh dari lubang sumur agar tercipta keseimbangan hidrostatik. Maka dari Gambar-1 dapat ditulis persamaan:

$$P(r, z) + \gamma_w gh = P_b$$

Seiring dengan terus berkurangnya tekanan disekitar lubang sumur, maka tinggi kolom air di sekitar daerah tersebut akan terus bergerak naik dan air akan membentuk pola yang mirip dengan kerucut. Kerucut air akan terus berkembang dan bergerak naik hingga menyentuh ujung perforasi dan kemudian air akan bercampur dengan minyak dan ikut terproduksi. Terproduksinya air akan sangat merugikan karena selain mengurangi perolehan minyak, fenomena ini akan memperbesar biaya produksi. Ini dikarenakan adanya pengolahan khusus yang dibutuhkan untuk memisahkan minyak dan air dipermukaan.

Radius pengurasan merupakan konsep dimana transien tekanan mencapai titik terjauh dari lubang sumur dimana perbedaan tekanan tersebut dianggap efektif masih mampu mengalirkan minyak. Pada saat terjadi *water coning*, wilayah radius pengurasan sumur efektif terbatas pada daerah dimana cone terbentuk. Pada daerah diluar cone dianggap minyak tidak mengalir secara efektif. Oleh karena itu dengan menempatkan sumur baru didaerah dimana tidak terbentuk cone, dengan anggapan tidak akan terjadi interferensi cone antar sumur diharapkan akan mampu membantu meningkatkan pengurasan minyak dan mendapatkan recovery minyak yang lebih tinggi.

Oleh sebab itu, akan sangat berguna jika kita mampu menentukan seberapa jauh radius pengurasan efektif pada saat terjadinya *water coning*, sehingga nantinya besar radius tersebut dapat digunakan dalam menentukan posisi sumur dan jarak antara sumur (*well spacing*). Paper ini membahas faktor yang mempengaruhi radius pengurasan efektif dari hasil simulasi numerik untuk beberapa sensitivitas. Hasil

dari simulasi tersebut dibuat sebuah persamaan usulan untuk menentukan radius pengurasan sumur.

## II. STUDY LITERATUR

Sampai saat ini, pembahasan mengenai fenomena *water coning* sudah cukup banyak dibahas. Akan tetapi arah pembahasan lebih banyak mengarah pada penentuan waktu laju tembus air dan laju kritis. Sehingga penulis mencoba mencari teori-teori yang terkait dengan *water coning* dari paper-paper tersebut dan mencari hubungannya dengan radius pengurasan.

Muskat dan Wyckoff (1935) dalam papernya menjelaskan proses terjadinya *water coning* akibat dari perbedaan tekanan pada lubang sumur. Dijelaskan bahwa kenaikan permukaan air terjadi akibat perubahan tekanan pada daerah sekitar lubang dasar sumur akibat dari proses produksi. Air pada daerah sekitar lubang sumur akan naik dan membentuk kerucut sampai memenuhi kondisi keseimbangan tekanan hidrostatik dengan daerah diluar coning

Kuci-Tze Chou (2002), menjelaskan adanya daerah radius *coning* efektif dimana daerah tersebut dibatasi oleh batas terujung *coning*. Panjang radius *coning* tersebut yang menjadi dasar penentuan panjang daerah pengurasan *coning*. Panjang daerah coning efektif ditentukan berdasarkan nilai saturasi dengan menggunakan simulasi.

Ashok Singhal (1996), menyatakan dalam papernya, bahwa untuk tipikal reservoir dengan *bottom water aquifer*, wilayah radius pengurasannya dibatasi oleh daerah dimana cone terbentuk. Sehingga dengan penambahan sumur diluar batas cone, dimana tidak terjadi interferensi antar cone, dianggap akan mampu meningkatkan *recovery* minyak.

Sobocinsky dan Cornelius (1964), melakukan percobaan menggunakan model yang dibuat dari pasir, dimana bagian atas merupakan zona minyak dan bagian bawahnya merupakan zona air. Percobaan ini bertujuan untuk menghitung waktu tembus air dan menghasilkan persamaan berdasarkan parameter-parameter yang mempengaruhi.

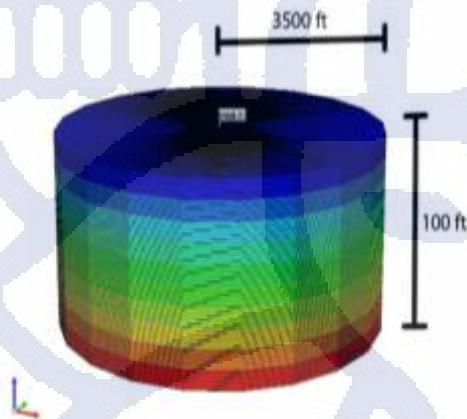
Yang dan Wattenbarger, (1991) menghasilkan persamaan penentuan waktu tembus air dengan melakukan simulasi numerik. Persamaan yang dikembangkan memuat pengaruh perubahan ketinggian kerucut air. Parameter sensitivitas yang dilakukan dalam paper tersebut menjadi acuan dalam pengerjaan simulasi ini.

## III. MODEL RESERVOIR DAN SIMULASI

Untuk mencari panjang radius efektif pengurasan, maka simulasi kerucut air dimodelkan dengan menggunakan model reservoir *homogen*



berbentuk radial ( $r$ - $\theta$ - $z$ ) dengan sumur vertikal berada ditengahnya agar respon tekanan dan aliran mendekati kondisi reservoir yang sebenarnya (Gambar-2). Untuk arah horizontal terdiri dari 201 grid yang berukuran makin membesar ketika menjauhi lubang sumur, dan arah vertikal yang terdiri dari 50 grid dengan ketebalan konstan. Pemilihan jumlah grid arah horizontal yang cukup banyak bertujuan agar pembacaan panjang radius dari *cone* lebih akurat



Gambar-2. Model reservoir

.Permeabilitas arah vertikal lebih kecil daripada permeabilitas horizontal sehingga memenuhi kondisi Anisotrop. Bagian bawah reservoir terdapat *aquifer* yang relatif besar sehingga tekanan reservoir konstan hingga beberapa tahun reservoir diproduksi. Tekanan kapiler diabaikan dan tidak ada gas cap pada keadaan awal. Model ini kemudian dijalankan menggunakan simulator *IMEX*. Karakteristik batuan, fluida reservoir, geometri sumur, dan aquifer dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel-1. Permeabilitas relatif

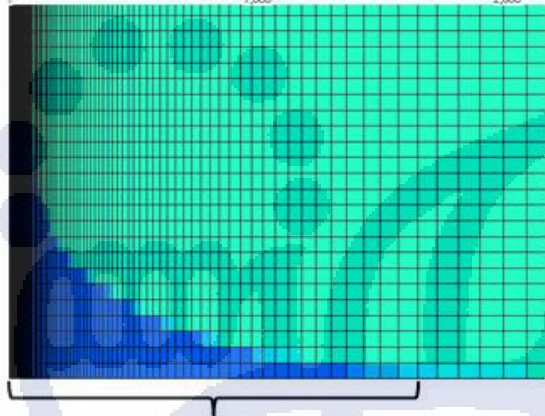
Sw	Kro	Krw
0.2	0	1
0.2375	0	0.895782
0.275	0	0.741685
0.3125	0	0.611185
0.35	0.005203	0.501436
0.3875	0.017825	0.409757
0.425	0.034583	0.333629
0.4625	0.055366	0.270708
0.5	0.080078	0.218816
0.5375	0.108641	0.175956
0.575	0.140984	0.140307
0.6125	0.177045	0.110236
0.65	0.216769	0.084296
0.6875	0.260107	0.061238
0.725	0.307012	0.040018
0.7625	0.357443	0.019805
0.8	0.41136	0
0.9	0.571916	0
1	0.756408	0

Tabel-2. Properti fluida dan batuan reservoir.

Properti fluida	
Densitas minyak	54.9827 lb/cuft
Densitas air	62.5 lb/cuft
Viskositas air	0.3 cp
Viskositas minyak	0.921cp
Kompresibilitas air	$3.75 \times 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$
FVF minyak @Pb	1.26 rb/stb
FVF air	1.03rb/stb
Properti batuan	
Porositas	0.25
Permeabilitas vertikal	50 mD
Permeabilitas horizontal	100 mD
Properti aquifer	
Model	Carter Tracy
Letak	<i>bottom-water</i>
Porositas	0.3
Permeabilitas	200 mD
Ketebalan zona aquifer	500 ft
Jari jari aquifer	3500 ft
Angle radius	$360^\circ$
Data-data lain	
Tekanan reservoir	4000 psi
Tekanan gelembung	3000 psi
Ketebalan zona minyak	100 ft
Jari-jari reservoir	3500 ft
Panjang perforasi	50 ft
Laju alir fluida	1000 stb/d

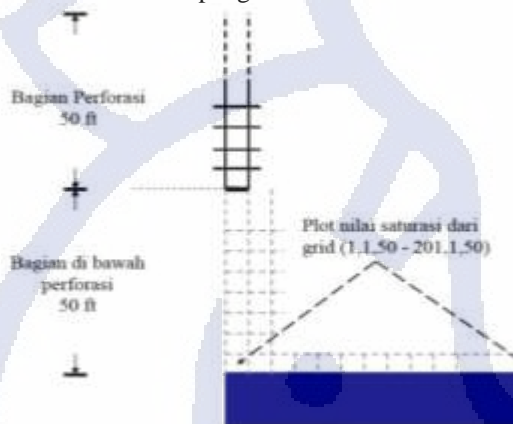
Simulasi numerik dilakukan untuk mendapatkan radius pengurasan efektif dari sumur. Panjang radius pengurasan efektif ditentukan pada saat pertama kali air masuk lubang bor, yaitu pada saat watercut sebesar 1%. Dengan kata lain, asumsi yang digunakan bahwa pada saat air mulai muncul maka produktivitas minyak akan berkurang.

Kemudian radius pengurasan efektif diukur dari lubang sumur sampai batas terujung *cone*. Batas terujung *cone* merupakan batas dimana saturasi air mulai mengecil mendekati nilai  $Sw_{irr}$  pada grid terbawah reservoir. Lihat Gambar-3. Agar penentuan radius pengurasan efektif lebih akurat, diplot nilai perubahan saturasi terhadap jarak pada grid terbawah Lihat Gambar-4. Radius pengurasan efektif ini diukur dari lubang sumur sampai titik terjauh perubahan saturasi air terhadap jarak mengecil mendekati nilai 0,00002. Lihat Gambar-5. Pemilihan tersebut berdasarkan pertimbangan bahwa untuk perubahan nilai saturasi terhadap jarak yang lebih kecil dari 0.00002 aliran fluida dianggap relatif kecil dan dapat diabaikan.

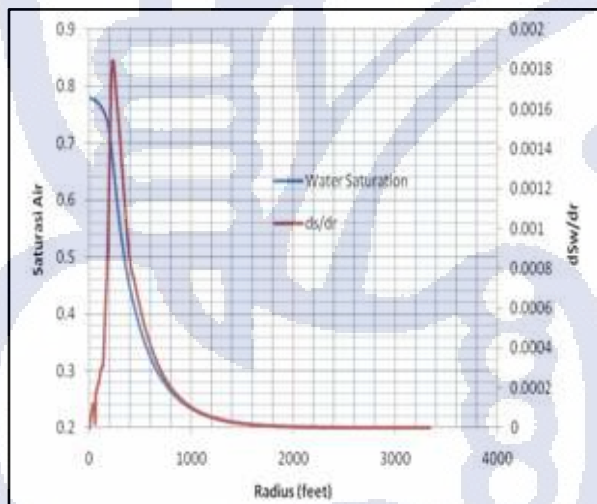


Radius pengurasan efektif

Gambar-3. Radius pengurasan efektif



Gambar-4. Grid terbawah bidang kontak minyak-air

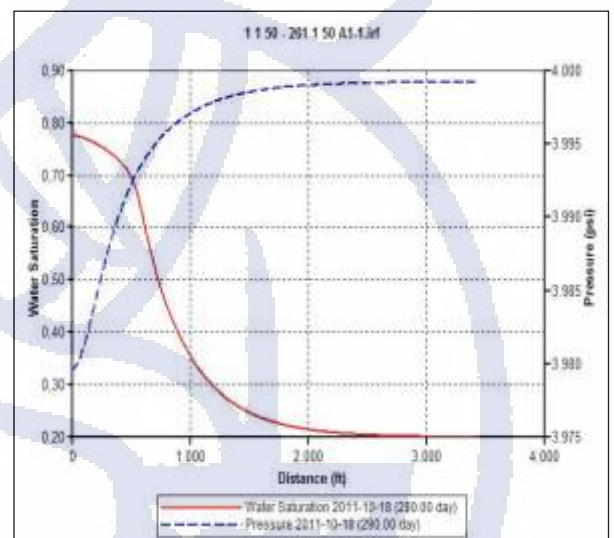


Gambar-5. Profil saturasi pada grid diatas bidang kontak minyak-air

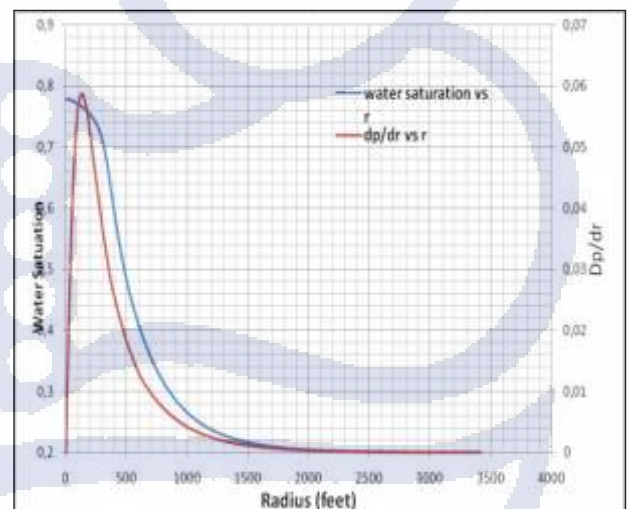
Pada sistem reservoir, perbedaan tekanan terjadi diakibatkan oleh adanya proses produksi, sehingga tekanan disekitar sumur akan turun. Penurunan tekanan tersebut akan terus merambat menjauhi lubang sumur. Perubahan tekanan dalam arah horizontal inilah yang

digunakan untuk membuktikan ada tidaknya aliran fluida pada jarak tertentu dari lubang sumur. Pada Gambar-6, terdapat grafik saturasi air yang menggambarkan nilai saturasi pada grid terbawah. Makin menjauh dari lubang sumur maka nilai saturasinya akan mengecil sampai pada batas nilai saturasinya sebesar  $Sw_{irr}$ . Jarak dimana nilai saturasi air mendekati nilai  $Sw_{irr}$  dianggap sebagai batas terujung cone. Selain itu pada Gambar-6 juga terdapat grafik yang merupakan plot tekanan terhadap radius reservoir. Jika dibandingkan, Hasil perbandingan plot grafik saturasi air dan tekanan terhadap radius reservoir memperlihatkan bahwa rambatan tekanan berakhir tepat pada jarak batas terujung cone.

Plot  $dp/dr$  terhadap radius reservoir juga menunjukkan bahwa pada batas sekitar ujung cone, nilai  $dp/dr$  relatif konstan. Lihat Gambar-7. Oleh karena itu dapat kita simpulkan bahwa aliran fluida secara efektif hanya terjadi pada daerah dimana cone terbentuk.



Gambar-6. Plot saturasi air dan tekanan terhadap radius reservoir



Gambar-7. Plot saturasi air dan  $dp/dr$  terhadap radius reservoir.

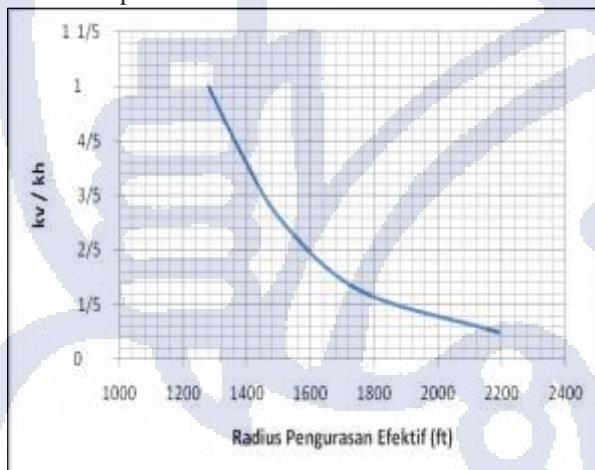


Proses simulasi dilakukan dengan uji sensitivitas terhadap parameter-parameter yang mempengaruhi panjang radius pengurasan. Uji sensitivitas digunakan untuk mengetahui pengaruh dari setiap parameter yang diuji agar dapat dihasilkan suatu persamaan yang mampu mendekati hasil sebenarnya. Pemilihan parameter tersebut didasarkan pada sumber literatur yang telah membahas masalah *water coning* sebelumnya. Parameter tersebut yaitu anisotropi (kv/kh), laju alir (Q), kekuatan aquifer, panjang perforasi, *mobility ratio* (M), porositas (Q), dan permeabilitas vertikal (kv). Plot antara  $dS/dr$  terhadap radius reservoir dari hasil simulasi uji sensitivitas dapat dilihat pada bagian Lampiran Gambar-16 sampai Gambar-23.

#### IV. HASIL SIMULASI DAN PERSAMAAN USULAN

##### Sensitivitas Anisotropi (kv/kh)

Dari lima kali simulasi untuk rentang nilai kv/kh, didapat kesimpulan bahwa makin besar nilai kv/kh, maka radius pengurasan akan semakin mengecil. Semakin besar perbandingan kv/kh maka nilai permeabilitas terhadap arah vertikal akan semakin besar. Akibatnya *coning* akan cenderung cepat bergerak naik menuju lubang perforasi. Kecenderungan *coning* untuk bergerak naik tidak diimbangi dengan kecepatan *coning* membesar kesamping. Sehingga semakin besar nilai kv/kh maka radius pengurasan efektifnya akan semakin kecil. Gambar-8 menunjukkan grafik perbandingan laju alir terhadap waktu tembus air untuk setiap simulasi.

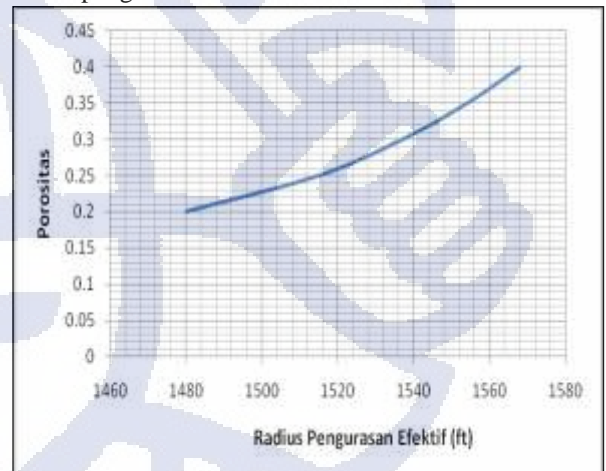


Gambar-8. Perbandingan anisotropi terhadap daerah pengurasan

##### Sensitivitas porositas.

Hasil lima kali simulasi menunjukkan bahwa makin besar porositas maka radius pengurasan efektif akan semakin besar. Akan tetapi perubahan panjang radius pengurasan ini sangatlah kecil, sekitar 20 ft untuk tiap kasus simulasi. Porositas lebih berpengaruh pada besarnya volume minyak didalam pori-pori batuan dan kurang berpengaruh pada proses pengurasan minyak. Sehingga nilai radius pengurasan

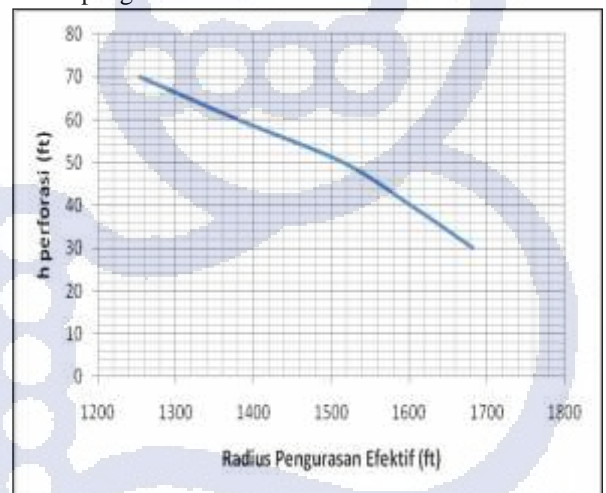
hasil dari simulasi dengan perubahan nilai rate sebesar 500 bbl/day cenderung kecil. Dapat disimpulkan bahwa perubahan porositas kurang berpengaruh terhadap panjang radius pengurasan efektif. Gambar-9 menunjukkan hubungan antara nilai prositas terhadap radius pengurasan efektif.



Gambar-9 menunjukkan grafik hubungan antara porositas dan radius pengurasan efektif.

##### Sensitivitas Panjang Perforasi

Semakin panjang perforasi, menunjukkan bahwa radius pengurasan efektif akan semakin mengecil. Dalam bentuk simulasi ini, semakin panjang perforasi, maka ujung perforasi akan mendekati batas kontas minyak-air. Akibatnya *waktu* tembus air mencapai *water cut* 1 % akan semakin singkat dan radius pengurasan efektif tidak akan terlalu cepat merambat menjauhi lubang bor. Sehingga radius pengurasan yang terlihat dari hasil simulasi akan lebih kecil. Gambar-10 menunjukkan hubungan antara panjang perforasi dengan radius pengurasan efektif.



Gambar-10. Hubungan panjang perforasi dengan radius pengurasan efektif.

##### Sensitivitas laju produksi

Dari hasil lima kali simulasi untuk beberapa nilai laju produksi, hasil simulasi menunjukkan bahwa laju produksi berbanding terbalik dengan panjang

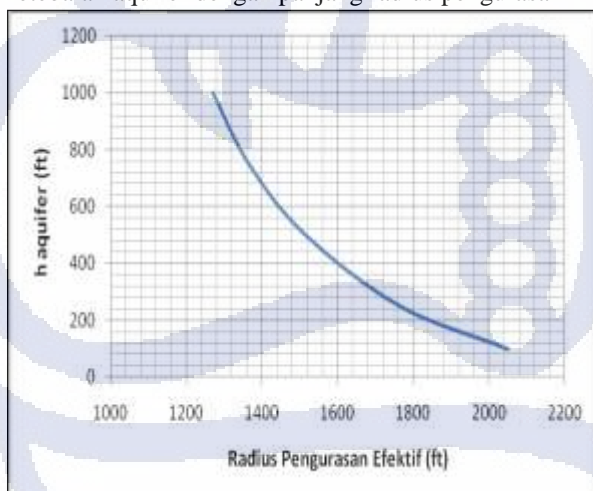
radius pengurasan. Semakin besar laju produksi maka semakin cepat minyak terkuras dan digantikan dengan air yang mendorong dari bawah. Akibatnya air akan semakin cepat bergerak menuju lubang bor. Kecepatan *coning* membesar dalam arah vertikal akan lebih cepat ketimbang dalam arah horizontal, akibatnya radius pengurasan efektif akan semakin kecil. Gambar-11 menunjukkan grafik hubungan antara laju produksi dengan panjang radius pengurasan efektif.



Gambar-11. Hubungan laju produksi dengan panjang radius pengurasan efektif.

#### Sensitivitas ketebalan aquifer

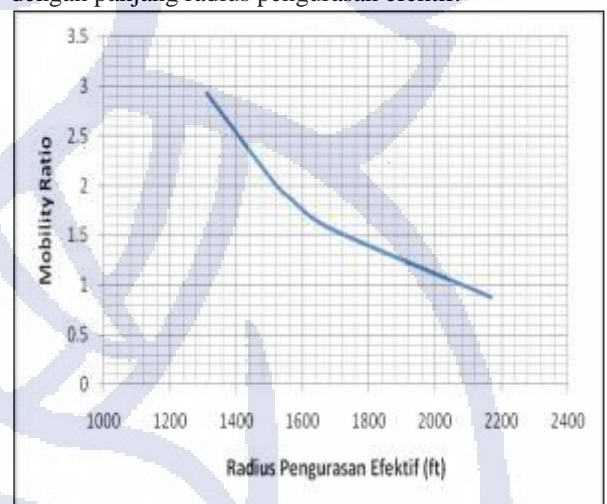
Hasil simulasi menunjukkan makin tebal aquifer maka radius pengurasan efektif akan semakin kecil. Tebalnya lapisan aquifer mengacu pada kekuatan dorongan aquifer tersebut. Semakin tebal maka gaya mendorong yang dihasilkan aquifer tersebut akan semakin besar. Sehingga air akan lebih cepat mengarah vertikal menuju lubang bor dibanding berkembang ke arah horizontal menjauhi lubang bor. Akibatnya, jika dibandingkan dengan aquifer yang memiliki dorongan lebih kecil, aquifer dengan gaya dorong yang lebih besar akan menyebabkan radius pengurasannya efektif lebih kecil. Gambar-12 menunjukkan hubungan antara ketebalan aquifer dengan panjang radius pengurasan



Gambar-12. Hubungan ketebalan aquifer terhadap radius pengurasan efektif.

#### Sensitivitas Mobility Ratio

Mobility ratio merupakan perbandingan mobilitas air dengan mobilitas minyak. Makin besar mobility ratio menunjukkan bahwa air akan cenderung bergerak mendahului minyak. Dari hasil lima kali simulasi menunjukkan bahwa kasus yang memiliki mobility ratio kecil akan memiliki radius pengurasan efektif yang lebih besar dibanding dengan kasus yang memiliki mobility ratio yang lebih besar. Semakin besar mobility ratio maka air akan bergerak lebih cepat mendahului minyak menuju lubang perforasi. Sama seperti pembahasan dianalisis sensitivitas sebelumnya, kerucut air akan cenderung bergerak ke arah vertikal dibanding arah horizontal. Akibatnya daerah pengurasan efektif akan cenderung lebih kecil. Gambar-13 menunjukkan grafik hubungan antara mobility ratio dengan panjang radius pengurasan efektif.



Gambar-13. Hubungan antara mobility ratio dengan panjang radius pengurasan efektif.

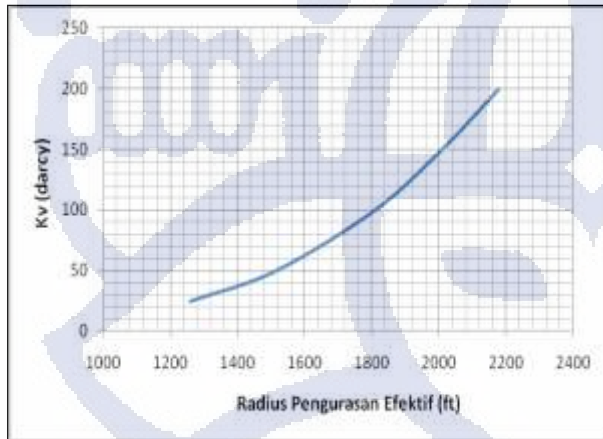
#### Sensitivitas Permeabilitas (kv)

Simulasi dengan sensitivitas permeabilitas ini digunakan untuk mengetahui besarnya pengaruh dari besarnya nilai permeabilitas. Sensitivitas dilakukan dengan merubah besarnya nilai kv dan kh tetapi dengan perbandingan kv/kh yang tetap sebesar 0,5. Dari lima kali simulasi hasil yang didapat menunjukkan bahwa semakin besar nilai kv dan kh maka radius pengurasan efektif akan semakin besar, dan sebaliknya. Semakin besar nilai permeabilitas artinya semakin mudah fluida tersebut untuk mengalir dan semakin cepat pula respon tekanan merambat menjauhi lubang sumur. Sehingga untuk reservoir dengan permeabilitas lebih besar maka bentuk *coning* dan daerah pengurasan akan semakin besar. Gambar-14 menunjukkan hubungan antara jari-jari reservoir dengan radius pengurasan efektif

Keseluruhan hasil dari uji sensitivitas dapat dilihat pada Tabel-3 bagian Lampiran. Hasil tersebut digunakan sebagai data input yang kemudian dilakukan regresi non-linear dengan menggunakan bantuan software *EXCELSTAT*. Dari hasil regresi non



linear untuk derajat polinom ber-orde 2, dihasilkan persamaan dibawah ini dengan harga  $R^2$  sebesar 0.987. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa panjang radius pengurasan berbanding lurus dengan prositas dan permeabilitas vertikal, serta berbanding terbalik terhadap anisotropy, ketebalan aquifer, panjang perforasi, laju alir, dan perbandingan mobilitas.



Gambar-14. Hubungan antara jari-jari reservoir terhadap radius pengurasan efektif.

$$r_{eff} = \frac{a}{bxc}$$

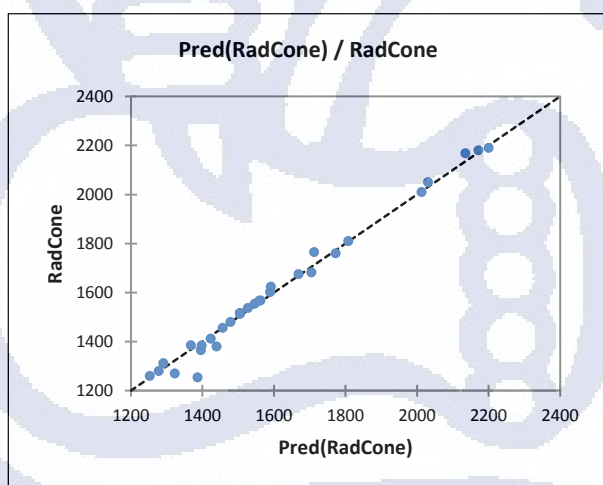
Dimana :

$$a = 9804,5387x\phi^{0,079738}xkv^{0,264607}$$

$$b = haq^{0,18619}xp^{0,24394}$$

$$c = q^{0,08053}xM^{0,41675}x\frac{kv}{kh}^{0,23602}$$

Keakuratan hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar-15. Terlihat bahwa persamaan usulan dan hasil simulasi hampir berada dalam satu garis lurus sehingga dapat dikatakan cukup akurat.



Gambar-15. Perbandingan radius pengurasan efektif cone hasil simulasi terhadap persamaan usulan

## V. DISKUSI

Hasil dari simulasi ketujuh parameter yang berbeda menggambarkan hasil yang cukup memuaskan. Radius pengurasan efektif memiliki panjang yang sama dengan jarak dimana terjadi perubahan tekanan terhadap jari-jari reservoir pada waktu yang sama (Gambar-6 & 7). Ini menunjukkan bahwa hanya daerah yang dibatasi oleh jari-jari kerucut air yang merupakan daerah dimana terjadi pengurasan reservoir secara efektif. Di luar wilayah yang dibatasi oleh jari-jari kerucut pengurasan minyak bisa dianggap kecil atau diabaikan.

Pengukuran panjang radius efektif berdasarkan nilai perubahan saturasi air terhadap jarak pada grid terbawah dinilai cukup merepresentasikan. Dengan asumsi bila terjadi perubahan saturasi maka terjadi aliran fluida, sehingga dapat diinterpretasikan bahwa jarak tersebut merupakan radius pengurasan efektif.

Disisi lain, justifikasi bahwa pengurasan efektif terjadi sampai saat air mulai mencapai lubang perforasi didasarkan kenyataan bahwa pada kondisi tersebut aliran minyak mulai terganggu dengan kehadiran air, sehingga dinilai setelahnya merupakan kondisi yang tidak efektif. Dengan mengetahui panjang radius pengurasan efektif dari tiap sumur, maka dapat digunakan sebagai patokan dalam penempatan sumur (*well spacing*) untuk reservoir tipis dengan tenaga pendorong aquifer kuat yang memungkinkan terjadi problem kerucut air diawal-awal produksi. Dengan adanya penempatan sumur berdasarkan pada batas daerah pengurasan efektif, diharapkan dapat menguras daerah-daerah yang sebelumnya tidak terkuras sehingga dapat meningkatkan *oil recovery* suatu lapangan secara lebih cepat.

Selain itu, dalam simulasi ini, karena penentuan panjang radius pengurasan efektif didasarkan pada perhitungan jumlah grid maka dibutuhkan jumlah grid yang cukup banyak dalam arah horizontal. Karena penentuan ujung dari radius pengurasan efektif berdasarkan grid terjauh dari lubang sumur dimana saturasi mulai naik, maka semakin banyak grid pembacaan titik tersebut akan semakin akurat. Dalam simulasi ini digunakan jumlah grid sebanyak 201 grid dengan ukuran bervariasi untuk jari-jari reservoir sepanjang 3500 ft. Akan lebih baik jika menambah jumlah grid, tetapi waktu yang dibutuhkan untuk simulasi akan semakin lama.

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil simulasi rambat tekanan searah jari-jari reservoir membuktikan bahwa daerah pengurasan efektif dibatasi pada daerah dimana terbentuknya kerucut air. Pada batas jari-jari kerucut air masih terdapat perbedaan tekanan yang memungkinkan terjadinya aliran minyak. Pengurasan diluar jari-jari kerucut air dapat diabaikan karena dianggap cukup kecil. Uji sensitivitas yang dilakukan dengan mencoba

mensimulasikan ketujuh parameter berbeda menghasilkan kesimpulan seperti berikut

- Semakin besar porositas, ketebalan aquifer, kv/kh, ketebalan perforasi, laju alir, dan *Mobility Ratio*, maka radius pengurasan efektif akan menjadi lebih kecil
- Semakin besar porositas dan permeabilitas maka radius pengurasan efektif akan semakin besar.
- Persamaan usulan untuk mendapatkan panjang radius pengurasan efektif cukup akurat.

Saran bagi penelitian lebih lanjut yakni :

- Agar hasil lebih akurat, maka dapat digunakan model dengan karakteristik yang heterogen
- Jumlah grid dalam arah horizontal diperbanyak.
- Dapat dilakukan simulasi dengan dua buah sumur dengan memperhatikan penempatan sumur berdasarkan radius pengurasan efektif masing-masing sumur.
- Menempatkan sumur secara berdekatan dengan jumlah yang paling optimum dengan mempertimbangkan keekonomian pengembangan lapangan.
- Data lapangan dapat digunakan untuk membuktikan keakuratan persamaan usulan yang dihasilkan.

## VII. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada pihak yang mengizinkan penggunaan software Computer Modelling Group (CMG), dengan simulator *IMEX* dalam permodelan fenomena kerucut air, dan software *EXCELSTAT* dalam penentuan persamaan usulan. Selain itu penulis mengucapkan terimakasih kepada Dr. Ir. Taufan Marhaendrajana, keluarga dan kerabat atas bantuan dan dukungannya untuk menyelesaikan studi ini.

## VIII. DAFTAR SIMBOL

$h$	= ketebalan zona minyak (ft)
$h_{aq}$	= ketebalan aquifer (ft)
$h_p$	= panjang interval perforasi (ft)
$kh$	= permeabilitas horizontal (mD)
$kv$	= permeabilitas vertikal (mD)
$q$	= laju alir fluida (STB/D)
$r_{eff}$	= radius pengurasan efektif (ft)
$\mu_o$	= viskositas minyak (cp)
$\mu_w$	= viskositas air (cp)
$\rho_o$	= densitas minyak (lb/cuft)
$\rho_w$	= densitas air (lb/cuft)
$\Phi$	= porositas (fraksi)
$M$	= mobility ratio (fraksi)

## IX. DAFTAR PUSTAKA

Chou, Kuci-Tze., 2002. Analysis of Water Coning Behavior with Critical Rate and Breakthrough Time via

Numerical Simulation Method, paper etd-0720105-215859.

Computer Modelling Group Ltd, IMEX, 2008.

Muskat, M., Wyckoff, R.D., 1935. An Approximate Theory of Water-coning in Oil Production. SPE-935144-G.

Singhal, A.K., 1996. Water and Gas Coning / Cresting : A Technology Overview, The Journal of Canadian Petroleum Technology.

Sobocinski, D.P., Cornelius, A.J., 1964. A correlation for predicting water coning time. SPE 894, 1964.

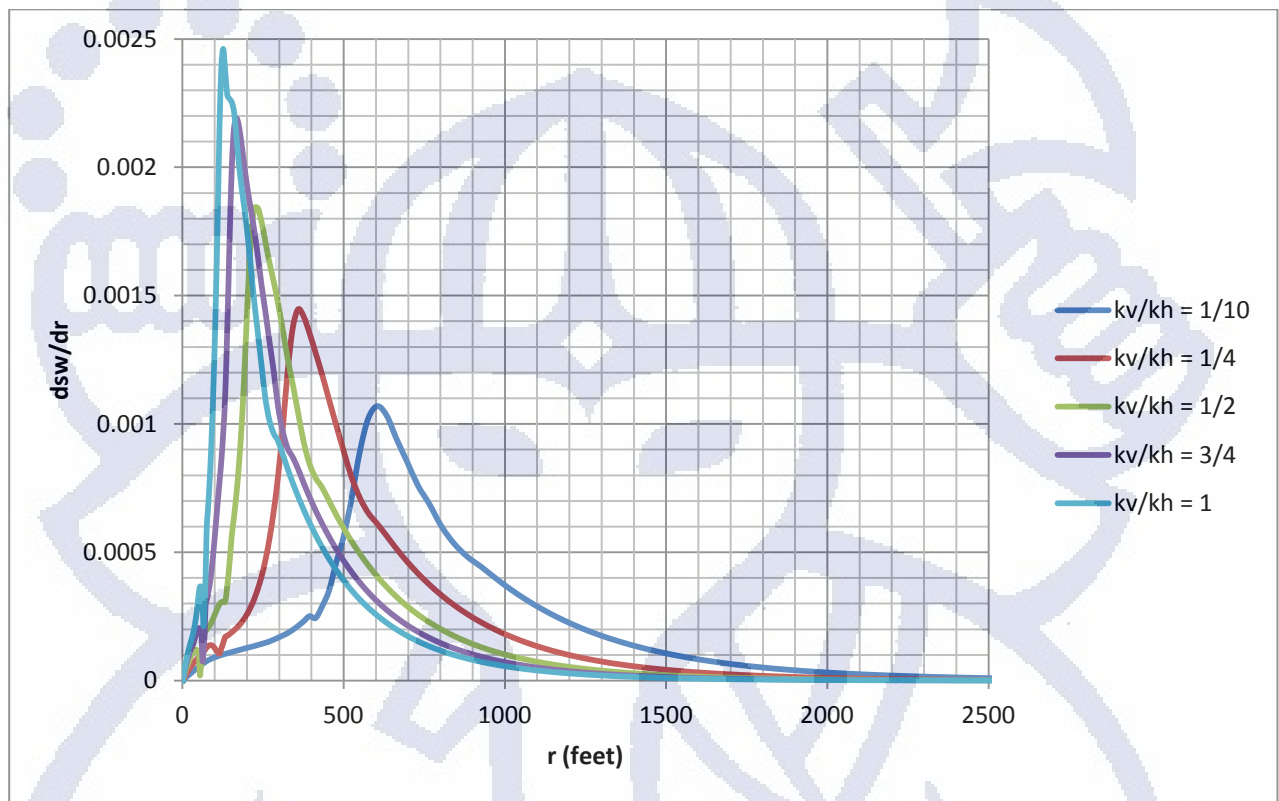
Yang, W., Wattenbarger, R.A., 1991. Water coning calculation for vertical and horizontal wells. SPE 22931.



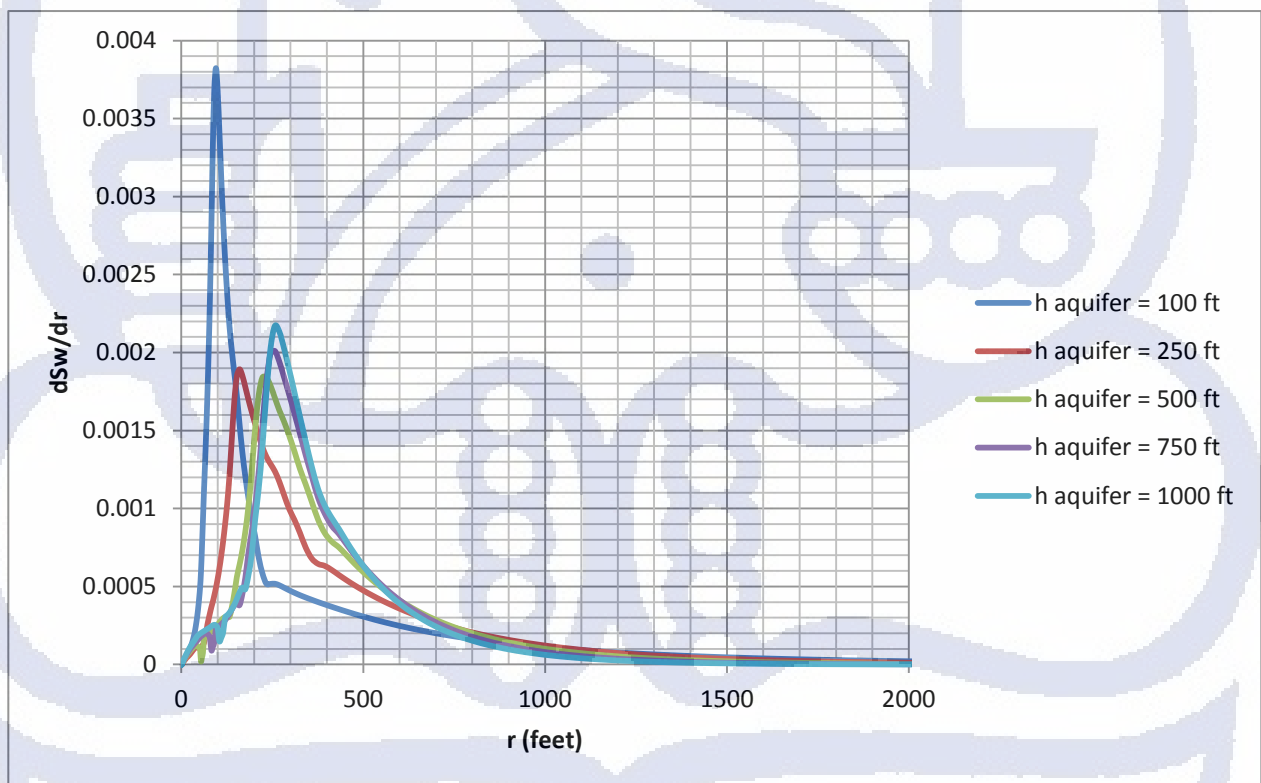
## LAMPIRAN

Tabel-3. Data hasil panjang daerah pengurasan dari simulasi sensitivitas dan persamaan usulan

Sensitivitas		
1		
kv/kh	r	r pred
1/10	2190 ft	2200.156 ft
1/4	1760 ft	1772.272 ft
1/2	1515 ft	1504.806 ft
3/4	1385 ft	1367.473 ft
1	1280 ft	1277.704 ft
5		
Porositas	r	r pred
0.2	1480 ft	1478.267 ft
0.25	1515 ft	1504.806 ft
0.3	1537 ft	1526.842 ft
0.35	1554 ft	1545.726 ft
0.4	1568 ft	1562.272 ft
2		
h aquifer	r	r pred
100 ft	2050 ft	2030.604 ft
250 ft	1765 ft	1712.107 ft
500 ft	1515 ft	1504.806 ft
750 ft	1365 ft	1395.382 ft
1000 ft	1270 ft	1322.605 ft
6		
Mobility R	r	r pred
0.876	2168 ft	2135.072 ft
1.583	1675 ft	1668.466 ft
1.8649	1566 ft	1558.315 ft
2.028	1515 ft	1504.806 ft
2.9315	1312 ft	1290.599 ft
3		
h perforasi	r	r pred
30 ft	1682 ft	1704.507 ft
40 ft	1602 ft	1588.989 ft
50 ft	1515 ft	1504.806 ft
60 ft	1380 ft	1439.345 ft
70 ft	1254 ft	1386.225 ft
7		
kv	r	r pred
25 md	1260 ft	1252.638 ft
50 md	1515 ft	1504.806 ft
100 md	1810 ft	1807.737 ft
150 md	2010 ft	2012.475 ft
200 md	2180 ft	2171.652 ft
4		
Q	r	r pred
500 b/d	1624 ft	1591.192 ft
1000 b/d	1515 ft	1504.806 ft
1500 b/d	1456 ft	1456.463 ft
2000 b/d	1412 ft	1423.109 ft
2500 b/d	1384 ft	1397.764 ft

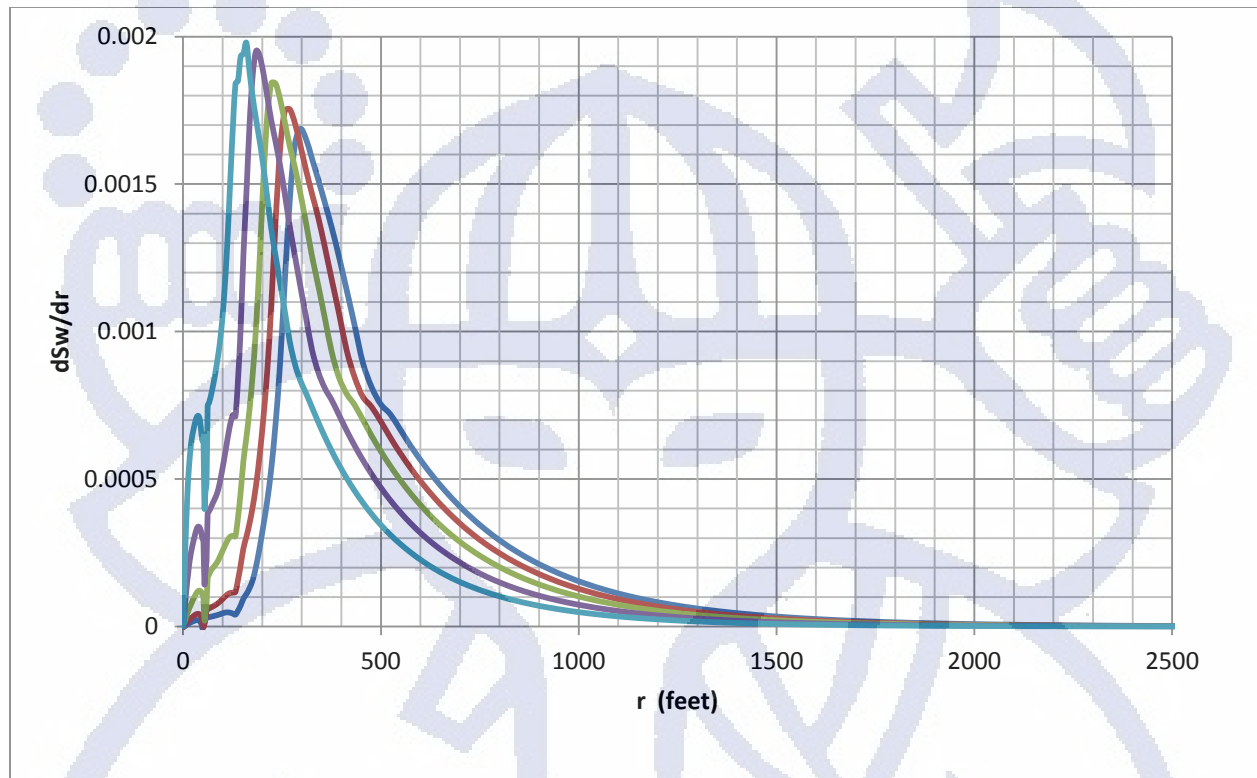


Gambar-16. Plot  $dS_w$  vs  $r$  untuk beberapa nilai  $K_v/k_h$ .

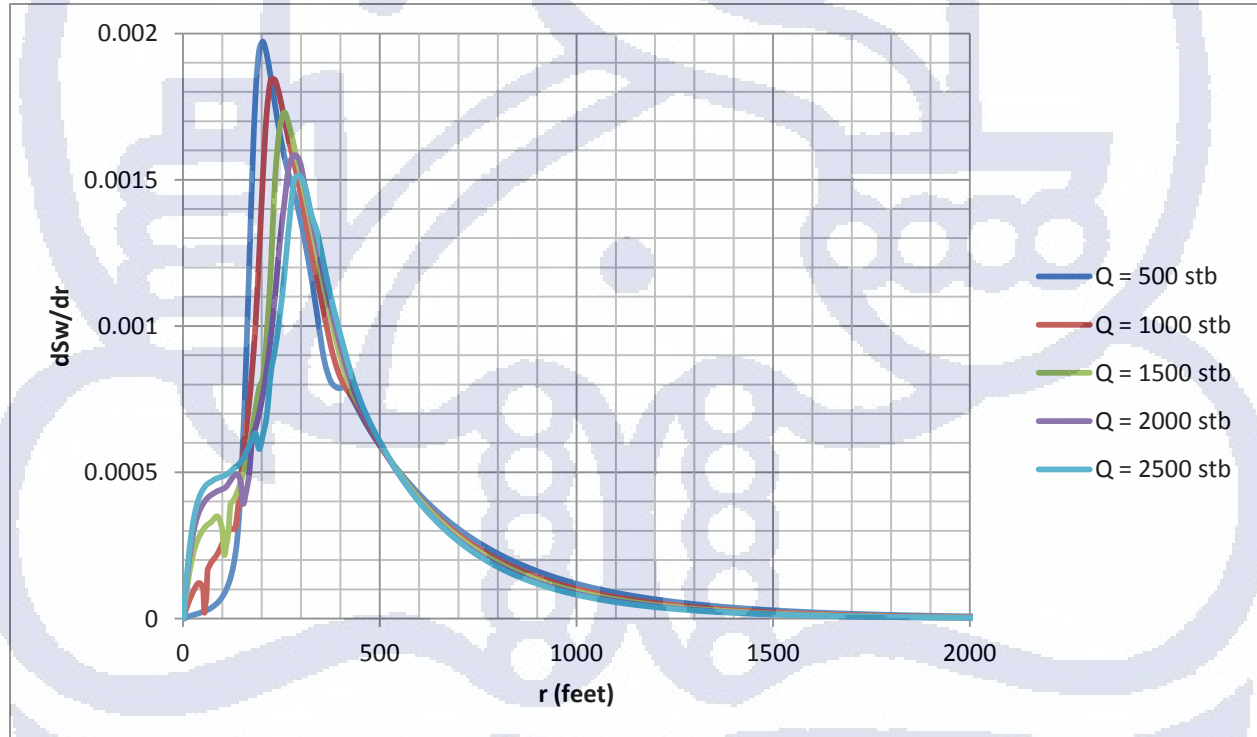


Gambar-17. Plot  $dS_w/dr$  vs  $r$  untuk beberapa nilai ketebalan aquifer.

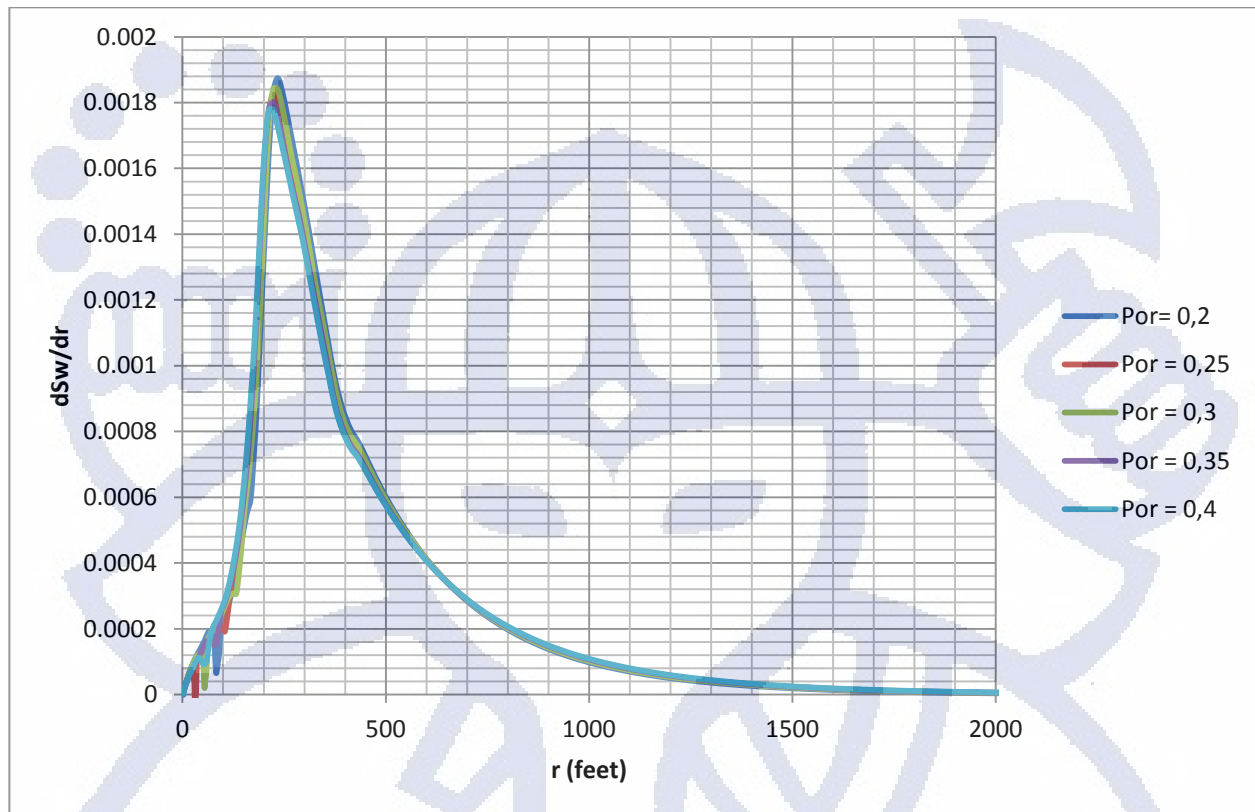




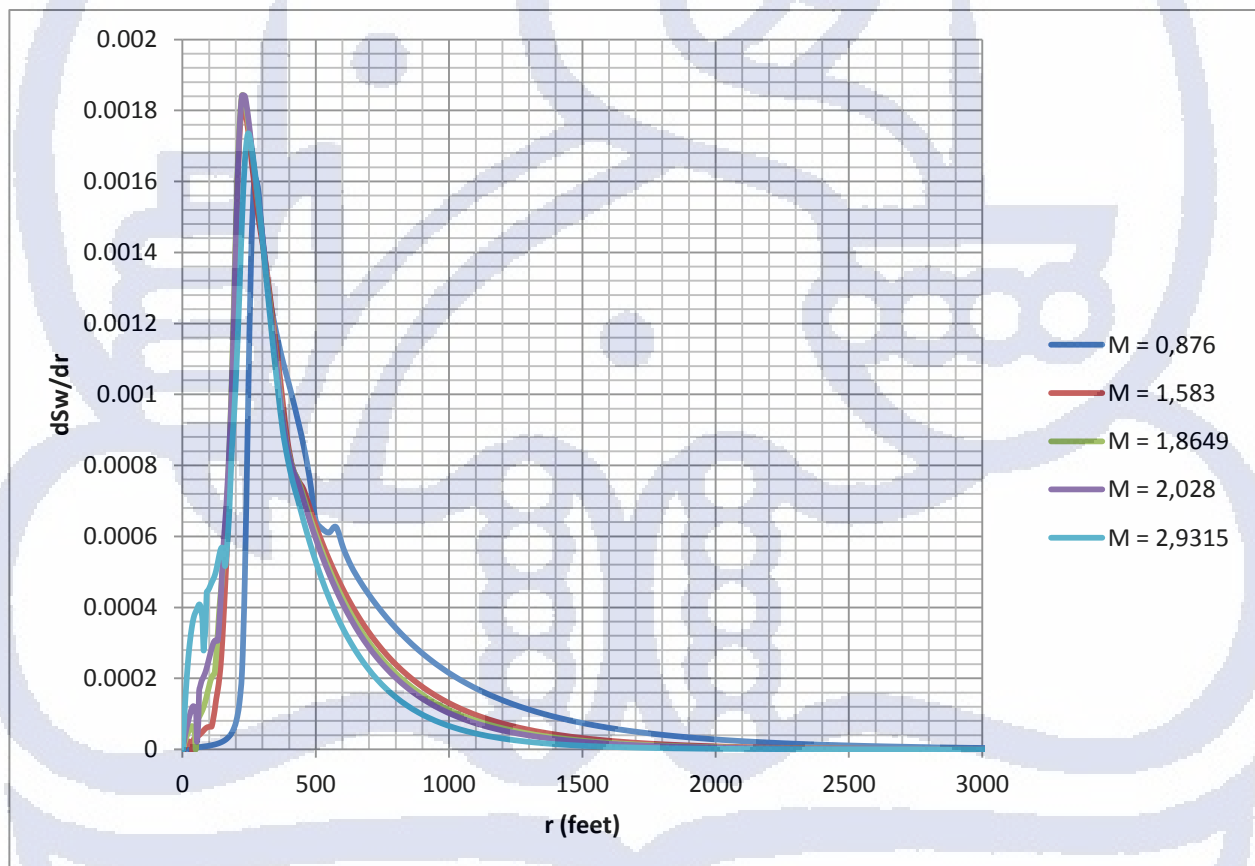
Gambar-18. Plot  $dS_w/dr$  vs  $r$  untuk beberapa nilai perforasi.



Gambar-19. Plot  $dS_w/dr$  vs  $r$  untuk beberapa nilai laju alir.

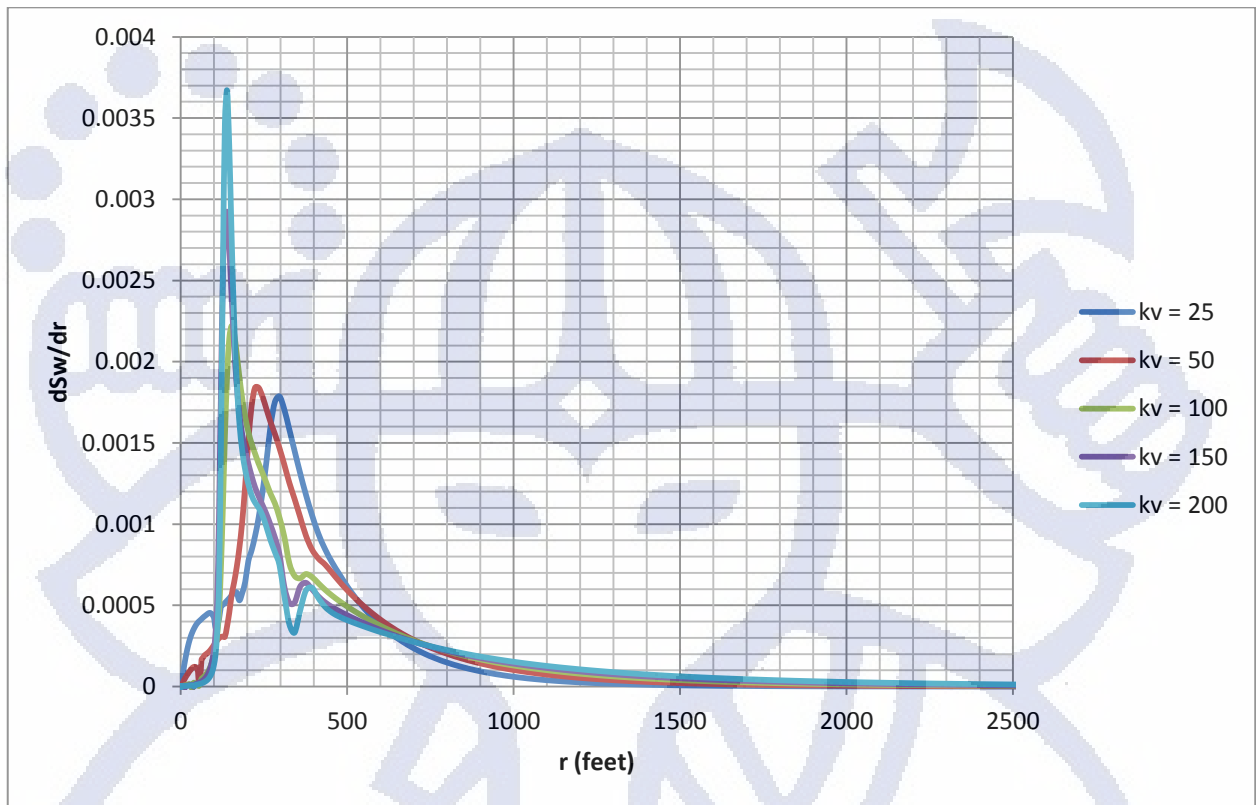


Gambar-20. Plos  $dS_w/dr$  vs  $r$  untuk beberapa nilai porositas.



Gambar-21. Plot  $dS_w/dr$  vs  $r$  untuk beberapa nilai Mobility Ratio





Gambar-22. Plot  $dS_w/dr$  vs  $r$  untuk beberapa nilai permeabilitas vertikal