

Edisi Kedua

PRINSIP
Pengeluaran
TELAGA MINYAK

T. E. W. Nind

Penterjemah

ABDUL RAZAK ISMAIL

MOHD FAUZI HAMID

MUHAMMAD ABDUL MANAN

Penerbit

Universiti Teknologi Malaysia

Skudai, Johor Darul Ta'zim

1998

PRINCIPLES OF OIL WELL PRODUCTION, T. E. W. NIND

Copyright © T. E. W. Nind – 1981

All rights reserved.

Hak cipta ©1998 edisi bahasa Malaysia dipegang oleh Universiti Teknologi Malaysia.

Hak cipta terpelihara.

Hak cipta terpelihara. Tiada dibenarkan mengeluarkan mana-mana bahagian artikel, ilustrasi, dan isi kandungan buku ini dalam apa jua bentuk dan cara apa jua sama ada dengan cara elektronik, fotokopi, mekanik, atau cara lain sebelum mendapat izin bertulis daripada Timbalan Naib Canselor (Pembangunan), Universiti Teknologi Malaysia, Kampus Skudai, 80990 Johor Darul Ta'zim, Malaysia. Perundingan tertakluk kepada perkiraan royalti atau honorarium.

Perpustakaan Negara Malaysia Data Pengkatalogan-dalam-Penerbitan

Nind, T. E. W.

Prinsip pengeluaran telaga minyak / T. E. W. Nind,
penterjemah Abdul Razak Ismail ... [et al]. – Ed. ke-2

Mengandungi indeks

ISBN 983-52-0096-3

I. Petroleum engineering. I. Abdul Razak Ismail. II. Judul.
622.3382

Editor: Issham Ismail
Pereka Kulit: Zalawati Sufian

Diatur huruf oleh / *Typeset by*
PANTAS SET SDN. BHD.,
26A, JALAN PANDAN 2/1
PANDAN JAYA,
55100 CHERAS
KUALA LUMPUR

Diterbitkan di Malaysia oleh / *Published in Malaysia by*
PENERBIT UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA,
UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA
80990 Skudai, Johor Bahru,
Johor Darul Ta'zim, MALAYSIA.

Dicetak di Malaysia oleh / *Printed in Malaysia by*
PERCETAKAN SURYA SDN. BHD.
LOT 29, KAWASAN PERINDUSTRIAN BUKIT KATIL
75450 BUKIT KATIL MELAKA
MELAKA

RM36.00

Kandungan

Prakata Edisi Kedua	xi
Petikan daripada Prakata Edisi Pertama	xiii
1 Prestasi Reservoir	1
1-1 Pengenalan	1
1-2 Kebolehtelapan	3
1-3 Persamaan Aliran Jejari	11
1-4 Analisis Tokokan Tekanan Kaedah Homer	18
1-5 Kecekapan Pelengkapan	22
1-6 Tingkah Laku WOR	24
1-7 Tingkah Laku GOR	27
1-8 Lengkung Prestasi Reservoir	32
2 Lengkung Penurunan Kadar Pengeluaran	35
2-1 Pengenalan	35
2-2 Penurunan Eksponen	36
2-3 Penurunan Hiperbola dan Harmonik	43
2-4 Kesimpulan – Suatu Amaran	49
3 Prestasi Formasi Produktif	51
3-1 Pengenalan	51
3-2 Indeks Pengeluaran dan IPR	51
3-3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Bentuk IPR	57
3-4 Meramalkan IPR: Lapangan Pemacu Susutan	62
3-5 Kesan Aliran Gelora	73
3-6 Kesan Susutan Aras terhadap WOR	73

4	Prestasi Angkat Tegak	79
4-1	Pengenalan	79
4-2	Regim Aliran dalam Aliran Tegak Dua Fasa	80
4-3	Prestasi Angkat Tegak: Poettmann dan Carpenter	82
4-4	Prestasi Angkat Tegak: Ros	91
4-5	Prestasi Angkat Tegak: Gilbert	93
4-6	Grid Tekanan-Kadar-Kedalaman	117
4-7	Gelinciran dan Rintangan Aliran: GLR Optimum	119
4-8	Kesan Saiz Tetiub: Aliran Anulus	124
4-9	Lengkung Taburan Tekanan: Ringkasan Perbandingan	127
4-10	Persamaan Lengkung Taburan Tekanan	131
4-11	Nota Kedalaman Tetiub: Lencongan Lubang	140
4-12	IPR: Telaga Aliran	141
4-13	Dua Contoh	145
5	Prestasi Pencekik: Sejarah Prestasi Telaga	153
5-1	Pengenalan	153
5-2	Prestasi Pencekik	154
5-3	Keadaan Aliran Stabil dan Tak Stabil	159
5-4	Kesan Perubahan Saiz Pencekik	163
5-5	Kesan Tekanan Statik terhadap Kecekapan Telaga Aliran	165
5-6	Ramalan Pengeluaran untuk Kolam Minyak	168
5-7	Kesan Perubahan Kecil GLR Pengeluaran	181
5-8	Kitaran Mengepala	183
5-9	Pencekik-Dasar Lubang dan Tallian Aliran: Komen Umum	190
6	Prinsip Angkat Gas	193
6-1	Pengenalan	193
6-2	Contoh Gambaran	194
6-3	Keperluan Kuasa Kuda Pemampat	198
6-4	Meminimumkan Keperluan Kuasa Kuda Pemampat	200
6-5	Kedudukan Angkat Gas dalam Sejarah Pengeluaran Telaga	215
6-6	Keperluan Injap Angkat Gas	215
7	Injap Angkat Gas dan Reka Bentuk Rentetan	219
7-1	Pengenalan	219

7-2	Injap Kebezaan	220
7-3	Aliran Gas Melalui Pencekik	222
7-4	Contoh Reka Bentuk Rentetan: Injap Kebezaan	225
7-5	Injap Belos Bercas Tekanan	235
7-6	Contoh Reka Bentuk Rentetan: Injap Belos Bercas Tekanan	239
7-7	Komen Kesimpulan	245
8	Pengeluaran Cecair Oleh Slug	247
8-1	Pengenalan	247
8-2	Tiga Kaedah Pengeluaran Yang Melibatkan Slug Cecair	248
8-3	Tokokan Cecair Di Dalam Silinder Tegak Hujung Terbuka	252
8-4	Frekuensi Kitaran dan Kecekapan Optimum	255
8-5	GLR Yang Berfungsi Saiz Slug	264
8-6	Angkat Pelocok Semula jadi	268
9	Pengepaman Rod Penyedut	275
9-1	Pengenalan	275
9-2	Kitaran Pengepaman	276
9-3	Peralatan Permukaan dan Subpermukaan	277
9-4	Pergerakan Rod Tergilap	280
9-5	Analisis Kira Hampir Pengepaman Rod Penyedut: Saiz Rod Tunggal	284
9-6	Penggunaan Rentetan Rod Tirus Dalam Pengepaman Rod Penyedut	294
9-7	Kadar Gelinciran Minyak Melepassi Pelocok Pam	295
10	Alatan Telaga Pengepaman	301
10-1	Pengenalan	301
10-2	Dinagraf Pam: Gambaran Umum	301
10-3	Dinagraf Pam: Pentafsiran Keputusan	303
10-4	Dinamometer Permukaan: Gambaran Umum	305
10-5	Pentafsiran Kualitatif Kad Dinamometer Permukaan	306
10-6	Analisis Kad Dinamometer Secara Berkomputer	309
10-7	Pengepaman Dengan Anulus Tertutup dan Dengan Anulus Terbuka	311
10-8	Tabiat Bendalir Anulus: Pengepaman Dengan Anulus Terbuka	312

10-9	Lokasi Aras Bendalir Anulus	316
10-10	Penentuan BHP Aliran: Telaga Pengepaman	317
11 Masalah Khusus – Telaga Pengepaman		329
11-1	Pengenalan	329
11-2	Kesan Gas Bebas Terhadap Kecekapan Pam: Sauh Gas	330
11-3	Pengadukan	335
11-4	Keserentakan	335
11-5	Kedalaman Pengesatan Pam Optimum: Anulus Berpengeluaran Terputus-putus	341
12 Ekonomi Pengeluaran		347
12-1	Pengenalan	347
12-2	Beberapa Definisi	348
12-3	Projek Pendapatan Baru	349
12-4	Nilai Masa Kini (PDV)	352
12-5	Kesan Inflasi	352
12-6	Kesan PDV Ke Atas Analisis Projek	354
12-7	Kadar Pulangan	356
12-8	Perbelanjaan Modal Jangka Panjang	361
12-9	Projek Pecutan	364
12-10	Penurunan atau Peningkatan Jangka Pendek Kadar Pengeluaran	374
12-11	Persoalan Cukai	382
12-12	Kadar Diskaun Setanjar Namaan	382
12-13	Fungsi $[1 - \exp(-x)]/x$	385
12-14	Penentuan Kriteria Keputusan: Projek Pendapatan Baru	387
12-15	Penentuan Kriteria Keputusan: Projek Pecutan	390
12-16	Pengurangan atau Peningkatan Jangka Pendek Kadar Pengeluaran: Analisis Matematik	391
Faktor Pertukaran		397
Masalah		399
Nota Untuk Penyelesaian Masalah		414
Indeks Nama		437
Indeks Perkara		439

Prestasi Reservoir



1-1 PENGENALAN

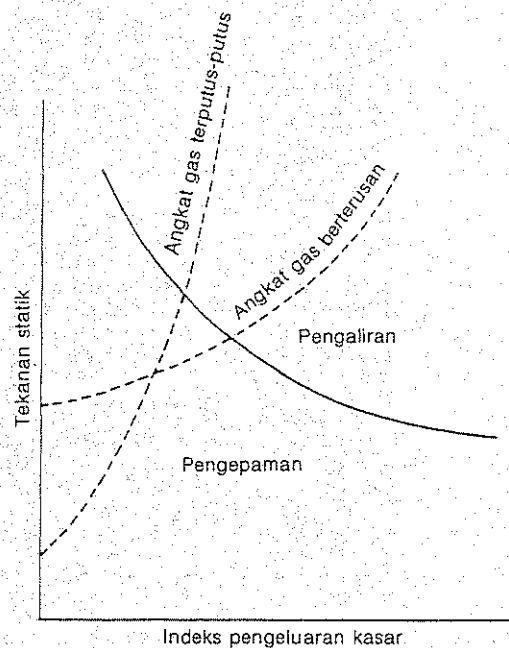
Tema buku ini adalah tentang telaga pengeluaran minyak yang hanya merupakan sebahagian daripada satu sistem yang kompleks yang merangkumi reservoir, telaga itu sendiri dan kemudahan permukaan. Setiap unsur dalam sistem ini mempengaruhi yang lain dan untuk mendapatkan operasi yang berkesan, unsur-unsur tersebut perlu saling serasi antara satu dan lain.

Untuk menjadi seorang jurutera pengeluaran yang berjaya adalah perlu baginya memiliki pengetahuan yang luas dalam kejuruteraan reservoir dan mahir dengan kemajuan telaga minyak dan teknologi kelengkapan permukaan. Walau bagaimanapun, penulis bukanlah bermaksud untuk mengeluarkan sebuah buku panduan sebagai rujukan, tetapi lebih menekankan tentang prinsip-prinsip yang perlu diambil perhatian dalam mereka bentuk dan pengendalian telaga pengeluaran. Adalah diharapkan agar pemahaman prinsip-prinsip ini akan dapat membantu jurutera menyesuaikan diri dengan berbagai-bagai batasan dan peluang yang disediakan oleh keadaan reservoir, oleh kemajuan kelengkapan dan kebolehsediaan kelengkapan dan oleh faktor ekonomi keseluruhannya bagi menjayakan operasi syarikat. Tinjauan terhadap kategori utama pelengkapan telaga yang direka bentuk untuk mengeluarkan minyak, air dan gas dari formasi ke permukaan mungkin boleh memberikan satu permulaan yang sesuai.

Terdapat empat cara pengeluaran dari telaga dapat dilakukan: telaga dialirkan keluar secara semula jadi melalui angkat gas, dipam keluar atau dikeluarkan secara terputus-putus. Setiap kaedah ini mempunyai ke-lainannya yang tersendiri dan pertindihan berlaku antara kategori-kategori tersebut. *Telaga aliran* mungkin merupakan pelengkapan aliran yang mudah dengan pengeluaran dibuat melalui tetiub; mungkin dipasang atau mungkin tidak dipasang dengan penyendat selongsong-tetiub; pencekik

mungkin diset di dalam tetiub, pada kepala telaga atau di dalam talian aliran permukaan; pelengkapan boleh jadi lubang langsing; dan pemutus jam bermasa mungkin digunakan untuk mengawal, mengepala atau untuk menepati had yang dibenarkan. Angkat gas mungkin berterusan atau terputus-putus (bertindih dengan kategori keempat); berbagai-bagai jenis mandrel angkat gas mungkin boleh digunakan; dan teknik tersebut mungkin boleh digabungkan dengan jenis angkat buatan yang lain, misalnya bersama-sama dengan pelocok jatuh bebas. Pengepaman boleh terdiri daripada berbagai-bagai bentuk (rod penyedut, hidraulik dan pengepaman emparan biasa digunakan), dan untuk setiap kategori, berbagai-bagai teknik tersedia – misalnya, unit lazim atau unit terimbang udara, pengepaman lejang panjang dan sebagainya. Pengeluaran terputus-putus (atau pengeluaran secara slug) mungkin boleh dihasilkan daripada penggunaan pelocok jatuh bebas, daripada pemasangan angkat kebuk, daripada operasi angkat-gas terputus-putus dan sebagainya.

Setiap teknik pengeluaran asas ini mempunyai julat operasi yang luas dan usaha untuk menggambarkan keadaan ini ditunjukkan dalam Rajah 1-1, yang disesuaikan dan dipermudahkan dari rajah yang dibuat oleh Babson (Rujukan 1)¹. Pendekatan begini mesti digunakan dengan berhati-



Rajah 1-1 Julat relatif penggunaan empat kaedah pengeluaran yang penting. (Menurut Babson, Rujukan 1, Ihsan API Drill. Prod. Practice.)

¹ Nombor di dalam kurungan berkaitan dengan rujukan yang ditunjukkan pada akhir bab ini.

hati kerana garisan-garisan pemisahan yang ditunjukkan bukan sahaja kurang jelas dan tertakluk kepada pertindihan kawasan yang luas, tetapi terdapat banyak faktor yang mesti diambil kira dalam menentukan teknik pengeluaran yang sesuai untuk sesebuah telaga tertentu atau sekumpulan telaga tertentu. Antara parameter yang perlu dipertimbangkan ialah:

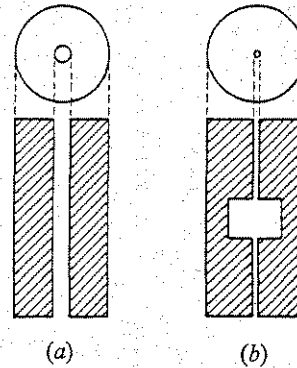
1. Kedalaman telaga
2. Nisbah gas/cecair (GLR) sekarang dan yang dijangkakan
3. Masalah pasir dan lilin
4. Kecondongan lubang telaga
5. Garis pusat selongsong
6. Hubungan prestasi aliran masuk (atau IPR; suatu indeks pengeluaran – keupayaan telaga) sekarang dan akan datang
7. Tekanan formasi dan penurunan tekanan
8. Pelan perolehan sekunder dan tertier
9. Hayat akan datang dan pengeluaran bertokok yang dijangkakan
10. Gas yang tersedia (tekanan tinggi)
11. Kesukaran kerja semula (misalnya pelengkapan luar pesisir)
12. Kelikatan minyak
13. Nisbah air/minyak (WOR) sekarang dan akan datang
14. Kriteria ekonomi dan kebolehtelapan yang ditetapkan oleh selaras dengan polisi dan keperluan syarikat.

Bahagian selanjutnya dalam bab pertama ini dipenuhi dengan ringkasan beberapa aspek tingkah laku reservoir yang perlu jurutera pengeluaran berikan perhatian yang sewajarnya. Tiada usaha dilakukan untuk merangkumkan butir-butir tersebut sepenuhnya atau secara tegas. Tujuannya ialah untuk memberikan butir-butir tersebut secara saintifik, tetapi yang lebih penting ialah jurutera pengeluaran dapat menggunakan prinsip-prinsip tersebut semasa menyelesaikan masalah.

1-2 KEBOLEHTELAPAN

Kebolehtelapan adalah suatu pengukuran – pada keadaan aliran bukan gelora – bendalir mengalir dengan mudahnya melalui batuan berliang dan berfungikan darjah saling hubungan antara liang. Misalnya dalam Rajah 1-2, digambarkan dua sampel yang dianggapkan mempunyai keliangan yang sama. Terbukti bahawa bendalir akan mengalir dari utara ke selatan dengan lebih mudah melalui sampel *a* daripada melalui sampel *b*, dengan aliran dihadkan oleh rerambut yang halus.

Henry Darcy telah menjalankan kerja-kerja perintis terhadap kebolehtelapan apabila menyelidik aliran air melalui pasir turas (Rujukan 2),



Rajah 1-2 Batuan yang mempunyai keliangan yang sama mungkin mempunyai kebolehtelapan yang sangat berbeza.

dan atas alasan ini unit kebolehtelapan dalam industri minyak dikenal sebagai *darcy*. *Milidarcy* (md) ialah satu per seribu daripada darcy dan merupakan unit yang biasa digunakan dalam industri. Kebolehtelapan reservoir berubah daripada kira-kira 1 ke 1000 md (0.001 ke 1 darcy) atau lebih.

Persamaan Darcy yang digunakan untuk aliran likat melalui kebolehtelapan batuan yang malar k , boleh ditulis sebagai

$$\frac{Q}{A} = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dl} \quad (1-1)$$

dengan Q/A = kadar aliran per unit luas keratan rentas melintang permukaan batuan yang luasnya A .

$-dp/dl$ = kadar kejatuhan tekanan dalam arah aliran keseluruhan.

μ = kelikatan bendalir.

Boleh ditunjukkan dengan mengambil kira faktor-faktor dimensi dalam persamaan yang k mempunyai dimensi luas. Walau bagaimanapun, sistem unit yang mesti digunakan untuk mendapatkan k dalam sebutan lapangan minyak adalah tidak piawai.² Jika Q diukur dalam sentimeter padu per saat, μ dalam sentipoise, l dalam sentimeter, A dalam sentimeter persegi dan p dalam atmosfera, nilai akhir k ialah dalam *darcy*; darabkan keputusan ini dengan 1000 memberikan jawapan dalam *milidarcy* (md).

Hubungan antara darcy dan luas ialah

$$1 = 10^{-8} \text{ sm per segi (kira hampir)}$$

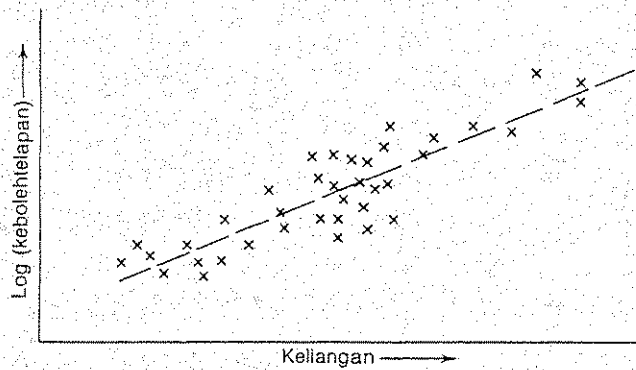
iaitu satu darcy bersamaan dengan sepuluh per sebilion daripada satu sentimeter per segi dan satu milidarcy ialah satu per seribu daripada nilai ini.

² Beberapa faktor pertukaran ke unit sistem metrik disenaraikan pada muka surat 397-398.

Kebolehtelapan pada tempat-tempat yang berbeza di dalam batuan reservoir yang sama mungkin berubah dengan julat yang luas. Oleh itu, adalah tidak sesuai untuk cuba mengukur kebolehtelapan setiap sampel teras dengan terlalu tepat. Secara kasar, bolehlah dikatakan bahawa apabila nilai kebolehtelapan kurang daripada 50 md, maka telaga yang mengeluarkan bendalir dari reservoir adalah pengeluar yang buruk berdasarkan kepada pengeluaran harian per kaki reservoir bersih (kecuali jika terdapat rawatan perangsangan formasi seperti peretakan atau pengasidan digunakan). Jika nilai kebolehtelapan antara 50 dan 250 md, maka telaga tersebut ialah purata ke baik. Kebolehtelapan melebihi 250 md pula akan menghasilkan telaga yang baik dengan syarat parameter lain adalah sama. Walau bagaimanapun, keadaan ini tidak mengambil kira masalah setiap telaga seperti potong air yang tinggi, nisbah gas/minyak (GOR) yang tinggi dan masalah pasir. Sebagai tambahan terhadap perubahan dari suatu tempat ke suatu tempat, kebolehtelapan mungkin berubah secara berarah. Pada kebanyakan lapangan, oleh sebab zon keuntungan pada mulanya dienapkan sebagai lapisan mendatar, maka kebolehtelapan menegak (kebolehtelapan bersudut tepat dengan satah perlapisan) biasanya kurang daripada kebolehtelapan mendatar (yang selari dengan satah perlapisan). Keadaan ini mungkin terjadi semasa pegenapan dengan butiran-butiran pasir diarahkan mengikut paksi panjang masing-masing pada arah yang sama (misalnya oleh tindakan arus). Dalam keadaan ini terdapat perbezaan nilai kebolehtelapan pada arah mendatar yang berlainan. Adalah perlu ingat bahawa Persamaan (1-1) hanya sesuai untuk aliran likat atau laminar. Secara amnya, apabila ujian di makmal digabungkan dengan pengiraan yang berdasarkan kepada data dari lapangan, ia menunjukkan yang halaju minyak di dalam formasi pada sesebuah lapangan pengeluar minyak memenuhi syarat ini, kecuali mungkin untuk bahagian yang berada dalam lingkungan satu atau dua kaki sekitar lubang telaga itu sendiri (lihat Bahagian 3-4 dan 3-5). Walau bagaimanapun, untuk kebanyakan telaga gas yang mempunyai pada kadar pengeluaran yang tinggi, aliran gelora mungkin memberikan kesan yang ketara (lihat, misalnya, Katz dan rakan-rakan, Rujukan 3, muka surat 46-51, 436-437).

Sungguhpun tiada sebarang hubungan terus antara kebolehtelapan dan keliangan, adalah munasabah untuk menjangkakan yang kebolehtelapan batu pasir yang ditimbuni dalam keadaan yang sama akan bertambah dengan meningkatkan keliangan. Sememangnya telah kerap ditemui bahawa antara sesuatu lapangan atau barangkali sekitar satu unit stratigrafi tunggal pada suatu kawasan yang agak luas, terdapat kemungkinan untuk memperoleh sekaitan garisan lurus yang munasabah apabila diplotkan logaritma kebolehtelapan terhadap keliangan (Rajah 1-3).

Sebahagian besar reservoir minyak mengandungi sekurang-kurangnya



Rajah 1-3 Jenis sekaitan antara keliangan dan kebolehtelapan yang ditemui pada kebanyakan lapangan

dua jenis bendalir yang dikenal sebagai air tersekap dan minyak; jika terdapat juga gas bebas, maka akan ada tiga jenis bendalir di dalam reservoir. Telah dibuktikan tentang wujudnya rintangan yang kuat terhadap aliran minyak yang melalui suatu batuan yang mempunyai 20 peratus air tersekap berbanding dengan minyak yang melalui batuan yang sama yang tiada air tersekap di dalamnya kerana air tersekap akan menghalang sebahagian daripada terusan aliran. Masalah ini telah dikaji oleh beberapa orang penyelidik (Rujukan 4 hingga 8). Kajian terhadap perkara ini telah dilakukan untuk pertama kalinya dengan teratur oleh Wyckoff dan Botset (Rujukan 4).

Misalnya jika suatu sistem minyak-air dipertimbangkan, kemudian dengan menganalogi Persamaan (1-1), maka *kebolehtelapan berkesan* terhadap minyak k_0 dan terhadap air k_w boleh ditakrifkan oleh persamaan-persamaan berikut

$$k_0 = -\frac{Q_0 \mu_0}{A} \left/ \frac{dp}{dl} \right. \quad (1-2)$$

dan

$$k_w = -\frac{Q_w \mu_w}{A} \left/ \frac{dp}{dl} \right. \quad (1-3)$$

Dalam persamaan ini, kadar kejatuhan tekanan di dalam minyak mungkin berbeza sedikit daripada yang diperolehi daripada air dan ini disebabkan oleh kesan daya-daya rerambut yang terjadi apabila aliran bendalir melalui liang dan tetiub yang bergaris pusat kecil. Di sini perbezaan ini diabaikan.

Hasil ujikaji menunjukkan bahawa kelikatan minyak, kelikatan air, kadar kemasukan total (dengan syarat keadaan aliran likat ditetapkan), tekanan balik dan panjang dan luas keratan rentas teras mempunyai kesan yang agak kecil terhadap plot k_0 dan k_w melawan ketepuan bendalir di dalam sampel batuan.³ Oleh itu, secara kasar, lengkung k_0 dan k_w untuk mana-mana teras bergantung hanya pada ketepuan minyak S_0 dan ketepuan air S_w di dalam teras (atau hanya satu daripada mereka, kerana hasil tambah S_0 dan S_w adalah satu).

Faktor-faktor k_0 dan k_w masing-masing dikenal sebagai kebolehtelapan berkesan terhadap minyak dan air. Tiga perkara penting perlu diperhatikan tentang lengkung-lengkung kebolehtelapan berkesan suatu sistem minyak-air.

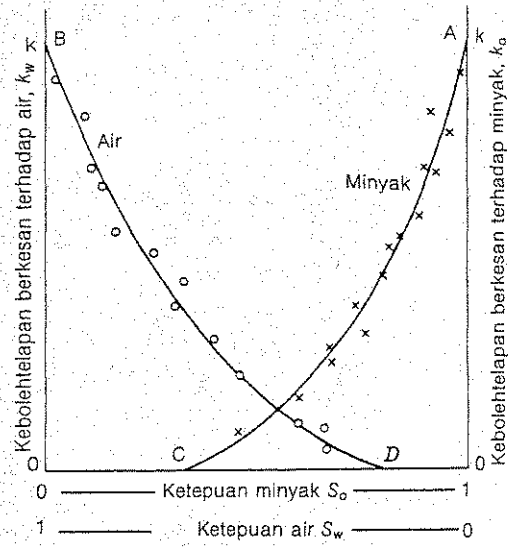
1. Faktor k_0 menurun dengan ketara apabila S_w meningkat daripada sifar. Begitu juga, k_w menurun dengan cepat apabila S_w berkurangan daripada nilai satu. Ini bermakna ketepuan air yang sedikit akan mengurangkan dengan ketara keupayaan minyak yang bergerak dengan mudah melalui batuan dan begitu juga sebaliknya.
2. Faktor k_0 menurun ke sifar sungguhpun masih terdapat ketepuan minyak di dalam teras (titik C pada Rajah 1-4). Dengan lain perkataan, di bawah ketepuan minimum tertentu, minyak di dalam teras tidak akan bergerak: Ketepuan minimum ini dikenal sebagai *ketepuan minyak baki* (S_{or}) atau *ketepuan minyak kritikal* (S_{oc})⁴. Begitu juga dengan air, dengan *ketepuan air baki* (S_{wr}) atau *ketepuan air kritikal* (S_{wc}) (titik D pada Rajah 1-4).
3. Kedua-dua nilai k_0 dan k_w selalunya kurang daripada k (kecuali pada titik A dan B). Sememangnya ini didapati benar kecuali pada A dan B. Hasil tambah k_0 dan k_w pada mana-mana ketepuan minyak sentiasa kurang daripada k , iaitu

$$k_0 + k_w \leq k \quad (1-4)$$

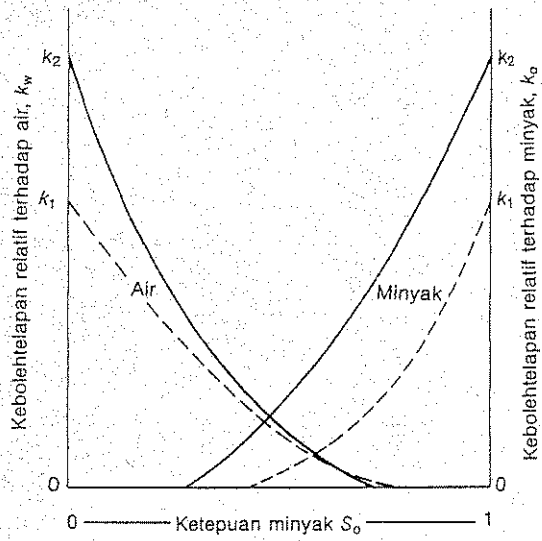
Sekarang, katakan dijalankan ujikaji dua-bendalir terhadap dua teras yang berlainan kebolehtelapan k_1 dan k_2 . Lengkung-lengkung seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1-5 mungkin diperolehi. Lengkung-lengkung ini

³ Walau bagaimanapun, adalah perlu diperhatikan bahawa terdapat beberapa bentuknya yang boleh dibezakan sungguhpun tidak ditanda. Tambahan pula lengkung-lengkung tersebut bergantung kepada arah di mana ketepuan-ketepuan bendalir tersebut berubah (misalnya ketepuan minyak bertambah atau berkurangan). Lihat Pirson, Rujukan 9, m.s. 81-83 tentang perbincangan mengenai fenomena ini.

⁴ Sebutan ketepuan minyak baki juga digunakan untuk mentakrifkan ketepuan minyak yang masih tinggal di dalam zon keuntungan pada akhir hayat lapangan tersebut. Ini mungkin lebih banyak daripada ketepuan minyak kritikal.



Rajah 1-4 Lengkung-lengkung kebolehtelapan berkesan lazim (sistem minyak-air).



Rajah 1-5 Lengkung-lengkung kebolehtelapan berkesan untuk dua teras yang berlainan.

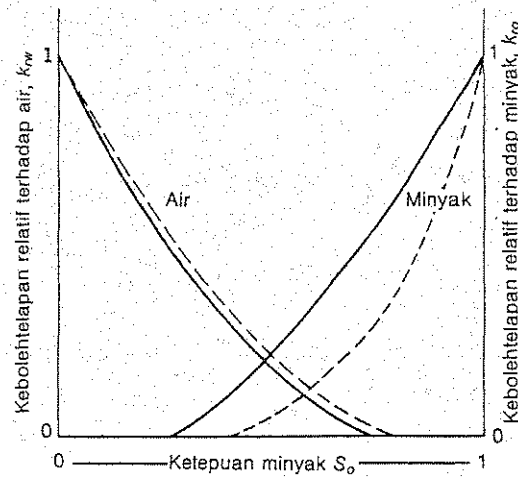
tidak memberikan penyelesaian terus perbandingan lengkung-lengkung $k_w - k_0$ dari dua teras tersebut kerana ia bermula daripada titik-titik yang berlainan, k_1 dan k_2 . Walaupun tidak memplot $k_w - k_0$ melawan ketepuan bendalir, nisbah-nisbah

$$\begin{aligned} k_{rw} &= \frac{k_w}{k} \\ k_{ro} &= \frac{k_0}{k} \end{aligned} \quad (1-5)$$

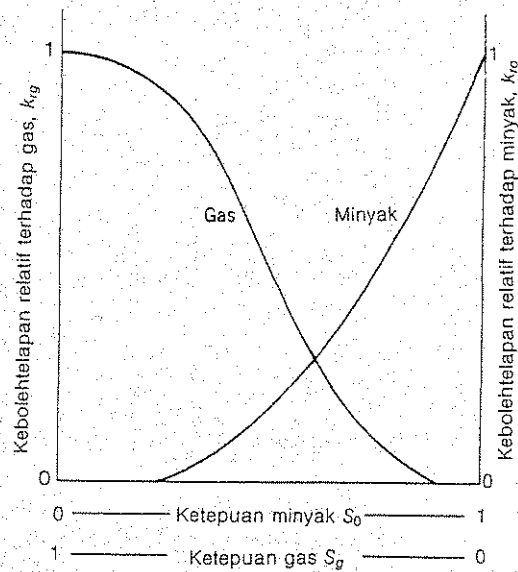
boleh diplotkan. Kemudian pada setiap kes, lengkung $k_{rw} - k_{ro}$ bermula daripada titik satu supaya perbandingan di antara lengkung-lengkung k_{rw} (begitu juga terhadap k_{ro}) boleh dibuat (Rajah 1-6). Nilai-nilai k_{rw} dan k_{ro} masing-masing dikenal sebagai kebolehtelapan relatif terhadap air dan terhadap minyak. Adalah perlu diperhatikan bahawa k_{rw} dan k_{ro} sentiasa berada pada julat 0 hingga 1 dan daripada Persamaan (1-4) di atas.

$$k_{ro} + k_{rw} \leq 1 \quad (1-6)$$

Malangnya, lengkung-lengkung kebolehtelapan relatif didapati dengan jelas bergantung terhadap formasi. Jika terdapat keadaan yang memerlukan penggunaan lengkung-lengkung ini (misalnya, dalam kajian reservoir), maka lengkung-lengkung untuk formasi yang hendak dikaji perlulah ditentukan secara ujikaji. Jika tidak boleh diperoleh, maka lengkung-lengkung ujikaji yang diterbitkan dalam literatur boleh digunakan.



Rajah 1-6 Lengkung-lengkung kebolehtelapan relatif untuk dua teras yang berlainan.



Rajah 1-7 Lengkung-lengkung kebolehtelapan relatif lazim (sistem gas-minyak).

Setakat ini hanya sistem air-minyak sahaja dipertimbangkan. Walau bagaimanapun, penentuan lengkung-lengkung sistem gas-minyak dan sistem gas-air boleh juga dilakukan. Untuk sistem ini, lengkung-lengkung kebolehtelapan relatif mempunyai bentuk umum seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1-7. Perkara-perkara penting dalam kes ini adalah seperti berikut:

1. Sungguhpun k_{ro} menurun dengan cepat apabila S_g meningkat daripada sifar, ketepuan minyak yang sedikit biasanya hanya mempunyai kesan yang kecil sahaja terhadap k_{rg} .
2. Ketepuan minyak kritikal S_{oc} dan ketepuan gas kritikal S_{gc} terjadi. Ketepuan minyak kritikal di dalam suatu sistem gas-minyak tidak semestinya sama dengan ketepuan minyak kritikal di dalam suatu sistem air-minyak walaupun teras yang sama digunakan. Ketepatan gas kritikal S_{gc} biasanya berada di sekitar 5 hingga 10 peratus.
3. Kedua-dua k_{rg} dan k_{ro} adalah kurang atau sama dengan satu, dan

$$k_{rg} + k_{ro} \leq 1 \quad (1-7)$$

4. Adalah dapat dilihat nisbah k_{rg}/k_{ro} cenderung untuk meningkat bersama dengan darjah pengukuhan batuan. Oleh itu, secara amnya, semakin kurang kelianginan dan kebolehtelapan suatu batuan, maka semakin tinggi kebolehtelapan relatif terhadap gas berbanding dengan kebolehtelapan relatif terhadap minyak pada suatu ketepuan gas yang diberi (lihat Pirson, Rujukan 9, muka surat 68-74).

5. Satu perkara yang timbul berhubung dengan lengkung gas-minyak tetapi tidak begitu ketara pada sistem air-minyak ialah persoalan tentang air tersekap. Untuk mendapatkan lengkung-lengkung kebolehtelapan relatif gas-minyak yang memberikan keputusan yang sepadan dengan keadaan di lapangan, maka adalah perlu untuk menjalankan ujikaji dengan kehadiran ketepuan air tersekap di dalam teras. Dalam kes ini, air tersekap mungkin boleh dianggap sebagai sebahagian daripada batuan dan pengukuran kebolehtelapan bendalir tunggal sama ada minyak atau gas perlu dilakukan dengan kehadiran air tersekap juga. Atas sebab inilah mengapa ketepuan gas dan ketepuan minyak kadangkala diberi dalam sebutan ruang liang yang diisi oleh hidrokarbon dengan anggapan bahawa air tersekap adalah fasa yang tidak bergerak, satu-satunya ciri yang mengurangkan keliangan berkesan.⁵

Secara amnya, dalam hubungan dengan ujikaji kebolehtelapan relatif atau kebolehtelapan berkesan, perlu diperhatikan bahawa teknik ujikaji yang digunakan mungkin memberikan kesan yang besar terhadap keputusan yang diperolehi. Oleh itu, walaupun hujah kualitatif yang berdasarkan kepada bentuk umum lengkung mungkin boleh dicapai, tetapi penggunaan lengkung secara kuantitatif selalunya mungkin merupakan punca berlakunya ralat.

Penyelakuan komputer bagi tingkah laku reservoir kerap kali melibatkan penggunaan input kebolehtelapan relatif tiga fasa. Walau bagaimanapun, kebolehsandaran lengkung-lengkung kebolehtelapan relatif yang diperolehi secara ujikaji untuk tiga bendalir yang mengalir serentak masih dipertikaikan.

1-3 PERSAMAAN ALIRAN JEJARI

Katakan sebuah telaga mengeluarkan cecair pada kadar q tong/hari (minyak tangki stok) daripada sebuah reservoir yang mendatar dan homogen yang mempunyai ketebalan keuntungan h kaki dan luas kawasan yang tidak terhad. Katakan juga bahawa keadaan aliran tidak berubah terhadap masa (iaitu aliran keadaan mantap dicapai). Pada keadaan tersebut dan dengan anggapan bahawa cecair yang dikeluarkan mempunyai kebolehmampatan

⁵ Hujah ini menganggap bahawa ketepuan air tersekap (atau celahan) adalah kurang atau sama dengan ketepuan air kritikal, oleh itu tiada pergerakan air berlaku. Walau bagaimanapun, dalam kebanyakan lapangan, ketepuan air tersekap adalah lebih besar daripada nilai kritikal, oleh itu sedikit air dikeluarkan bersama-sama dengan minyak pada permulaan pengeluaran telaga. Ciri-ciri pengeluaran air tersekap seperti ini ialah potong air telaga tersebut terus kekal pada tahap yang boleh dikatakan malar sepanjang hayatnya (lihat Bahagian 1-6).