

B4 ~~DA~~

ISSN 0854 - 2554

Jurnal Ilmu Kebumihan



Teknologi Mineral

Volume 20, Nomor 2, Desember 2007

Stratigrafi Gunungapi Waduk Parangjoho, Kecamatan Eromoko, Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah

Analisis fraktal dan penginderaan jauh untuk eksplorasi mineralisasi emas di daerah Bayah, Kabupaten Lebak, Banten

Hasil awal survei Sumatra *SO-189 Leg 1*

Pengaturan jarak semprot monitor dalam penentuan daya dan tipe mesin pompa pada tambang air Kepuh Bangka Tengah

Penyusunan model matematika *Fuzzy Relations* untuk memprediksi lapisan tanah dari hasil sondir (*Cpt*)

Pengembangan analisis regresi *material-balance* untuk reservoir minyak bertenaga dorong air

Evaluasi proses pengendalian tekanan reservoir menggunakan injeksi air di lapangan minyak

Perencanaan dan evaluasi *electric submergible pump* untuk mendapatkan laju produksi yang optimum

Dampak lingkungan penambangan dan alternatif penanggulangannya

Modifikasi buangan emisi gas beracun di udara sebagai wujud pengamalan Pancasila



Jurnal Ilmu Kebumihan
Teknologi Mineral

PENANGGUNGJAWAB

Dekan Fakultas Teknologi Mineral
UPN "Veteran" Yogyakarta

KETUA

Ir. D. Haryanto, M.Sc., Ph.D

DEWAN REDAKSI

Prof.Drs. H.R. Bambang Soeroto., Dr.Ir. Sutanto, DEA., Dr.Ir. Sari Bahagiarti K, M.Sc.,
Dr.Ir. Sudarmoyo, SE, MT., Dr.Ir. Dyah Rini, MT., Dr.Ir. Heru Sigit Purwanto, MT.,
Ir. Helmy Murwanto, M.Si., Ir. Sudarsono, MT., Ir. Hadiyan, MT., Ir. Kresno, MT.,
Ir. Moch. Winanto Adjie, M.Sc., Ir. F. Suhartono, M.Si., Ir. Andi Sungkowo, M.Si.

SEKRETARIS

Ir. Bambang Triwibowo, MT

BENDAHARA

Ir. R. Sukotjo, MT

TATA GRAFIS DAN CETAK

Ir. Bambang Bintarto, MT., Ir. Siti Umiyatun Choiriah, MT

TATA USAHA

Winarto, Iriyanti, Tutik Sukaryo Rini, Tukimin, Bambang Agusworo

PENERBIT

Fakultas Teknologi Mineral - Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta
JIK Tek Min ternit secara berkala setiap semester: Juni dan Desember.

ALAMAT REDAKSI / TATA USAHA

Fakultas Teknologi Mineral, Jl. SWK 104 (Lingkar Utara) Condongcatur Yogyakarta 55283
Telp. (0274) 487813, 487814 Fax. (0274) 487813,
E-mail : triwibowo@plasa.com

DICETAK OLEH

Unit Pelaksana Teknik Penerbitan UPN "Veteran" Yogyakarta

Jurnal Ilmu Kebumihan
Teknologi Mineral

Daftar Isi

- Stratigrafi Gunungapi Waduk Parangjoho, Kecamatan Eromoko, Kabupaten Wonogiri, Jawa Tengah** 101
 Sri Mulyaningsih dan Sutikno Bronto
- Analisis fraktal dan penginderaan jauh untuk eksplorasi mineralisasi emas di daerah Bayah, Kabupaten Lebak, Banten** 113
 Sugeng
- Hasil awal survei Sumatra SO-189 Leg 1** 121
 Purna Sulastya Putra
- Pengaturan jarak semprot monitor dalam penentuan daya dan tipe mesin pompa pada tambang air Kepuh Bangka Tengah** 131
 Hartono
- Penyusunan model matematika *Fuzzy Relations* untuk memprediksi lapisan tanah dari hasil sondir (CPT)** 141
 Soewignjo Agus Nugroho dan Bambang Wisaksono
- Pengembangan analisis regresi *material-balance* untuk reservoir minyak bertenaga dorong air** 149
 Sunindyo, M.Th. Kristiati, EA, Alfon Soufanny
- Evaluasi proses pengendalian tekanan reservoir menggunakan injeksi air di lapangan minyak** 159
 Dedy Kristanto
- Perencanaan dan evaluasi *electric submergible pump* untuk mendapatkan laju produksi yang optimum** 170
 Avianto Kabul Pratiknyo, M. Th. Kristiati, EA, Suryo Adi Putranto
- Dampak lingkungan penambangan dan alternatif penanggulangannya** 182
 Untung Sukanto
- Modifikasi buangan emisi gas beracun di udara sebagai wujud pengamalan Pancasila** 190
 Heru Santosa

Evaluasi proses pengendalian tekanan reservoir menggunakan injeksi air di lapangan minyak

Dedy Kristanto

Jurusan Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Mineral, UPN "Veteran" Yogyakarta
Jl. SWK 104 (Lingkar Utara) Condongcatur 55283, Indonesia

Abstract

The utilization of water injection for pressure maintenance has been conducted based on the indication of pressure decrease at "X" oil field together with decreasing of reservoir pressure as a natural energy driving of oil to the surface. The decreasing of reservoir pressure happened due to the occurring of reservoir voidage cause of the unbalance between reservoir fluids volume produced with water volume from replaced aquifer. The water injection conducted into reservoir was done to maintenance the pressure still being relatively stable. The objective of this evaluation is to analyze the result of reservoir pressure maintenance through cumulative production of reservoir itself. From these evaluations could be known the increasing of oil recovery that recovered from the oil remaining reserve it could be shown from reservoir performance prediction after water injection has been conducted as pressure maintenance. Based on the evaluation results it shown that the utilization of water injection for the pressure maintenance processes was successful done. It is proved by increasing cumulative oil production as 73.09% from IOIP or increasing cumulative oil production determining from the water injection started is 59.28%. Therefore, the average reservoir pressure could be maintenance at the relative stable condition is 1870 psi.

Abstrak

Pelaksanaan pengendalian tekanan (pressure maintenance) menggunakan injeksi air ini dilakukan berdasarkan adanya indikasi penurunan produksi minyak di Lapangan "X" bersamaan dengan menurunnya tekanan reservoir sebagai energi pendorong alami minyak ke permukaan. Penurunan tekanan reservoir yang terjadi adalah akibat adanya pengosongan reservoir yang disebabkan oleh tidak seimbangnya antara volume fluida reservoir yang terproduksi dengan volume air dari akuifer yang menggantikannya. Injeksi air yang dilakukan kedalam reservoir diharapkan akan dapat mempertahankan tekanan reservoir agar tetap dalam kondisi yang relatif stabil. Evaluasi ini bertujuan untuk menganalisa hasil proses pengendalian tekanan reservoir terhadap produksi kumulatif dari reservoir yang bersangkutan. Dari hasil evaluasi tersebut akan dapat diketahui besarnya pertambahan perolehan minyak yang dapat diperoleh dari cadangan minyak sisa terhadap perolehan minyak mula-mula di reservoir, hal ini dapat dilihat dari perilaku reservoir setelah dilakukannya injeksi air untuk proses pressure maintenance tersebut. Berdasarkan pada hasil evaluasi menunjukkan bahwa adanya injeksi air untuk proses pressure maintenance telah berhasil dengan baik. Hal ini terbukti dengan meningkatnya produksi minyak kumulatif sebesar 73,09% dari IOIP atau pertambahan perolehan minyak kumulatif terhitung pada saat mulai dilakukannya injeksi air sebesar 59,28%. Selain itu, tekanan reservoir rata-ratanya dapat dipertahankan pada kondisi relatif stabil sebesar 1870 psi.

Kata-kata kunci : injeksi air, *pressure maintenance*, *reservoir voidage*, *reservoir pressure*.

PENDAHULUAN

Injeksi air ke dalam reservoir merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan perolehan minyak dari suatu reservoir. Dalam pelaksanaannya, suatu proyek injeksi air dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *pressure maintenance* dan *secondary recovery*. *Pressure maintenance* umumnya dilaksanakan pada saat energi pendorong reservoir masih cukup besar untuk mengalirkan minyak ke permukaan dan laju produksi masih tinggi. Hal ini dilaksanakan agar tekanan reservoir sebagai energi pendorong tetap dalam kondisi yang tinggi. Sedangkan pada *secondary recovery*, injeksi air dilakukan pada saat tekanan reservoir sudah tidak mampu lagi mendorong minyak dengan tenaga alamiahnya sendiri dan laju produksinya sudah rendah. Hal ini dilakukan untuk mendesak cadangan minyak sisa yang masih tertinggal dalam reservoir ketika tahap

awal produksi dilaksanakan. Kedua cara tersebut pada prinsipnya adalah sama, yaitu dengan menginjeksikan fluida ke dalam reservoir sebagai tambahan energi dari luar.

Adanya indikasi penurunan tekanan reservoir yang diakibatkan oleh tidak seimbangnya laju pengurasan reservoir dengan laju *water influx* ke dalam reservoir, menyebabkan turunnya laju produksi. Proses pengendalian tekanan reservoir pada kondisi yang stabil dan relatif tinggi dapat dicapai apabila kondisi laju *water influx* dari *aquifer* ditambah dengan laju injeksi air dapat seimbang dengan laju pengosongan reservoir. Kondisi ini akan memperlambat terjadinya penurunan laju produksi dan akan meningkatkan perolehan minyak.

Dalam evaluasi ini dilakukan perhitungan laju *water influx* menggunakan persamaan *Material*

Balance Guerrero, serta perhitungan konstanta *water influx*nya menggunakan persamaan *steady state Schiluis*. Dari hasil perhitungan tersebut akan dapat diketahui besarnya laju *water influx* ke dalam reservoir yang bersama dengan laju injeksi air akan mengimbangi laju pengurasan reservoir. Berdasarkan hasil perbandingan antara laju pengisian dengan laju pengosongan dari reservoir, maka persamaan *Material Balance* juga dapat digunakan untuk memperkirakan laju produksi dan perolehan minyak kumulatif di masa yang akan datang. Perhitungan ini menggunakan debit air injeksi pada kondisi konstan. Perkiraan perolehan minyak kumulatif dilakukan hingga batas laju produksi tertentu dimana *water cut* hampir mencapai 100%.

DASAR TEORI

Upaya untuk meningkatkan perolehan minyak (*oil recovery*) menggunakan injeksi air adalah metode yang paling banyak digunakan pada lapangan minyak. Penginjeksian air sangat sering digunakan karena mempunyai sifat keefektifan untuk mendesak minyak relatif lebih baik untuk berbagai kondisi dan karakteristik reservoir, jenis batuan, dan sifat-sifat fluidanya. Murahanya harga air juga merupakan faktor menentukan apabila dibandingkan dengan fluida-fluida injeksi lainnya seperti injeksi thermal, gas, atau kimia.

Pada proses penginjeksian air, air yang diinjeksikan mendorong minyak yang masih tersisa di dalam media berpori dengan mengisi pori-pori yang ditinggalkan minyak menuju sumur produksi untuk kemudian diproduksi. Konsep dasar penyelesaian persoalan penginjeksian air adalah gradien saturasi atau distribusi saturasi yang dikembangkan oleh *Buckley-Laverett*. Berbagai macam metode perkiraan kinerja *waterflooding* yang ada memiliki asumsi-asumsi dan dasar persyaratan yang digunakan untuk memilih metode yang akan digunakan menyesuaikan kondisi lapangan. Hal-hal yang perlu diperhatikan antara lain :

- Ada tidaknya saturasi gas awal pada reservoir
- *Flood pattern* dari sumur injeksi
- Variasi mobilitas ratio dari air injeksi
- Heterogenitas reservoir (distribusi permeabilitas)

Dasar pertimbangan dilakukannya proses pengendalian tekanan (*pressure maintenance*) diantaranya adalah jumlah cadangan minyak yang memungkinkan untuk dapat diproduksi masih cukup besar, tekanan reservoir masih cukup mampu untuk mengalirkan minyak ke permukaan, tenaga pendorong yang dimiliki reservoir (tekanan reservoir) mengalami penurunan dengan cepat selama periode produksi sehingga menurunkan laju produksi, dan fluida yang akan digunakan sebagai

fluida injeksi mudah diperoleh serta tersedia dalam jumlah yang cukup besar.

Faktor Yang Mempengaruhi Injeksi Air

Beberapa faktor yang mempengaruhi keberhasilan injeksi pelaksanaan injeksi air diantaranya adalah geometri reservoir, sifat-sifat fisik batuan dan fluida reservoir, laju injeksi serta sifat-sifat air yang akan digunakan untuk injeksi.

Dalam geometri reservoir, maka struktur dan stratigrafi mempunyai pengaruh yang besar dalam menentukan pola sumur yang akan digunakan. Pelaksanaan operasi injeksi air akan sangat baik dilakukan pada reservoir yang mempunyai kemiringan yang kecil. Faktor kemiringan ini akan mempunyai pengaruh jika perbedaan rapat massa cukup besar antara fluida pendesak dan fluida yang didesak. Apabila kecepatan pendesakan tidak besar, maka fluida pendesak (air) akan bergerak di bagian bawah reservoir tersebut.

Faktor-faktor lithologi seperti porositas, permeabilitas, kandungan lempung dan sifat kebasahan (*wettability*) juga mempengaruhi keberhasilan pelaksanaan injeksi air. Variasi permeabilitas ke arah lateral maupun vertikal sangat penting untuk diperhatikan didalam operasi injeksi air. Batuan yang seragam lebih menguntungkan dalam injeksi air jika dibandingkan dengan batuan reservoir yang mempunyai tingkat variasi permeabilitas besar. Hal ini disebabkan sifat air sebagai fluida injeksi akan cenderung mengalir pada bagian batuan reservoir yang mempunyai permeabilitas besar, sehingga menimbulkan penerobosan oleh air yang dampaknya menurunkan efisiensi pendesakan.

Untuk laju injeksi, secara teoritis bila air diinjeksikan dengan laju injeksi yang tinggi, maka akan dapat diperoleh minyak dengan segera. Tetapi dalam kenyataannya di lapangan, bila laju injeksi terlalu tinggi, kemungkinan untuk terbentuknya penerobosan (*channeling* dan/atau *fingering*) oleh air akan terjadi sehingga dapat mengurangi efisiensi pendesakan. Bila digunakan laju injeksi yang rendah, maka akan dapat menimbulkan munculnya pengaruh grafitasi dan perolehan minyak tidak didapatkan dengan segera.

Menurut Smith, ada beberapa hal yang menyebabkan perlunya penentuan laju injeksi yang optimum dalam suatu operasi injeksi air, yaitu :

- a. Laju injeksi optimum perlu diketahui untuk menentukan ukuran dari peralatan pompa dan instalasi lain yang akan digunakan.
- b. Laju injeksi optimum perlu ditentukan sehubungan dengan kekuatan formasi (tekanan rekah formasi) disekitar sumur injeksi, sehingga

tekanan yang diberikan untuk menginjeksikan air tidak menyebabkan terjadinya rekahan-rekahan yang akan dapat mempengaruhi keberhasilan injeksi air.

Dalam hal ini perbandingan antara laju injeksi fluida kedalam sumur dengan perbedaan tekanan antara tekanan injeksi fluida yang bersangkutan dan tekanan dasar sumur pada keadaan statis akan dapat menggambarkan kemampuan suatu sumur untuk menginjeksikan fluida ke dalam reservoir (*Injectivity Index*). Muskat, telah menyampaikan suatu solusi secara matematis untuk menentukan variasi injeksi air untuk berbagai pola sumur injeksi-produksi (sistem aliran radial) dengan anggapan mobilitas ratio sama dengan satu.

Selanjutnya sifat-sifat air injeksi juga dapat mempengaruhi keberhasilan dan kegagalan operasi pendesak minyak oleh air. Apabila sifat air injeksi tidak sesuai (*compatible*) dengan batuan dan fluida reservoirnya, maka dapat menimbulkan problem produksi seperti terjadinya endapan (*scale*), penyumbatan pori-pori batuan (*plugging*) akibat Bergeraknya partikel-partikel yang berukuran sangat halus (*fine migration*) dan juga problem korosi pada peralatan produksi. Dengan demikian air yang akan digunakan untuk injeksi harus dilakukan analisa terlebih dahulu di laboratorium (*compatibility test*) sehingga tidak menimbulkan problem.

Perkiraan Cadangan Minyak Awal

Perkiraan besarnya cadangan minyak mula-mula (IOIP) dihitung menggunakan persamaan Volumetrik sebagai berikut :

$$IOIP = \frac{7758 Vb \phi (1 - Swi)}{Boi} \tag{1}$$

dimana

- IOIP = Initial oil in place, STB
- Vb = volume bulk batuan reservoir, acre-ft
- ϕ = porositas, fraksi
- Swi = saturasi air awal, fraksi
- Boi = faktor volume formasi minyak awal, bbl/stb

Laju Injeksi Air

Laju injeksi yang optimum adalah suatu laju injeksi air yang dapat mengimbangi besarnya pengurangan reservoir, sehingga tekanan reservoir tidak cepat mengalami penurunan. Jadi laju injeksi air optimum ditujukan untuk dapat memelihara tekanan reservoir agar konstan dan dalam kondisi yang relatif tinggi. Persamaan umum *Material Balance* yang

digunakan dalam penentuan laju injeksi yang optimum, adalah :

$$N = \frac{Np [Bt + (Rs - Rsi)Bg - (We - WpBw)]}{(Bt - Bti) + m \frac{Bti}{Bgi} (Bg - Bgi)} \tag{2}$$

Dengan dilakukannya injeksi air, maka air yang masuk ke dalam reservoir adalah We^* , dimana :

$$We^* = We + Wi \tag{3}$$

Substitusi persamaan (3) ke dalam persamaan (2), sehingga persamaan (2) menjadi :

$$N = \frac{Np [Bt + (Rs - Rsi)Bg - (We + Wi - WpBw)]}{(Bt - Bti) + m \frac{Bti}{Bgi} (Bg - Bgi)} \tag{4}$$

Dari persamaan *Material Balance* tersebut kemudian dikembangkan oleh Guerrero, menjadi bentuk persamaan untuk memperkirakan perembesan air, sebagai berikut :

$$We = Np [Bt + (Rp - Rsi)Bg] + WpBw + N \left[(Bt - Boi) + mBoi \left(\frac{Bg}{Bgi} - 1 \right) \right] \tag{5}$$

Untuk periode produksi setelah dilakukan injeksi air maka perhitungan *water influx* dengan persamaan (5) dilakukan dengan memperhitungkan besar injeksi air (Wi), maka :

$$We = Np [Bt + (Rp - Rsi)Bg] + WpBw + N \left[(Bt - Boi) + mBoi \left(\frac{Bg}{Bgi} - 1 \right) \right] - Wi \tag{6}$$

Karakteristik mekanisme pendorong (*drive mechanisms*) yang bekerja dalam suatu reservoir dapat ditentukan berdasarkan perhitungan *drive index* (DI) menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$DDI = \frac{N (Bt - Bti)}{Np [Bt + (Rp - Rsi)Bg]} \tag{7}$$

$$SDI = \frac{mN Bti / Bgi (Bg - Bgi)}{Np [Bt + (Rp - Rsi)Bg]} \tag{8}$$

$$WDI = \frac{We - WpBw}{Np [Bt + (Rp - Rsi)Bg]} \tag{9}$$

Dimana :

$$DDI + SDI + WDI = 1 \tag{10}$$

Persamaan Perembesan Air (Schiltuis)

Persamaan perembesan air digunakan untuk menghitung *water influx* (dari *aquifer*) dengan anggapan kondisi aliran mantap (*steady state*) adalah :

$$\frac{dWe}{dt} = k(P_i - P) \dots\dots\dots (11)$$

$$We = k \int_0^t (P_i - P) dt \dots\dots\dots (12)$$

Pengurasan Reservoir Kumulatif

Berdasarkan Craft dan Hawkins, untuk menjaga agar laju produksi dan tekanan relatif konstan, maka besarnya laju pengurasan reservoir harus sama dengan besarnya laju *water influx* dari aquifer, sehingga :

$$dWe / dt = (\text{Laju pengurasan minyak}) + (\text{Laju pengurasan gas}) + (\text{Laju pengurasan air}) \dots\dots (13)$$

Volume pengosongan reservoir (*reservoir voidage, V*) dapat ditentukan menggunakan persamaan *Material Balance*. Sedangkan dengan memasukan harga *water influx (We)*, maka besarnya reservoir net voidage (*RNV*) selama belum dilakukan injeksi air adalah :

$$V = Np [Bt + (Rp - Rsi)Bg] + WpBw \dots\dots (14)$$

$$RNV = Np[Bt + (Rp - Rsi)Bg] + WpBw - We \dots (15)$$

Untuk menentukan laju pengosongan reservoir per satuan waktu, maka persamaan di atas dapat dituliskan menjadi :

$$dV / dt = qo[Bt + (Rp - Rsi)Bg] + qwBw \dots\dots (16)$$

Agar supaya tekanan reservoir dapat dipertahankan untuk tidak cepat mengalami penurunan, maka diusahakan untuk menyeimbangkan laju pengosongan reservoir dengan laju pengisian reservoir dengan cara menginjeksikan air ke dalam reservoir dalam jumlah yang cukup (*Pressure maintenance*). Pada saat periode injeksi dilakukan perhitungan reservoir *net voidage* harus memperhitungkan volume air yang diinjeksikan ke dalam reservoir, sehingga persamaan (15) menjadi :

$$RNV = Np[Bt + (Rp - Rsi)Bg] + WpBw - We - Wi \dots (17)$$

PERKIRAAN PERILAKU RESERVOIR

Perkiraan perilaku reservoir merupakan suatu cara yang dapat digunakan untuk memperkirakan perolehan minyak dan gas dari suatu reservoir. Untuk perkiraan laju produksi (*qo*) dan perolehan minyak kumulatif (*Np*) menggunakan persamaan *Material Balance*, maka terlebih dahulu dilakukan suatu perkiraan harga *water cut* di masa yang akan datang dengan mengambil setiap harga dari hasil

ekstrapolasi kurva yang diperoleh dari data produksi masa lalu. Dari perhitungan ini akan diketahui bahwa kenaikan harga *water cut* terhadap waktu selama periode injeksi air akan meningkat (*linier*) sampai mendekati harga 100%.

Untuk memperkirakan *water influx* dalam reservoir digunakan persamaan *Material Balance* dan untuk perhitungan konstantanya dapat digunakan persamaan laju *water influx* dari *Schiluis Steady State*. Dari hasil perhitungan *dWe/dt* menggunakan persamaan *Material Balance* dan *Schiluis* akan dihasilkan harga konstanta (*k*). Untuk kondisi terjadinya penurunan tekanan reservoir yang stabil, maka akan didapat suatu harga konstanta rata-rata dari laju *water influx* tersebut. Harga konstanta ini dapat digunakan untuk melakukan perhitungan perkiraan *water influx* di masa datang serta memperkirakan perolehan minyak kumulatif dari reservoir tersebut.

Perhitungan perkiraan laju produksi dan perolehan minyak kumulatif di atas dilakukan hingga kondisi produksi mendekati harga *water cut* 100% dengan memperhitungkan laju *water influx* pada laju injeksi air yang konstan selama periode produksi. Langkah perkiraannya sebagai berikut :

- a. Perkirakan besarnya laju pengosongan reservoir (*dV/dt*) untuk setiap harga tekanan reservoir yang dipilih dengan persamaan :

$$\frac{dV}{dt} = Bt qo + (R - Rsi)Bg qo + qwBw \dots (18)$$

$$qw = \frac{WC}{1 - WC} qo \dots\dots\dots (19)$$

Perkiraan *water cut (WC)* diperoleh dari data produksi selama periode injeksi yang harganya semakin besar pada setiap periode.

- b. Pada injeksi air untuk *pressure maintenance*, maka diharapkan laju pengosongan reservoir adalah sebanding dengan laju *water influx* dan injeksi airnya, sehingga :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dWe}{dt} + \frac{dWi}{dt} \dots\dots\dots (20)$$

dan laju produksi minyak (*qo*) adalah :

$$qo = \frac{\frac{dWe}{dt} + \frac{dWi}{dt}}{[Bt + (R - Rsi)Bg] + \left(\frac{WC}{1 - WC}\right)Bw} \dots (21)$$

STUDI KASUS DI LAPANGAN "X"

Didasarkan pada sejarah produksi, lapangan minyak "X" ini mempunyai laju produksi minyak sebesar 1579 BOPD, kemudian seiring dengan berjalannya waktu mengalami penurunan produksi menjadi 509 BOPD dengan *Gas Oil Ratio (GOR)*

sebesar 4350 SCF/STB dan prosentase *water cut* sebesar 89,3%. Berdasarkan pertimbangan kondisi dan potensi reservoir yang menunjukkan sisa cadangan (*remaining reserve*) dan tekanan reservoir yang masih cukup tinggi, maka dilakukan injeksi air sebagai *pressure maintenance*.

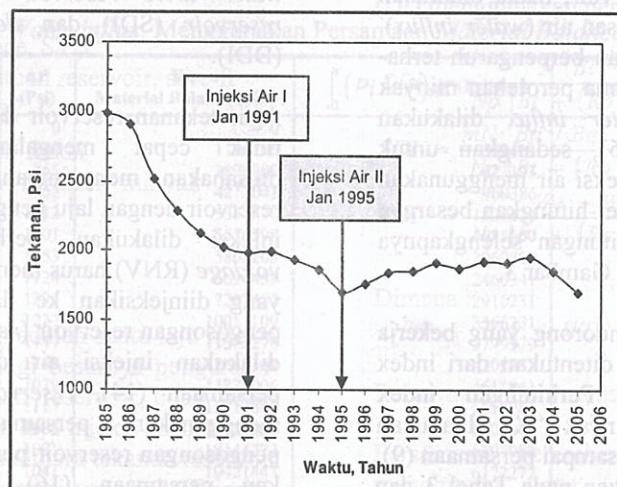
Evaluasi *pressure maintenance* menggunakan injeksi air di lapangan minyak "X" ini akan mencakup penentuan cadangan minyak mula-mula (IOIP), penentuan *water influx*, penentuan karakteristik mekanisme pendorong reservoir, penentuan reservoir voidage dan perkiraan perolehan minyak. Perhitungan yang digunakan untuk menentukan materi bahasan di atas adalah berdasarkan persamaan *Material Balance* dengan anggapan reservoir memiliki sifat yang relatif homogen, fluida reservoir *incompressible*, pola aliran fluida

mantap (*steady state*) dan volume reservoir konstan. Data-data karakteristik reservoir lapangan minyak "X" ditunjukkan pada Tabel 1 dan sejarah tekanan reservoir ditunjukkan pada Gambar 1.

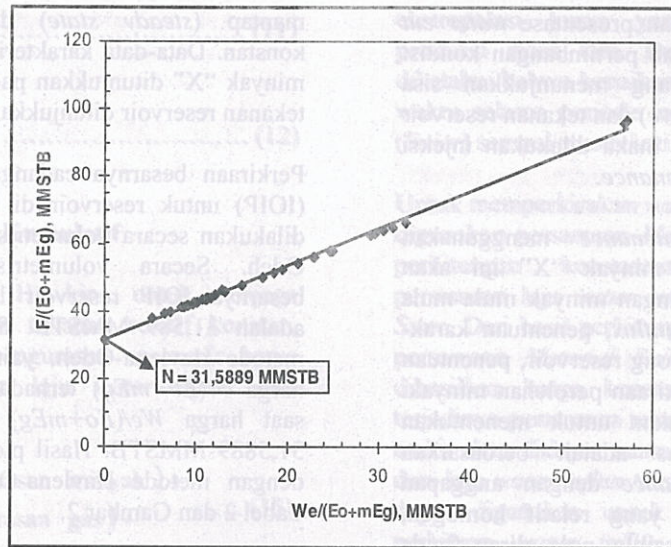
Perkiraan besarnya cadangan minyak mula-mula (IOIP) untuk reservoir di lapangan minyak "X" dilakukan secara volumetris dan metode Havlena-Odeh. Secara volumetris didapatkan bahwa besarnya IOIP reservoir lapangan minyak "X" adalah 31,589 MMSTB. Sedangkan berdasarkan metode Havlena-Odeh, yaitu hasil plotting antara harga $F/(E_o+mE_g)$ terhadap $We/(E_o+mE_g)$ pada saat harga $We/(E_o+mE_g) = 0$, adalah sebesar 31,5889 MMSTB. Hasil plotting perhitungan IOIP dengan metode Havlena-Odeh ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 2.

Tabel 1. Data Karakteristik Reservoir Lapangan Minyak "X"

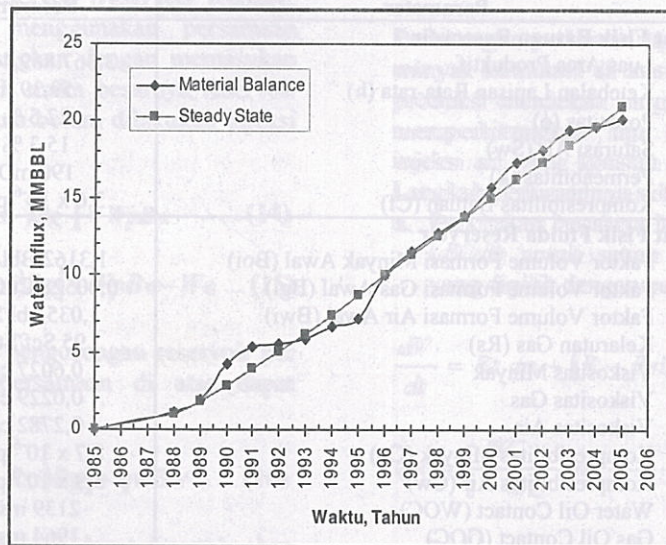
Parameter	Besaran
Sifat Fisik Batuan Reservoir	
Luas Area Produktif	3.367.869,46 m ²
Ketebalan Lapisan Rata-rata (h)	59,39 ft
Porositas (ϕ)	22,5 %
Saturasi Air (S_w)	15,3 %
Permeabilitas (k)	190 mD
Kompresibilitas Batuan (C_f)	$3,6 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹
Sifat Fisik Fluida Reservoir	
Faktor Volume Formasi Minyak Awal (Boi)	1,3162 Bbl/Stb
Faktor Volume Formasi Gas Awal (Bgi)	0,00528 Cuft/Stb
Faktor Volume Formasi Air Awal (Bwi)	1,035 bbl/Stb
Kelarutan Gas (Rs)	95 Scf/Stb
Viskositas Minyak	0,6027 cp
Viskositas Gas	0,0229 cp
Viskositas Air	0,2782 cp
Kompresibilitas Minyak (Co)	$8,7 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹
Kompresibilitas Air (Cw)	$3,9 \times 10^{-6}$ psi ⁻¹
Water Oil Contact (WOC)	2139 mss
Gas Oil Contact (GOC)	1964 mss
Kondisi Reservoir	
Tekanan Awal Reservoir (Pi)	2991 psi
Tekanan Saturasi (Pb)	3027 psi
Temperatur Reservoir	204 °F



Gambar 1. Sejarah Tekanan Reservoir Lapangan Minyak "X"



Gambar 2. Hasil Perhitungan IOIP Menggunakan Metode Havlena-Odeh



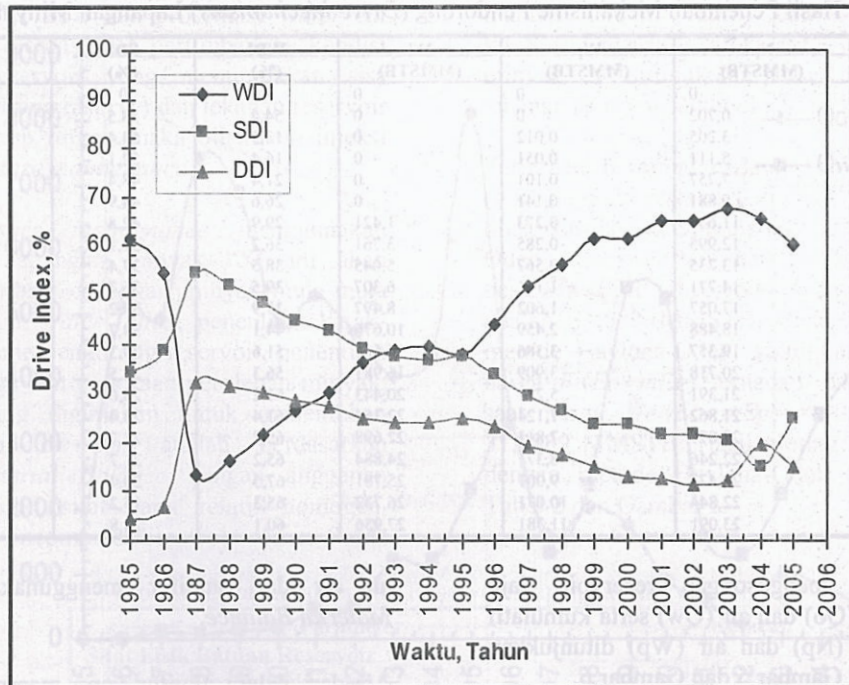
Gambar 3. Plot Water influx Terhadap Waktu (Material Balance dan Steady State)

Untuk mengetahui pengaruh pendorong minyak oleh air dari *aquifer* di reservoir, maka dilakukan perhitungan volume perembesan air (*water influx*). Besarnya *water influx* ini akan berpengaruh terhadap perilaku reservoir, terutama perolehan minyak kumulatif. Perhitungan *water influx* dilakukan menggunakan persamaan (5), sedangkan untuk periode setelah dilakukan injeksi air menggunakan persamaan (6) dengan memper-hitungkan besarnya injeksi air (*Wi*). Hasil perhitungan selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 3.

Karakteristik mekanisme pendorong yang bekerja dalam suatu reservoir dapat ditentukan dari index pendorong (*drive index*). Perhitungan index pendorong di lapangan minyak "X" dilakukan menggunakan persamaan (7) sampai persamaan (9). Hasil selengkapnya ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 4. Berdasarkan pada Tabel 4 dan Gambar 4, maka terlihat bahwa mekanisme yang berkerja di

lapangan minyak "X" adalah kombinasi antara *water drive reservoir* (WDI), *solution drive reservoir* (SDI) dan *depletion drive reservoir* (DDI).

Agar tekanan reservoir dapat dipertahankan untuk tidak cepat mengalami penurunan, maka diusahakan menyeimbangkan laju pengosongan reservoir dengan laju pengisian reservoir. Pada saat injeksi dilakukan, perhitungan *reservoir net voidage* (RNV) harus memperhitungkan volume air yang diinjeksikan ke dalam reservoir. Volume pengosongan reservoir (*reservoir voidage*) sebelum dilakukan injeksi air ditentukan menggunakan persamaan (14), *reservoir net voidage* (RNV) menggunakan persamaan (15), dan laju pengosongan reservoir per satuan waktu menggunakan persamaan (16), sedangkan perhitungan *reservoir net voidage* setelah dilakukan injeksi air ditentukan menggunakan persamaan (17). Hasil



Gambar 4. Karakteristik Mekanisme Pendorong (*Drive Mechanisms*) Lapangan Minyak "X"

Tabel 2. Hasil Perhitungan *Initial Oil in Place* (IOIP) Menggunakan Metode Havlena-Odeh

Waktu	P (Psi)	ΔP (Psi)	$E_o = (B_o + B_{oi}) + (R_{si} - R_s) B_g$	$E_g = B_{oi} / (B_{gi} - 1)$	F	$E_o + mE_g$	$F / (E_o + mE_g)$	$W_e / (E_o + mE_g)$
Jan-85	2991	0	0	0	0	0	0	0
Jan-88	2289	702	0,1043	0,3789	1,4E+07	0,285	39287878	6562868
Jan-89	2126	865	0,1465	0,5161	1,6E+07	0,392	41755174	9056849
Jan-90	2029	962	0,1758	0,6082	2,1E+07	0,465	44768545	12016436
Jan-91	1979	1012	0,1886	0,6561	2,2E+07	0,505	42698050	10038667
Jan-92	1990	1001	0,1952	0,6481	2,1E+07	0,497	42458345	9803098
Jan-93	1938	1053	0,2067	0,7031	2,4E+07	0,541	43616426	10945739
Jan-94	1867	1124	0,2334	0,7827	2,7E+07	0,606	43775977	11131259
Jan-95	1700	1291	0,3073	0,9996	3,3E+07	0,783	42135193	9617532
Jan-96	1764	1227	0,2771	0,9124	3,3E+07	0,711	45856339	13186397
Jan-97	1844	1147	0,2426	0,8102	3,1E+07	0,628	50061015	17233172
Jan-98	1850	1141	0,2401	0,8027	3,2E+07	0,622	51464737	18567302
Jan-99	1912	1079	0,2164	0,7329	3,2E+07	0,565	55910145	22836354
Jan-00	1874	1117	0,2307	0,7253	3,5E+07	0,601	57853404	24729987
Jan-01	1926	1065	0,1949	0,7164	3,4E+07	0,536	62665722	29529411
Jan-02	1910	1081	0,2005	0,7342	3,4E+07	0,551	62425281	29111526
Jan-03	1950	1041	0,1866	0,6902	3,4E+07	0,515	66406788	32939126
Jan-04	1850	1141	0,2231	0,8039	3,9E+07	0,606	63832583	30499469
Jan-05	1700	1291	0,2881	1,0001	4,4E+07	0,764	57718415	24659590

Tabel 3. Hasil Perhitungan *Water influx*. Menggunakan Persamaan *Material Balance* dan *Steady State* Schilthuis

Waktu	Tekanan (Psi)	ΔP (Psi)	W_e Material Balance (bbl)	$\int (P_i - P) dt$ (Psi/day)	k (bbl/day/psi)	W_e Steady State (bbl)
Jan-85	2991	0	0	0	0	0
Jan-88	2289	702	1104106	331451	3,3311	990319
Jan-89	2126	865	1899802	621193	3,0583	1856018
Jan-90	2029	962	4212043	960386	4,3858	2869409
Jan-91	1979	1012	5357870	1320424	4,0577	3945201
Jan-92	1990	1001	5576598	1685050	3,3095	5034641
Jan-93	1938	1053	5868208	2062800	1,8752	6163293
Jan-94	1867	1124	6694459	2460341	2,7029	7351077
Jan-95	1700	1291	7207482	2910231	2,4766	8695271
Jan-96	1764	1227	10051109	3366231	2,9859	10057721
Jan-97	1844	1147	11582276	3799979	3,0479	11353686
Jan-98	1850	1141	12747164	4209467	3,0282	12577166
Jan-99	1912	1079	13875906	4611841	3,0088	13779390
Jan-00	1874	1117	15717840	5014763	3,1343	14983252
Jan-01	1926	1065	17311528	5408017	3,2556	16158227
Jan-02	1910	1081	18144772	5797988	3,1295	17323394
Jan-03	1950	1041	19421443	6172272	3,1467	18441691
Jan-04	1850	1141	19683382	6570268	3,0239	19630834
Jan-05	1700	1291	20139686	7022072	2,8681	20980747

Tabel 4. Hasil Penentuan Mekanisme Pendorong (*Drive Mechanisms*) Lapangan Minyak "X"

Waktu	Np (MMSTB)	Wp (MMSTB)	Wi (MMSTB)	WDI (%)	SDI (%)	DDI (%)
Jan-85	0	0	0	0	0	0
Jan-86	0,702	0	0	54,4	38,5	7,1
Jan-87	3,205	0,012	0	13,5	54,4	32,1
Jan-88	5,111	0,051	0	16,4	52,1	31,5
Jan-89	7,757	0,101	0	21,4	48,4	30,2
Jan-90	9,881	0,141	0	26,6	44,9	28,4
Jan-91	11,638	0,273	1,421	29,9	42,8	27,3
Jan-92	12,995	0,285	3,761	36,2	39,1	24,7
Jan-93	13,735	0,567	5,045	38,5	37,4	24,1
Jan-94	14,771	1,161	6,307	39,5	36,7	23,8
Jan-95	17,057	1,602	8,497	37,9	37,2	24,9
Jan-96	18,488	2,459	10,676	44,1	33,7	23,2
Jan-97	19,357	3,386	13,651	51,6	29,3	19,1
Jan-98	20,718	3,909	16,981	56,3	26,5	17,3
Jan-99	21,391	5,281	20,443	61,2	23,6	15,2
Jan-00	21,862	7,124	22,364	61,4	23,4	15,2
Jan-01	22,079	7,813	22,698	65,2	21,7	13,1
Jan-02	22,246	8,371	24,884	65,2	21,7	13,1
Jan-03	22,477	9,001	25,781	67,5	20,4	12,1
Jan-04	22,844	10,071	26,732	65,3	15,2	19,5
Jan-05	23,091	11,381	27,956	60,1	24,8	15,1

perhitungan dari pengosongan reservoir, laju produksi minyak (Q_o) dan air (Q_w) serta kumulatif produksi minyak (N_p) dan air (W_p) ditunjukkan pada Tabel 5 serta Gambar 5 dan Gambar 6.

HASIL DAN PEMBAHASAN

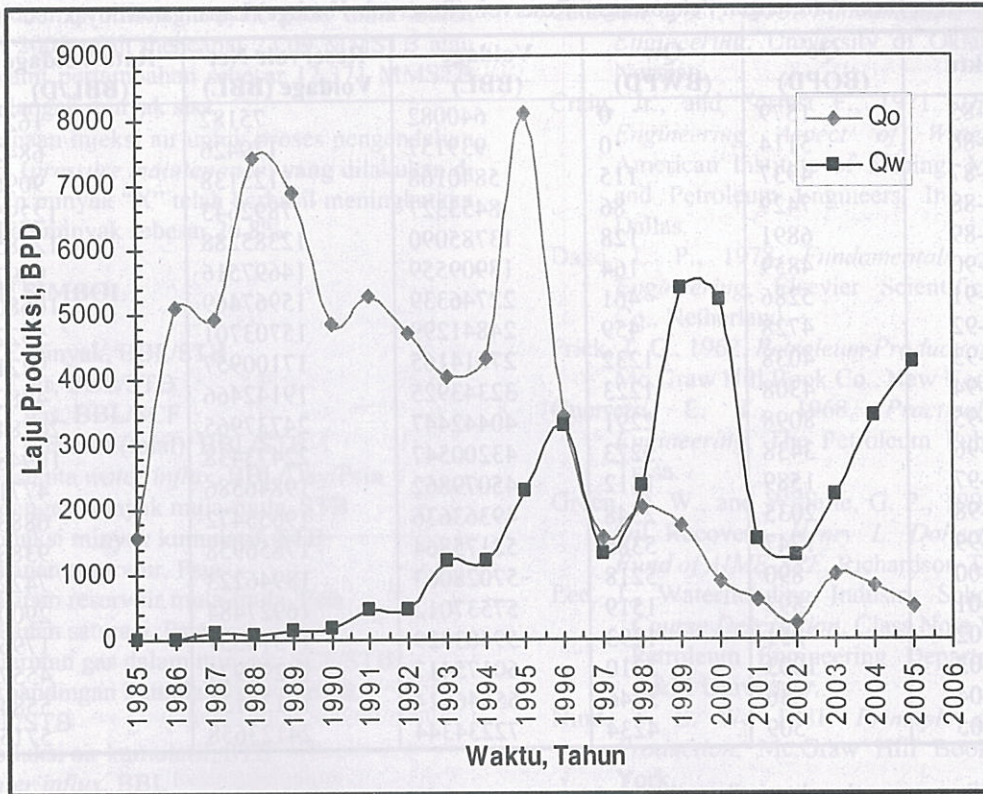
Evaluasi proses pengendalian tekanan reservoir yang dilakukan menggunakan injeksi air di reservoir lapangan minyak "X" didasarkan pada suatu pengamatan terhadap perilaku tekanan reservoir lapangan tersebut. Tekanan reservoir merupakan salah satu aspek penting yang dapat mempengaruhi aspek lainnya, seperti perilaku produksi minyak, perilaku *gas oil ratio* (GOR) dan *water cut*. Selain itu tekanan reservoir merupakan faktor yang sangat erat kaitannya dengan proses perhitungan cadangan minyak mula-mula, perhitungan *water influx*, perhitungan laju pengosongan reservoir dan perkiraan perolehan minyak di masa akan datang. Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan *Material Balance* dengan anggapan bahwa reservoir bersifat homogen, fluida bersifat *incompressible*, simstim aliran *fluida steady state* dan volume reservoir dalam keadaan tetap atau konstan.

Dalam melakukan perhitungan yang berhubungan dengan proses pengendalian tekanan reservoir, diperlukan besarnya harga IOIP, yang dalam hal ini dilakukan menggunakan metode volumetris dan Havlena-Odeh. Perhitungan menggunakan metode volumetris didasarkan pada volume batuan reservoir yang mengandung hidrokarbon. Untuk reservoir di lapangan minyak "X" diketahui besarnya cadangan minyak mula-mula berdasarkan metode volumetris sebesar 31,589 MMSTB dan berdasarkan metode *Material Balance* (Havlena-Odeh) sebesar 31,5889 MMSTB. Selanjutnya berdasarkan data tersebut serta didukung oleh data-data produksi yang ada, maka dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya volume perembes-

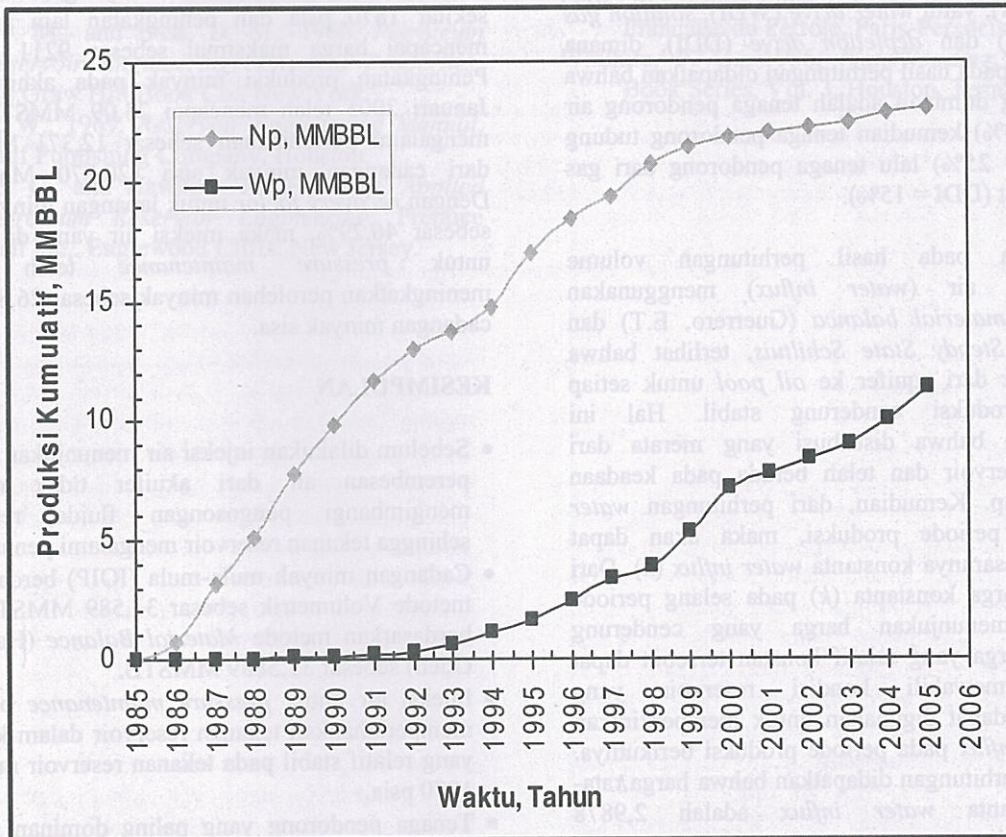
an air dari akuifer menggunakan persamaan *Material Balance*.

Air dari dalam akuifer yang merembes ke dalam zone minyak akan dapat mengisi pori-pori batuan yang ditinggalkan oleh minyak yang terproduksi dan sebagian lagi air tersebut akan ikut terproduksi. Adanya air dari akuifer yang menggantikan volume pori batuan dalam jumlah yang seimbang akan dapat menyebabkan tekanan reservoir tetap dalam kondisi yang relatif stabil (besar). Apabila volume pori batuan yang ditinggalkan oleh fluida reservoir akibat proses produksi tidak diimbangi oleh perembesan air, maka akan terjadi pengosongan volume reservoir tersebut (*reservoir net voidage*). Hal ini akan menyebabkan tekanan reservoir mengalami penurunan, sehingga dapat mengurangi kemampuan dalam mendorong minyak. Besarnya reservoir *voidage* merupakan penjumlahan dari volume minyak dan gas serta air yang terproduksi. Sedangkan harga *reservoir net voidage* merupakan selisih antara *reservoir voidage* dengan volume perembesan air dari akuifer (*water influx*).

Perhitungan volume perembesan air (*water influx*) di lapangan minyak "X" sebelum dilakukan proses *pressure maintenance* menunjukkan bahwa laju perembesan air tidak cukup untuk mengimbangi laju pengosongan reservoir. Sebagai contoh, hal ini dapat dilihat dari besarnya pengosongan reservoir hingga bulan Januari 1990 adalah 18.909.559 STB sedangkan besarnya *water influx* hanya 4.212.043 STB, sehingga *reservoir net voidage* adalah 14.697.516 STB. Selanjutnya volume pengosongan reservoir yang selalu meningkat dari waktu ke waktu ini mengakibatkan terjadinya penurunan tekanan reservoir dari 2991 psia (Januari 1985) ke 2029 psia (Januari 1990) dan akibatnya laju produksi minyak mengalami penurunan dari 9978 BOPD (Maret 1985) menjadi 4877 BOPD (Juni 1990).



Gambar 5. Plot Laju Produksi Minyak (Qo) dan Air (Qw) Terhadap Waktu Untuk Lapangan Minyak "X"



Gambar 6. Plot Kumulatif Produksi Minyak (Np) dan Air (Wp) Terhadap Waktu Untuk Lapangan Minyak "X"

Tabel 5. Hasil Perhitungan Pengosongan Reservoir (Reservoir *Voidage*) Lapangan Minyak "X"

Waktu	Qo (BOPD)	Qw (BWPD)	Voidage (BBL)	Reservoir Net Voidage (BBL)	Rate Voidage (BBL/D)
Jan-85	1579	0	640082	75182	1627
Jan-86	5114	0	939157	179426	6842
Jan-87	4937	115	5840168	5125138	9096
Jan-88	7429	86	8453327	7892643	12295
Jan-89	6891	128	13785090	12385288	12285
Jan-90	4859	164	18909559	14697516	9397
Jan-91	5286	461	22746339	15967469	10680
Jan-92	4728	459	24841299	15703701	5522
Jan-93	4038	1232	27614165	17100957	9221
Jan-94	4308	1223	32343925	19142466	4880
Jan-95	8098	2291	40442447	24737965	20784
Jan-96	3438	3273	43200547	22473438	10948
Jan-97	1589	1312	45079862	19846586	4771
Jan-98	2035	2348	49363636	19655472	6883
Jan-99	1747	5385	52175864	17856958	9388
Jan-00	890	5218	57028063	18946223	7422
Jan-01	593	1519	57537012	16927484	2900
Jan-02	251	1293	59403329	17374557	1796
Jan-03	1003	2210	60175417	16291974	4557
Jan-04	836	3446	65546514	19131132	5584
Jan-05	509	4234	72234344	24123658	5715

Dari perhitungan karakteristik mekanisme pendorong reservoir (*drive index*), dapat dibuktikan bahwa mekanisme pendorong di lapangan minyak "X" adalah kombinasi (*combination drive mechanisms*), yaitu *water drive* (WDI), *solution gas drive* (SDI) dan *depletion drive* (DDI), dimana didasarkan pada hasil perhitungan didapatkan bahwa yang paling dominan adalah tenaga pendorong air (WDI = 60%) kemudian tenaga pendorong tudung gas (SDI = 25%) lalu tenaga pendorong dari gas yang terlarut (DDI = 15%).

Berdasarkan pada hasil perhitungan volume perembesan air (*water influx*) menggunakan persamaan *material balance* (Guerrero, E.T) dan persamaan *Steady State Schiluis*, terlihat bahwa *water influx* dari akuifer ke *oil pool* untuk setiap periode produksi cenderung stabil. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi yang merata dari tekanan reservoir dan telah berada pada keadaan yang mantap. Kemudian, dari perhitungan *water influx* per periode produksi, maka akan dapat diketahui besarnya konstanta *water influx* (k). Dari beberapa harga konstanta (k) pada selang periode produksi, menunjukkan harga yang cenderung konstan. Harga yang relatif konstan tersebut dapat dianggap mewakili kondisi reservoir yang selanjutnya dapat digunakan untuk memperkirakan laju *water influx* pada periode produksi berikutnya. Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa harga rata-rata konstanta *water influx* adalah 2,9878 BBL/Day/Psia.

Berdasarkan hasil evaluasi dan analisa di atas maka dengan demikian dapat dikatakan bahwa

pelaksanaan injeksi air untuk mengendalikan tekanan di lapangan minyak "X" yang dimulai pada bulan Juli 1990 telah berhasil mengendalikan tekanan reservoir dalam keadaan yang relatif stabil sekitar 1870 psia dan peningkatan laju produksi mencapai harga maksimal sebesar 9211 BOPD. Peningkatan produksi minyak pada akhir bulan Januari 2005 telah mencapai 23,09 MMSTB atau mengalami pertambahan sebesar 12,371 MMSTB dari cadangan minyak sisa (20,870 MMSTB). Dengan *recovery factor* untuk lapangan minyak "X" sebesar 46,29%, maka injeksi air yang dilakukan untuk *pressure maintenance* telah dapat meningkatkan perolehan minyak sebesar 26,8% dari cadangan minyak sisa.

KESIMPULAN

- Sebelum dilakukan injeksi air menunjukkan bahwa perembesan air dari akuifer tidak mampu mengimbangi pengosongan fluida reservoir sehingga tekanan reservoir mengalami penurunan.
- Cadangan minyak mula-mula (IOIP) berdasarkan metode Volumetrik sebesar 31,589 MMSTB dan berdasarkan metode *Material Balance* (Havlena-Odeh) sebesar 31,5889 MMSTB.
- Injeksi air untuk *pressure maintenance* berhasil mempertahankan tekanan reservoir dalam kondisi yang relatif stabil pada tekanan reservoir rata-rata 1870 psia.
- Tenaga pendorong yang paling dominan adalah tenaga dorong air (WDI = 60%), kemudian tudung gas (SDI = 25%) dan gas terlarut (DDI = 15%).

- Peningkatan produksi minyak pada akhir bulan Januari 2005 telah mencapai 23,09 MMSTB atau mengalami pertambahan sebesar 12,371 MMSTB dari cadangan minyak sisa.
- Pelaksanaan injeksi air untuk proses pengendalian tekanan (*pressure maintenance*) yang dilakukan di lapangan minyak "X" telah berhasil meningkatkan perolehan minyak sebesar 26,8%.

DAFTAR SIMBOL

- Bo : FVF minyak, BBL/STB
 Bw : FVF air, BBL/STB
 Bg : FVF gas, BBL/SCF
 Bt : FVF dua fasa (total), BBL/STB
 k : Konstanta *water influx*, BBL/Day/Psia
 N : Cadangan minyak mula-mula, STB
 Np : Produksi minyak kumulatif, STB
 P : Tekanan reservoir, Psia
 Pi : Tekanan reservoir mula-mula, Psia
 Pb : Tekanan saturasi, Psia
 Rs : Kelarutan gas dalam minyak, SCF/STB
 Rp : Perbandingan kumulatif gas-minyak, SCF/STB
 Wp : Produksi air kumulatif, STB
 We : *Water influx*, BBL
 Wi : Kumulatif air injeksi, STB

DAFTAR PUSTAKA

- Amyx, J. M., and Bass, D. M., 1960. *Petroleum Reservoir Engineering: Physical Properties*, Mc.Graw Hill Book Co., New York.
- Cole, F. W., 1969. *Reservoir Engineering Manual*, Gulf Publishing Company, Houston.
- Craft, B. C., and Hawkins, M. F., 1979. *Applied Petroleum Reservoir Engineering*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

- Calhoun, J. C., 1953. *Fundamentals of Reservoir Engineering*, University of Oklahoma Press, Norman.
- Craig, Jr., and Forrest F., 1971. *The Reservoir Engineering Aspect of Water flooding*, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Inc., New York, Dallas.
- Dake, L. P., 1978. *Fundamentals of Reservoir Engineering*, Elsevier Scientific Publishing Co., Netherland.
- Frick, T. C., 1962. *Petroleum Production Handbook*, Mc.Graw Hill Book Co., New York.
- Guerrero, E. T., 1968. *Practical Reservoir Engineering*, The Petroleum Publishing Co., Tulsa.
- Green, D. W., and Willhite, G. P., 1998. Enhanced Oil Recovery, *Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME-SPE*, Richardson-Texas.
- Lee, J., Waterflooding Industry School, *Module Course Description*, Class Note Vol. 1 and 2, Petroleum Engineering Department, Texas A&M University.
- Nind, T. E. W., 1981. *Principle of Oil Well Production*, Mc.Graw Hill Book Co., New York.
- Smith, R. C., 1975. *Mechanics of Secondary Oil Recovery*, Krieger Publishing Co., New York - USA.
- Latil, M., 1980. *Enhanced Oil Recovery*, Institut Francaise du Petrole, Paris-Perancis,
- Whilhite, P. G., 1986. *Waterflooding*, SPE Text Book Series, Vol. 3, Houston, Texas,