

PENGGUNAAN BUSA UNTUK MENGAWAL MOBILITI
DALAM BANJIRAN CO₂-BUSA

SUGIATMO

Tesis ini dikemukakan
sebagai memenuhi syarat penganugerahan
ijazah Doktor Falsafah

Fakulti Kejuruteraan Kimia dan Kejuruteraan Sumber Asli

Universiti Teknologi Malaysia

APRIL 2004

Untuk mengenang kepergian yang tercinta Allahyarhamah Bonda Hj. Tumini bt. Imam Kardjito (Wafat 18 hb Dis 1999) dan Allahyarham Ayahanda Kasmungin bin Kuslan Sosroredjo (Wafat 27 hb April 2003). Kepada keluarga besar Kasmungin di rumah dan Siti Sunarintyas bt. Achmad Badawi yang tersayang atas galakan, inspirasi dan doa dalam menjayakan projek ini.

"Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, silih bergantinya malam dan siang terdapat tanda-tanda bagi orang-orang yang berakal, (yaitu) orang-orang yang mengingat Allah sambil berdiri atau duduk atau dalam keadaan berbaring dan mereka memikirkan tentang penciptaan langit dan bumi (seraya berkata): Ya Tuhan kami, tiadalah Engkau menciptakan ini dengan sia-sia. Maha suci Engkau, maka peliharalah kami dari seksa api neraka" . (QS. Al- Imran 3:190-191)

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan ikhlas kepada penyelia tesis Prof. Dr. Ahmad Kamal Idris di atas segala bantuan, bimbingan dan perbincangan yang diberi sepanjang tempoh penyelidikan tesis ini.

Penghargaan kepada ahli panel pemeriksa luar dan dalam dan juga pengerusi viva tesis Sekolah Pengajian Siswazah Universiti Teknologi Malaysia atas sumbangsarannya yang bernas.

Penghargaan juga diberikan kepada Pimpinan Universitas Trisakti dan Dekan FTM, Ketua Jurusan Teknik Perminyakan Universitas Trisakti yang memberi sokongan dalam menempuh pendidikan ini. Terima kasih juga kepada Prof Madya Dr. Mariyamni Awang atas penggunaan gran Vot IRPA no.72019 dalam projek ini. Sekalung penghargaan juga diberikan kepada Prof Madya Dr. Mat Hussin Yunan, Keluarga Kol (B) Abdul Rahman, En. Azman Ikhsan, En. Muhammad Manan, En. Fauzi Hamid, En. Roslan Jas, En. Othman Adon dan rakan-rakan yang lain telah memberikan bantuan sama ada secara langsung atau tidak langsung.

Akhir kata, penghargaan juga ditujukan kepada Prof. Clayton J. Radke, (University of California), Prof. Martin Blunt (Imperial College, Univ. London), Prof Madya W. R. Rossen (Stanford University), Dr. Karen Mannhardt (PRI, Canada) dan Dr. Oh H. Lee (Chevron Inc. USA) yang sudi menghantarkan beberapa kertas kerjanya yang penting kepada penulis.

ABSTRAK

Objektif tesis ini adalah mengkaji mekanisme aliran busa yang terjadi di dalam media berliang semasa dilakukan proses banjiran CO₂-busa. Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi mekanisme aliran busa adalah kadar alir gas (CO₂). Kadar alir gas yang digunakan dalam kajian ini dari 0.0001 sehingga 2.5000 ml/minit. Kesan kadar alir gas pada mekanisme aliran busa telah ditentukan. Dalam mengamati pergerakan aliran busa tersebut digunakan mikromodel sebagai media berliang. Fenomena mekanisme pergerakan aliran busa tersebut dirakamkan pada pita video. Manakala jenis surfaktan yang digunakan dalam kajian ini adalah alpha olefin sulfonat (AOS) dengan kepekatan surfaktan 1.00 wt. % dan menggunakan pelbagai jenis minyak sintetik misalnya heksana. Dari keputusan kajian didapati bahawa mekanisme aliran busa tersebut dapat terbentuk melalui proses pembentukan dan pemusnahan busa di dalam media berliang. Pada keadaan kadar alir yang tinggi (>1.0000 ml/minit) mekanisme aliran busa yang terbentuk di dalam media berliang lebih didominasi oleh proses pemutusan busa (*snap-off*) dan manakala pada kadar alir rendah (<1.0000 ml/minit) terbentuknya busa lebih didominasi oleh proses cantuman sedutan rerambut dan resapan gas. Selanjutnya tindak balas antara busa dan minyak di dalam media berliang dapat digolongkan sebagai jenis minyak yang tidak merebak (*non oil spreading*) seperti mikro emulsi di permukaan busa. Akibatnya aliran minyak yang terbentuk adalah jaring-jaring minyak pada permukaan busa yang satu dengan permukaan busa yang lain. Terjadinya proses cantuman sedut rerambut dan pemutusan busa (*snap-off*) tersebut akan mempengaruhi mobiliti minyak yang terperangkap di dalam liang batuan dan menyasarkan minyak untuk mengalirkannya menuju bahagian luar. Adanya busa dengan proses cantuman sedut rerambut dan pemutusan busa (adanya mekanisme aliran busa di dalam media berliang) dapat berjaya dalam mengawal mobiliti pada banjiran CO₂-busa.

ABSTRACT

The objective of this thesis is to study the mechanism of foam flow that occurs in porous media during CO₂-foam flooding process. One of the influential factors affecting the mechanism of foam flow in porous media is the flow rate. The experimental work was performed at flow rate ranging from 0.0001 to 2.5000 ml/min. This thesis determined the effect of the flow rates on foam flow mechanism in porous media. Micromodel was used as the porous media in order to enable the observation of the foam movement. The phenomena of the foam flow mechanism were recorded using video tape. The type of surfactant used in this experiment was alpha olefin sulphonate (AOS) at concentration of 1.00 wt.%. The oil phase was various synthetic oil (e.g. hexane). The experiments were conducted at room conditions. The results of the study showed that the mechanism of foam flow in porous media are reforming and breaking process of foam in porous medium. At condition of high flow rates (>1.0000 ml/min) the mechanism of foam flow is dominated by the snap-off, while at the condition of low flow rates (<1.0000 ml/min), it is dominated by the coalescence capillary suction and gas diffusion. The interaction between oil and foam in porous media was categorized as non-oil spreading phase (such as micro emulsion) on the foam surfaces. The mechanism of oil flow was observed as network of oil on foam surfaces. Due to the coalescence capillary suction and snap-off processes, the trapped oil in porous media was displaced to the outlet. In the presence of foam in porous media with coalescence capillary suction and snap-off mechanisms have succeeded in controlling mobility of CO₂-foam flooding.

KANDUNGAN

JUDUL	i	
PENGAKUAN	ii	
DEDIKASI	iii	
PENGHARGAAN	v	
ABSTRAK	vi	
ABSTRACT	vii	
KANDUNGAN	viii	
SENARAI JADUAL	xiv	
SENARAI RAJAH	xvii	
SENARAI SIMBOL	xxiv	
SENARAI LAMPIRAN	xxvi	
BAB	PERKARA	MUKASURAT
1.	PENDAHULUAN	
	1.1 Latar Belakang Masalah	1
	1.2 Objektif dan Skop Kajian	5
	1.3 Hipotetis Kajian	5
	1.4 Organisasi Penulisan Tesis	6

II. BANJIRAN CO₂	7
2.1 Pengenalan	7
2.2 Beberapa Faktor Penting Di Dalam Proses Penyeseran Minyak	9
2.2.1 Mobiliti	10
2.2.2 Nisbah mobiliti (Mobiliti Ratio)	10
2.2.3 Isipadu liang tersuntik (Pore Volume Injected, PV)	12
2.2.4 Masa bolos (Breakthrough time)	13
2.2.5 Kecekapan sapuan luasan (Areal Sweep efficiency)	13
2.2.6 Nombor rerambut (Nc)	14
2.3 Banjiran Karbon Dioksida (CO ₂)	16
2.3.1 Sifat fizikal karbon dioksida (CO ₂)	16
2.3.2 Kriteria pemilihan proses banjiriran CO ₂	18
2.3.2.1 Banjiran CO ₂ tidak larut campur	18
2.3.2.2 Banjiran CO ₂ larut campur	19
2.3.3 Mekanisma penyeseran minyak dengan CO ₂	22
2.3.4 Pelbagai cara penyuntikan CO ₂ pada proses banjiran CO ₂	24
2.3.4.1 Banjiran CO ₂ berterusan	24
2.3.4.2 Banjiran CO ₂ berkarbonat	24
2.3.4.3 Banjiran CO ₂ berselang seli dengan air	25
2.3.4.4 Banjiran CO ₂ berserentak dengan air	25
2.3.4.5 Banjiran CO ₂ berselang seli dengan surfaktan	25
2.3.5 Faktor-faktor yang mempengaruhi banjiran CO ₂	27
2.3.6 Beberapa masalah yang dihadapi oleh banjiriran CO ₂	29
2.4 Rumusan	31

III.	SURFAKTAN DAN KESTABILAN BUSA	32
	3.1 Pengenalan	32
	3.2 Surfaktan	32
	3.2.1 Kepekatan misel kritikal surfaktan	35
	3.2.2 Penjerapan surfaktan	36
	3.2.3 Penggunaan surfaktan dalam banjir CO ₂ -busa.	40
	3.3 Busa	41
	3.4 Pencirian Busa	43
	3.4.1 Kualiti busa	43
	3.4.2 Tekstur busa	45
	3.4.3 Reologi busa	47
	3.4.4 Kelikatan busa	48
	3.4.5 Kestabilan busa	50
	3.5 Rumusan	61
IV.	KAJIAN MIKROSKOPIK, MOBILITI BUSA DAN FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI MEKANISMA ALIRAN BUSA	63
	4.1 Pengenalan Kajian Mikroskopik	63
	4.2 Kajian Mikroskopik Pada Proses Banjiran CO ₂ -Busa	66
	4.3 Busa Dalam Media Berliang	72
	4.4 Kegunaan Busa Dalam Media Berliang	76
	4.4.1 Busa sebagai mengawal mobiliti (Mobility control agent)	76
	4.4.2 Busa sebagai penghalang (Blocking agent)	77
	4.5 Reologi Busa Di Dalam Media Berliang	79
	4.6 Mobiliti Busa	81
	4.6.1 Kesan kualiti busa terhadap mobiliti busa	81
	4.6.2 Kesan kepekatan surfaktan terhadap mobiliti busa	83
	4.6.3 Kesan ketertelapan batuan terhadap mobiliti busa	85

4.6.4 Kesan ketepuan minyak terhadap mobiliti busa	87
4.6.5 Kesan halaju aliran gas terhadap mobiliti busa	88
4.7 Mekanisma Aliran Busa Dalam Media Berliang	93
4.7.1 Mekanisma pembentukan busa dalam media berliang	93
4.7.1.1 Mekanisma pemutusan busa	93
4.7.1.2 Mekanisma pembahagian busa	98
4.7.1.3 Mekanisma tertinggal di belakang	99
4.7.2 Mekanisma pemusnahan busa	101
4.7.2.1 Cantuman sedutan rerambut (<i>Capillary suction coalesence</i>)	101
4.7.2.2 Resapan gas (<i>Gas diffusion</i>)	103
4.8 Tindak Balas Antara Busa Dan Minyak	104
4.9 Rumusan	113
V. KAEDAH KAJIAN	114
5.1 Pengenalan	114
5.2 Durabiliti Busa	114
5.2.1 Bahan yang digunakan	116
5.2.2 Peralatan ujikaji durabiliti busa (Foam durability test)	119
5.2.3 Kaedah ujikaji	120
5.2.3.1 Tatacara penentuan kadar alir gas yang sesuai	120
5.2.3.2 Tatacara ujikaji penentuan jenis surfaktan yang terbaik	120
5.2.3.3 Tatacara ujikaji kesan campuran surfaktan pada kestabilan busa	121
5.2.3.4 Tatacara ujikaji kesan kemasinan pada kestabilan busa	121
5.2.3.5 Tatacara ujikaji kesan komposisi elektrolit pada kestabilan busa	121
5.2.3.6 Tatacara ujikaji kesan minyak pada kestabilan busa	122

5.2.4 Data pengamatan dan analisis	122
5.3 Kajian Mikroskopik Mekanisma Aliran Busa Dalam Media Berliang	122
5.3.1 Bahan Ujikaji	122
5.3.2 Mikromodel	122
5.3.3 Peralatan ujikaji pada kajian mikroskopik	124
5.3.4 Kaedah ujikaji pada kajian mikroskopik	125
5.3.5 Data pengamatan dan analisis	127
VI. KAJIAN DURABILITI BUSA	128
6.1 Keputusan Kajian	128
6.1.1 Pemilihan kadar alir gas	128
6.1.2 Pemilihan jenis surfaktan	130
6.1.3 Kesan campuran surfaktan pada kestabilan busa	131
6.1.4 Kesan kemasinan pada kestabilan busa	132
6.1.5 Kesan komposisi elektrolit pada kestabilan busa	133
6.1.6 Kesan minyak pada kestabilan busa	134
6.2 Perbincangan	136
6.2.1 Pemilihan kadar alir gas	136
6.2.2 Pemilihan jenis surfaktan	138
6.2.3 Kesan campuran surfaktan pada kestabilan busa	140
6.2.4 Kesan kemasinan pada kestabilan busa	141
6.2.5 Kesan komposisi elektrolit pada kestabilan busa	142
6.2.6 Kesan minyak pada kestabilan busa	144
6.3 Rumusan Dan Kesimpulan	145

VII	KAJIAN MIKROSKOPIK MEKANISMA ALIRAN BUSA DI DALAM MEDIA BERLIANG	146
	7.1 Pengenalan	146
	7.2 Keputusan Kajian	146
	7.2.1 Mekanisma aliran busa di dalam media berliang	147
	7.2.2 Kesan kadar alir gas pada mekanisma aliran busa	157
	7.2.3 Mobiliti CO ₂ yang tidak terkawal pada banjir CO ₂ -minyak	160
	7.2.4 Peranan mekanisma aliran busa dalam mengawal mobiliti pada banjir CO ₂ -busa	163
	7.2.5 Kesan pelbagai jenis minyak pada mekanisma aliran busa	171
	7.3 Perbincangan	180
	7.3.1 Mekanisma aliran busa di dalam media berliang	180
	7.3.2 Kesan kestabilan busa di dalam media berliang	181
	7.3.3 Kesan kadar alir gas pada mekanisma aliran busa	182
	7.3.4 Mobiliti CO ₂ yang tidak terkawal pada banjir CO ₂ -minyak	185
	7.3.5 Peranan mekanisma aliran busa dalam mengawal mobiliti pada banjir CO ₂ -busa	186
	7.3.6 Kesan pelbagai jenis minyak pada mekanisma aliran	187
	7.4 Rumusan	188
VIII.	KESIMPULAN	190
	8.1 Kesimpulan	190
	8.2 Cadangan Penyelidikan Lanjut	191
	RUJUKAN	193
	LAMPIRAN	221

SENARAI JADUAL

JADUAL	PERKARA	MUKA SURAT
2.1	Sifat fizikal CO ₂ (Mungan, 1991)	16
2.2	Kriteria pemilihan banjiran CO ₂ tidak larut campur	19
2.3	Kriteria pemilihan banjiran CO ₂ larut campur	21
2.4	Kesan tekanan dan kemiringan reservoir terhadap perolehan minyak (Wang, 1982)	28
3.1	Jenis surfaktan (Lake, 1989)	34
3.2	Beberapa contoh jenis surfaktan (Schramm dan Marangoni, 2000)	34
3.3	Julat nilai kepekatan misel kritikal pada pelbagai jenis surfaktan pada elektrolit rendah (Schramm dan Marangoni, 2000)	36
3.4	Contoh penyerapan surfaktan pada reservoir karbonat (Tsau dan Heller, 1992)	38
3.5	Penggunaan surfaktan pada pelbagai lapangan minyak	40
3.6	Pembentukan busa untuk jenis beranion dan bukan ion (Myers, 1991)	42
3.7	Pengkelasan kualiti busa	43
3.8	Kesan jenis surfaktan terhadap kestabilan busa (Myers, 1991)	52
3.9	Kesan suhu pada kestabilan busa (Maini dan Ma, 1984)	54
3.10	Hubungan tekanan dengan kestabilan busa (Holcomb,	

	Callaway dan Curry, 1981)	56
3.11	Kesan jenis minyak pada kestabilan busa (Tsau dan Heller, 1992)	58
3.12	Kesan penambahan organik polar pada Sodium Dodekil Benzene Sulfonat dengan perubahan KMK dan kestabilan busa (Myers, 1991)	60
4.1	Pencirian mikromodel pada beberapa kajian mikroskopik terdahulu	66
4.2	Beberapa kajian mikroskopik terdahulu	67
4.3	Ringkasan mengenai kegunaan busa untuk mengawal mobiliti di dalam media berliang	77
4.4	Ringkasan mengenai kegunaan busa untuk agen penghalang (Blocking agent)	78
4.5	Ringkasan kajian terdahulu mengenai reologi busa	80
4.6	Kesan kualiti busa terhadap mobility busa	82
4.7	Kesan kepekatan surfaktan terhadap mobiliti busa	85
4.8	Kesan ketertelapan batuan terhadap mobiliti busa	86
4.9	Ringkasan kesan halaju alir gas terhadap mobiliti busa	90
4.10	Ringkasan kajian terdahulu mengenai pembentukan busa dengan pemutusan busa	96
4.11	Kesan kehadiran minyak terhadap kestabilan busa	112
5.1	Ciri-ciri surfaktan yang digunakan	117
5.2	Data asas bahan yang digunakan	118
5.3	Ciri-ciri mikromodel yang digunakan	124
6.1	Kesan kadar alir gas pada pembentukan busa	129
6.2	Pemilihan jenis surfaktan	130
6.3	Kesan campuran surfaktan pada kestabilan busa	131
6.4	Kesan kemasinan air garam pada kestabilan busa untuk AOS	132
6.5	Kesan kemasinan air garam pada kestabilan busa untuk SDBS	133
6.6	Kesan komposisi elektrolit pada kestabilan busa	134
6.7	Kesan jenis dan kuantiti minyak pada kestabilan busa	136
6.8	Ringkasan kesan kadar alir gas terhadap laju pembentukan busa	137

7.1	Kronologi mekanisma aliran busa yang dapat terjadi semasa gas disuntikkan ke dalam media berliang yang terdapat larutan surfaktan	158
7.1	Ringkasan pemerhatian pengaruh kadar alir pada mekanisma pembentukan busa	159
7.3	Rangkuman peranan busa dalam mobiliti pada banjir CO ₂ -busa untuk pelbagai jenis minyak	179
7.4	Perbandingan ujikaji kesan halaju aliran gas pada mekanisma aliran busa	184

SENARAI RAJAH

RAJAH	PERKARA	MUKA SURAT
2.1	Empat kaedah EOR utama di USA (Jarrell <i>et al.</i> 2002).	8
2.2	Statistika penggunaan banjiran CO ₂ di beberapa negara (Jarrell <i>et al.</i> 2002).	9
2.3	Gejala penjejarian akibat nilai $M > 1$ (Wellington dan Vinegar, 1988).	11
2.4	Tipikal hubungan nisbah mobiliti dengan perolehan minyak (Haberman, 1959).	12
2.5	Lakaran fenomena masa bolos awal	13
2.6	Hubungan nisbah mobiliti dengan kecekapan sapuan luasan untuk corak lima bintik (Blackwell <i>et al.</i> 1959).	14
2.7	Korelasi nombor rerambut dengan ketepuan minyak baki dengan berbagai jenis batuan dan saiz butiran (Lake, 1989).	15
2.8	Hubungan antara tekanan dan ketumpatan untuk CO ₂ , N ₂ dan CH ₄ (Jarrell <i>et al.</i> 2002).	17
2.9	Hubungan antara tekanan dan kelikatan untuk CO ₂ , N ₂ dan CH ₄ (Jarrell <i>et al.</i> 2002).	17
2.10	Hubungan graviti minyak dengan kelikatan minyak pada projek	

	larut campur dan tidak larut campur (Jarrell <i>et al.</i> 2002).	20
2.11	Pembahagian kawasan penyesaran minyak berdasarkan tekanan dan suhu (Stalkup, 1983).	22
2.12	Lakaran berbagai proses banjiran CO ₂ (Klins, 1984; Wellington dan Vinegar, 1985).	26
2.13	Pengaruh tekanan pada perolehan minyak (Mungan, 1991).	28
3.1	Molekul surfaktan yang terdiri dua bahagian , iaitu bahagian kepala yang menyukai air (hidropilik) dan bahagian ekor yang membenci air (hidropobia).	33
3.2	Hubungan kepekatan surfaktan dan tegangan antara permukaan dalam menentukan kepekatan misel kritikal (Lake, 1989).	35
3.3	Hubungan antara kepekatan dengan penjerapan surfaktan (Lake, 1989).	37
3.4	Pemilihan surfaktan berdasarkan penjerapan surfaktan untuk batu karbonat dan pasir (Wellington dan Vinegar, 1985).	39
3.5	Bentuk busa dalam sfera dan polyhedron (Myers, 1991).	41
3.6	Lakaran alat pembentuk busa (Myers, 1991).	42
3.7	Pelbagai kualiti busa (Minssieux, 1974).	45
3.8	Ilustrasi tekstur halus dan tekstur kasar (Falls <i>et al.</i> 1988).	46
3.9	Taburan kekerapan saiz gelembung busa (Marsden dan Khan, 1966).	47
3.10	Hubungan kadar ricih dan tegasan ricih (Ahmad, 1989).	48
3.11	Kesan kualiti busa pada kelikatan busa (Mast, 1972).	49
3.12	Tipikal musnahnya busa terhadap masa (Maini dan Ma, 1984).	50
3.13	Kesan suhu pada kestabilan busa (Maini dan Ma, 1984).	55
3.14	Kesan tekanan pada kestabilan busa (Maini dan Ma, 1984).	56
3.15	Kesan minyak pada kestabilan busa menurut jenis minyak (Lau dan Brien, 1988).	57
3.16	Kesan jenis surfaktan dan ketepuan minyak pada kestabilan busa (Mannhardt <i>et al.</i> 2000).	59

3.17	Kesan penambahan alkohol pada sodium dodekil sulfat selepas 15 menit (Shah <i>et al.</i> 1984).	61
4.1	Tipikal jaringan mikromodel (Campbell dan Orr, 1985).	65
4.2	Lakaran proses penyesaran minyak oleh CO ₂ selepas 0.25 PVI sehingga 1.0 PVI di dalam mikromodel (Campbell dan Orr, 1985).	68
4.3	Lakaran suatu contoh fenomena terjadinya penghadangan air (water blocking) pada proses banjir CO ₂ . Air telah menutupi laluan minyak dan CO ₂ (Campbell dan Orr, 1985).	69
4.4	Lakaran fenomena proses penyesaran minyak dengan banjir CO ₂ busa (SAG) yang terdiri dari a. 0.43 PVI, b. 0.92 PVI, c. 1.93 PVI dan d. 3.0 PVI. Busa dapat mengawal mobiliti CO ₂ dalam menyesarkan minyak (Huh <i>et al.</i> , 1988).	71
4.5	Busa dalam media berliang yang ditunjukkan oleh adanya saluran gas yang berterusan, gas terperangkap dan lamella (Manlowe dan Radke, 1989).	72
4.6	Aliran busa di dalam media berliang dapat terjadi melalui aliran busa dengan gelembung-gelembung busa yang stabil dan aliran busa dengan gelembung-gelembung busa yang tidak stabil (Shah <i>et al.</i> , 1984).	73
4.7	Ilustrasi pergerakan gelembung busa di dalam media berliang yang berkaitan dengan tekanan rerambut yang menunjukkan konfigurasi dari gelembung-gelembung busa..... (Flumerfelt <i>et al.</i> 1988)	75
4.8	Hubungan antara kadar ricih dan tegasan ricih pada kualiti 95 % untuk pelbagai tetiub rerambut (Patton <i>et al.</i> , 1983).	80
4.9	Kesan kualiti busa terhadap mobiliti busa untuk ujikaji 3 jenis Ketertelapan udara yang berbeza (Marsden dan Khan, 1966).	82
4.10	Pengaruh kepekatan surfaktan pada mobiliti busa (Lee dan Heller, 1990).	84
4.11	Kesan ketertelapan batuan terhadap mobiliti busa (Tsau dan Heller, 1992).	86

4.12	Kesan ketepuan minyak terhadap komparatif mobiliti busa. Dengan meningkatnya ketepuan minyak dari 0.1 % hingga 30 %, maka akan meningkatkan mobiliti busa. Akan tetapi masih dibawah mobiliti CO ₂ (Manhardt <i>et al.</i> 1995).	88
4.13	Hubungan ketepuan minyak dengan kelikatan busa ketara. (Manhardt <i>et al.</i> 2000).	88
4.14	Agihan penggunaan halaju alir gas dari beberapa kajian terdahulu.	89
4.15	Hubungan antara halaju alir gas terhadap komparatif mobiliti busa (Yang dan Reed, 1989).	91
4.16	Kesan halaju alir gas terhadap mobiliti busa untuk pelbagai % CO ₂ -busa (kualiti busa) yang berbeza (Lee dan Heller, 1990).	92
4.17	Mekanisma pemutusan busa (Ransohoff dan Radke, 1988).	94
4.18	Mekanisma pemutusan busa (Rossen, 2000).	97
4.19	Mekanisma pembahagian busa (Ransohoff dan Radke, 1988).	98
4.20	Mekanisma pembahagian busa. Mekanisme ini terjadi bila busa berada dipersimpangan mulut liang dan busa yang akan keluar ini yang membahagi busa yang ada didepan (Shirley, 1988).	99
4.21	Mekanisma tertinggal di belakang (Ransohoff dan Radke, 1988).	100
4.22	Kesan tekanan rerambut pada cantuman busa (Khatib <i>et al.</i> 1988).	102
4.23	Mekanisma tindak balas antara busa dan minyak (Schramm <i>et al.</i> , 1990).	105
4.24	Fenomena Rebakan Minyak dengan Berbagai Keterbasahan batuan (a=tanpa serakan minyak, basah air, b.serakan minyak, basah air; c. serakan minyak, basah minyak.) (Dipetik daripada Kuhlman, <i>et al.</i> 1994).	106
4.25	Pelbagai jenis busa, a. kurang peka, b. cukup peka dan c. sangat peka terhadap minyak (Schramm dan Novosad, 1990).	107

4.26	Hubungan kepekaan busa dengan perolehan minyak (Schramm dan Novosad, 1990).	108
4.27	Gambar mekanisma tindak balas antara busa dan heksana Dari masa $t=0$ saat hingga $t=7.3 + 3/10$ saat (Manlowe dan Radke, 1990).	111
5.1	Skematik peralatan ujikaji durabiliti busa.	119
5.2	Model yang digunakan.	123
5.3	Skematik peralatan pengujian mikroskopik.	125
6.1	Kesan minyak (heksana) pada kestabilan busa di dalam tabung busa pada tekanan 1.51 psi dan masa 33.3 minit.	135
6.2	Penentuan kadar alir gas yang sesuai dalam menghasilkan kelajuan pembentukan busa. Terdapat 3 ujikaji menggunakan masing-masing kadar alir gas adalah 5, 10, dan 15 ml/minit.	138
6.3	Kesan jenis surfaktan terhadap kestabilan busa pada 1000 ppm NaCl.	139
6.4	Kesan campuran surfaktan pada kestabilan busa.	140
6.5	Kesan kemasinan pada kestabilan busa untuk AOS.	141
6.6	Kesan kemasinan pada kestabilan busa untuk SDBS.	142
6.7	Kesan komposisi elektrolit pada kestabilan busa untuk AOS.	143
6.8	Kesan komposisi elektrolit pada kestabilan busa untuk SDBS.	143
6.9	Kesan minyak pada kestabilan busa.	144
7.1	Contoh proses penyesaran CO_2 -busa pada kadar alir gas 0.01 ml/minit selepas 1.0 PVI.	147
7.2	Kesusutan tekanan lawan masa pada kadar alir gas 0.01 ml/minit.	148
7.3	Mekanisma aliran busa terjadi di dalam media berliang yang dirakam pada pita video untuk kadar alir gas 0.01 ml/minit. Busa yang terbentuk melalui cara pemutusan busa dan Cantuman sedut rerambut.	149
7.4	Mekanisma aliran di dalam media berliang dengan pemutusan busa pada kadar alir gas 0.01 ml/minit. Dari kedudukan 1 dan 2 menuju kedudukan 3, kemudian dari kedudukan 3 akan mengalir ke	

	kedudukan 4 dan 5	150
7.5	Mekanisma aliran busa di dalam media berliang dengan pemutusan busa dan resapan gas pada kadar alir gas 0.01 ml/minit.	151
7.6	Mekanisma aliran busa di dalam media berliang dengan pemutusan busa dan resapan gas pada kadar alir gas 0.01 ml/minit pada bahagian mahu keluar mikromodel.	152
7.7	Mekanisma aliran busa di dalam media berliang dengan pemutusan busa dan pembahagian pada kadar alir gas 0.01 ml/minit pada bahagian tengah mikromodel.	153
7.8	Mekanisma aliran busa di dalam media berliang dengan pemutusan busa pada kadar alir gas 0.01 ml/minit pada bahagian tengah mikromodel.	154
7.9	Mekanisma aliran busa di dalam media berliang pada bahagian tengah mikromodel dengan pemutusan busa, pembahagian dan cantuman busa pada kadar alir gas 0.01 ml/minit	155
7.10	Gambar fenomena kestabilan busa di dalam media berliang Selepas 1 dan 14 hari. Busa dapat bertahan pada masa tersebut dan tidak mengalami degradasi.	156
7.11	Contoh agihan busa dan larutan surfaktan di dalam mikromodel yang telah di banjiri oleh CO ₂ -busa pada kadar alir gas 0.01 ml/minit selepas 3.0 PVI.	157
7.12	Profil perbandingan pelbagai kadar alir gas terhadap kesusutan tekanan.	160
7.13	Mekanisma banjiran CO ₂ -minyak di dalam media berliang.	162
7.14	Busa diselimuti minyak (dekana) di dalam liang.	163
7.15	Mekanisma aliran busa-minyak di dalam liang.	165
7.16	Fenomena aliran busa-minyak dari satu liang badan ke liang badan lainnya.	166
7.17	Mekanisma aliran busa-minyak (heksana) dari satu liang badan ke liang badan lainnya.	169

7.18	Mekanisma aliran busa-minyak pada liang "dead end pore".	170
7.19	Agihan busa-minyak (heksana) dan larutan surfaktan di dalam media berliang selepas 3.0 PVI.	171
7.20	Mekanisma aliran busa-minyak (heksana) di dalam media berliang.	172
7.21	Agihan busa-minyak (dekana) dan larutan surfaktan di dalam media berliang selepas 3.0 PVI.	173
7.22	Pelbagai fenomena agihan busa-minyak (dekana) di dalam media berliang.	174
7.23	Agihan busa-minyak (iso oktana) dan larutan surfaktan di dalam media berliang selepas 3.0 PVI.	175
7.24	Mekanisma aliran busa-minyak (iso oktana) di dalam media berliang.	176
7.25	Agihan minyak Semangkok, busa dan larutan surfaktan selepas 3.0 PVI	177
7.26	Fenomena agihan busa, minyak Semangkok dan larutan surfaktan di dalam media berliang.	178
7.27	Kesan kadar aliran gas pada masa bolos dan dilengkapi mekanisme aliran busa yang boleh terjadi didalam media berliang.	183

SENARAI SIMBOL

ϕ	-	keliangan batuan, pecahan
λ	-	mobiliti bendalir, md/cp
τ	-	tegasan ricih,
λ	-	mobiliti, mD/cp
σ	-	tegangan antara permukaan, dyne/sm
v	-	halaju aliran bendalir, sm/saat.
μ	-	kelikatan bendalir, cp
μ	-	kelikatan busa, bila kadar ricih sebesar 1 saat ⁻¹
σ	-	tegangan antara permukaan, dyne/sm
$\Delta\rho$	-	beza ketumpatan antara minyak dan gas, gr/cc
λ_D	-	mobiliti bendalir penyesar, md/cp
μ_O	-	kelikatan minyak, cp
μ_D	-	kelikatan berkesan bendalir penyesar, cp
ΔL	-	beza panjang, sm
λ_o	-	mobiliti minyak, md/cp
ΔP	-	beza tekanan, psi
v_T	-	halaju aliran total, sm/saat.
A	-	luas reservoir, sm ²
A	-	luas keratan, sm ²
dt	-	perubahan masa, saat
dv/dr	-	kadar ricih.
dV_f	-	perubahan isipadu busa dari V_1 - V_2 , cc
g	-	percepatan graviti, sm/saat ² .

h	-	ketebalan lapisan, cm
k	-	ketertelapan batuan, md
k_D	-	ketertelapan berkesan bendalir penyesar, md
k_f	-	pemalar busa yang diperoleh daripada kecerunan graf antara tinggi busa (sm) dengan masa (saat).
k_f	-	pemalar busa
k_O	-	ketertelapan minyak, md
k_X	-	ketertelapan batuan dalam arah datar, md
L	-	panjang, sm
M	-	nisbah mobiliti, tanpa unit
MMP	-	Tekanan minimum larut campur, psia
n	-	indeks sifat aliran
N_c	-	nombor rerambut, tanpa unit
P	-	tekanan, psi
PVI	-	isipadu liang tersuntik, tanpa unit
Q	-	kadar alir, $sm^3/saat$
Q_i	-	kadar alir suntikan, cc/saat
r	-	jejari gelembung, sm
R	-	jejari gelembung besar, sm
t	-	masa, saat
T	-	suhu, $^{\circ}F$
$t_{1/2}$	-	waktu paruh, saat
V_f	-	isipadu busa, cc

SENARAI LAMPIRAN

LAMPIRAN	PERKARA	MUKA SURAT
A	Berbagai Kajian Busa Untuk Mengawal Mobiliti	221
B	Kajian Terkini Pengguna Busa Untuk Mengawal Mobiliti Gas Pada Banjiran CO ₂ -Busa	226
C	Ciri Surfaktan Yang Digunakan	233
D	Kaedah Ujikaji Pengujian Durabiliti Busa	236
E	Kertas Kerja Dan Simposium	244
F	Data Peribadi	246

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kaedah perolehan minyak tertingkat (EOR, enhanced oil recovery) bertujuan untuk meningkatkan prestasi perolehan minyak pada suatu lapangan minyak. Terdapat empat jenis kaedah perolehan tertingkat iaitu kaedah kimia, banjir termal, banjir gas dan suntikan mikrobial (Lake, 1989; Moritis, 1990). Salah satu kaedah banjir gas yang lazim digunakan ialah banjir CO₂ (Moritis, 1990; Hadlow, 1992).

Terdapat enam mekanisme yang bekerja dalam banjir CO₂ (Mungan, 1991), iaitu: (1). penurunan tegangan antara permukaan (IFT) menjadi sifar (larut campur) atau mendekati sifar (near miscible), (2). penurunan kelikatan minyak, (3). pengembangan minyak (oil swelling), (4). pengemulsian minyak, (5). penghembusan (blow down) dan (6). kesan rangsangan telaga (well stimulation). Huraian yang lebih rinci mengenai banjir CO₂ tersebut akan dijelaskan dalam BAB II.

Dalam proses penyerasan minyak oleh CO₂ terdapat beberapa faktor yang menentukan iaitu sifat batuan dan bendalir reservoir, kecondongan reservoir, tekanan reservoir, keheterogenan reservoir, ketertelapan relatif dan ketepuan minyak di dalam

formasi (Mungan, 1984, 1991). Untuk mendapatkan proses banjir CO₂ larut campur yang berkesan perlu ditentukan tekanan larut campur minimum yang nilainya amat dipengaruhi oleh graviti minyak, komposisi minyak dan suhu reservoir (Holm dan Josendal, 1982; Stalkup, 1983). Selain itu darjah keheterogenan reservoir (misalnya, ketertelapan batuan dan keheterogenan batuan) yang tinggi akan mengurangi keberkesanan proses penyesaran tersebut (Jarrel *et al.* 2002).

Pada pelaksanaan di lapangan, proses banjir CO₂ mempunyai kecekapan sapuan yang rendah iaitu sekitar 60% (Stalkup, 1983; Klins, 1984). Terdapat dua punca utama yang dapat menyebabkan ia mempunyai kecekapan sapuan yang rendah. Pertama, disebabkan oleh perbezaan antara mobiliti CO₂ dan mobiliti minyak yang begitu besar. CO₂ mempunyai kelikatan yang lebih rendah daripada kelikatan minyak, yang menjadikan nilai mobiliti CO₂ sangat tinggi dibandingkan dengan mobiliti minyak. Keadaan ini mengakibatkan terjadinya penjejarian likat (*viscous fingering*) yang dapat menyebabkan terjadinya masa bolos awal (*early breakthrough*). Fenomena penjejarian likat lebih ketara di dalam batuan reservoir yang heterogen (Stalkup, 1983; Christie, 1991). Kedua, CO₂ lebih cenderung untuk bergerak di bahagian atas reservoir. Hal ini disebabkan oleh nilai ketumpatan CO₂ yang lebih kecil daripada ketumpatan minyak. Akibatnya sebahagian besar CO₂ yang disuntikan akan mengalir ke bahagian atas reservoir. Kesan ini lebih dikenali sebagai kesan pemisahan graviti (Smaoui dan Gharbi, 2000).

Beberapa usaha telah dilakukan untuk meningkatkan kecekapan sapuan banjir CO₂. Terdapat dua kaedah yang popular iaitu kaedah suntikan air berselang seli dengan gas (*Water Alternated Gas, WAG*) dan suntikan surfaktan berselang seli dengan gas (*Surfactant Alternating Gas, SAG*). Dalam kaedah WAG, air disuntik berselang seli dengan CO₂ untuk tujuan mengawal mobiliti CO₂ (Hadlow, 1992; Martin dan Taber, 1992). Akan tetapi, Christensen, Stenbey dan Skauge (2001) yang melakukan evaluasi projek pada lapangan yang telah dilakukan kaedah WAG mendapati bahawa kaedah WAG banyak menimbulkan masalah. Di antara masalah utama yang dihadapi

adalah penghadangan oleh air (water blocking), sehingga ketepuan air terus meningkat di seluruh bahagian reservoir. Akibatnya CO₂ didapati kurang berkesan dalam menyesarkan minyak.

Selanjutnya di dalam kaedah SAG, larutan surfaktan disuntik berselang seli dengan CO₂ dengan tujuan untuk menghasilkan busa di dalam reservoir (Bernard *et al.* 1980; Martin *et al.* 1992). Di antara masalah yang dihadapi oleh SAG adalah jumlah kuantiti busa yang diperlukan dengan kualiti busa tertentu tidak mencukupi (terbentuk) di dalam reservoir ("foam bank"), sehingga busa didapati kurang berkesan di dalam menyesarkan minyak. Di samping itu busa tidak stabil pada keadaan reservoir (Dietz, 1985).

Beberapa kajian terdahulu telah mempelajari penggunaan busa untuk mengawal mobiliti CO₂ (Heller dan Taber, 1980; Grigg dan Schechter, 1996). Di antara faktor-faktor yang dapat mempengaruhi mobiliti busa tersebut adalah kualiti busa, kepekatan surfaktan, halaju alir gas, minyak dan ketertelapan batuan (Yaghoobi dan Heller, 1994; Chang dan Grigg, 1998; Mannhardt dan Svorstol, 2001). Di samping itu, kajian-kajian yang telah dilakukan pada projek rintis (Aarra *et al.* 1996; Chalbaud *et al.* 2002) dan pemantauan di lapangan (Hofner dan Evans, 1995; Blaker *et al.* 2002) menunjukkan bahawa proses banjiran CO₂-busa memberikan kesan positif dan memberi pulangan ekonomi. Akan tetapi, kebanyakan kajian-kajian tersebut dilakukan secara makroskopik ataupun megaskopik. Disamping itu, keputusan kajian tersebut tidak mampu untuk menjelaskan secara terperinci mengenai bagaimana busa dapat mengawal CO₂ dan mekanisma aliran busa yang sebenar terjadi di dalam media berliang.

Untuk dapat menjelaskan bagaimana mekanisma aliran busa itu terjadi di dalam media berliang, maka dilakukan kajian pada skala mikroskopik. Antara penyelidik yang telah menjalankan kajian tersebut adalah Huh *et al.* (1988), Owette dan Brigham (1988) dan Rossen (2000). Dalam kajian tersebut mereka menggunakan mikromodel

yang dibuat daripada kaca yang lut sinar. Kajian tersebut ditujukan untuk mendapatkan pemerhatian visual terhadap proses yang berlaku.

Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi mekanisma aliran busa adalah halaju alir gas. Kajian terdahulu telah dilaporkan oleh Huh *et al.* (1988) dan Chamber dan Radke (1991). Huh *et al.* (1988) dalam kajiannya menggunakan halaju alir gas tinggi yang berjulat antara 10 sehingga 120 kaki/hari mendapati bahawa mekanisma aliran busa yang terjadi adalah dengan cara *pemutusan busa*, *pembahagian busa* dan *cantuman sedutan rerambut*. Hal yang berbeza dijumpai oleh Chamber dan Radke (1991). Chamber dan Radke (1991) dalam kajiannya menggunakan halaju alir gas sebesar 43 kaki/hari mendapati bahawa mekanisma *pemusnahan busa* dengan *cantuman sedutan rerambut* dan *resapan gas* adalah sangat dominan. Di samping itu juga Chamber dan Radke (1991) mendapati adanya mekanisma *pemutusan busa* seperti yang dijumpai oleh Huh *et al.* (1988). Dari keputusan Huh *et al.* (1988) dan Chamber dan Radke (1991) yang menggunakan halaju alir gas di atas 1.0 kaki/hari, tetapi menghasilkan keputusan yang berbeza atau kurang pasti mengenai mekanisma aliran busa yang dominan. Hal ini dapat disebabkan oleh model media berliang yang berbeza digunakan oleh para penyelidik tadi.

Di samping persoalan tersebut di atas, kesan adanya minyak terhadap busa juga perlu kajian lanjut. Hal ini disebabkan adanya percanggahan keputusan sama ada minyak akan memusnahkan busa atau menjadikan busa lebih stabil. Beberapa kajian terdahulu telah mendapati bahawa minyak mempunyai kesan positif dan negatif terhadap busa (Nikolov *et al.*, 1986; Kuhlman (1990, 1994); Schramm *et al.*,1994). Sebagai contoh kajian Nikolov *et al.* (1986) mendapati bahawa busa akan musnah bila bersentuh dengan minyak. Hal yang sama dijumpai juga oleh Kuhlman (1990, 1994). Selanjutnya, hal yang berbeza ditemukan oleh Schramm *et al.* (1994) yang mendapati bahawa busa lebih stabil apabila bersentuh dengan minyak. Perbezaan keputusan tersebut mungkin disebabkan oleh jenis minyak dan ketepuan minyak yang digunakan berbeza. Untuk itu, kajian mengenai kesan tindak balas antara busa dan

minyak masih diperlukan untuk mengenalpasti adanya percanggahan tersebut di antara para penyelidik.

1.2 Objektif dan Skop Kajian

Objektif penyelidikan ini adalah untuk mempelajari mekanisma aliran busa yang terjadi di dalam media berliang dan kesan halaju alir gas terhadap mekanisma aliran busa pada proses penyesaran CO₂-busa. Di samping itu kajian awal turut mempelajari kajian durabiliti busa terdiri sebagai berikut : pemilihan kadar aliran gas, pemilihan jenis surfaktan dan pelbagai kesan (jenis surfaktan, campuran surfaktan, kemasinan, komposisi elektrolit dan minyak).

Skop kajian ini meliputi kesan halaju alir gas terhadap mekanisma aliran busa di dalam proses banjiran CO₂-busa. Untuk itu, berbagai halaju alir gas yang digunakan iaitu antara 0.0003 ($Nc=31.5 \times 10^{-5}$) sehingga 9.125 kaki/hari ($Nc=7.8 \times 10^{-1}$). Dengan menggunakan mikromodel (media berliang) diharapkan pengamatan visual akan mendapati fenomena mekanisma aliran busa dan tindak balas antara busa dan bendalir yang terjadi di dalam media berliang. Di samping itu juga dapat digunakan untuk membantu menjelaskan kaitannya fenomena mekanisma aliran busa yang terjadi dengan mobiliti busa.

1.3 Hipotesis Kajian

Dalam kajian ini akan dibuktikan bahawa mekanisma aliran busa yang terjadi di dalam media berliang didominasi oleh *pemutusan* busa (sebagai mekanisma pembentukan busa) dan *cantuman sedutan rerambut* busa (mekanisma pemusnahan busa) yang bergantung kepada halaju alir gas yang disuntikan. Terjadinya proses *pemutusan* busa berguna untuk memudahkan laluan kepada minyak dan juga mengawal

pergerakan gas dan air formasi di dalam media berliang. Selanjutnya mekanisma aliran busa dengan proses *cantuman sedutan rerambut* pula membantu meningkatkan kecekapan sapuan dalam menyasarkan minyak yang berada di hadapan. Di samping itu tindak balas antara minyak dan busa mempunyai kesan yang akan menyebabkan busa cenderung untuk tidak stabil (mudah musnah) di dalam media berliang. Selanjutnya dengan mengenal pasti mekanisma aliran busa dan tindak balas antara minyak dan busa yang terjadi di dalam media berliang tersebut, maka diharapkan aplikasi kaedah SAG di lapangan akan berjaya.

1.4 Organisasi Penulisan Tesis

Struktur organisasi penulisan tesis dapat dibahagi kepada 8 bab, dimana BAB I menjelaskan latar belakang kajian, objektif kajian, skop kajian dan hipotetis kajian. Selanjutnya pada BAB II membincangkan teori dasar mengenai banjir CO₂, manakala BAB III menjelaskan teori surfaktan, pencirian busa dan kestabilan busa. Selanjutnya BAB IV membincangkan kajian mikroskopik terdahulu mengenai mikromodel, mobiliti busa dan mekanisma aliran busa yang terjadi di dalam media berliang, peranan keterbasahan batuan pada kestabilan busa dan tindak balas antara busa dan minyak. Manakala pada BAB V menjelaskan kaedah kajian yang digunakan. BAB VI menerangkan kajian awal mengenai durabiliti busa. BAB VII menerangkan kajian mikroskopik mekanisma aliran busa di dalam media berliang. BABVIII adalah kesimpulan kajian dan cadangan penyelidikan lanjut selepas penyelidikan ini.

2. Kajian dilakukan pada keadaan reservoir dan membuat network dari mikromodel yang lebih menyerupai batu reservoir.
3. Membangunkan model matematik dalam peringkat liang (pore level modeling) daripada mekanisma aliran busa di dalam media berliang yang terdapat minyak, misalnya teori percolasi (Rossen, 1990), kaedah imbalan populasi (Kovsek dan Radke, 1994; Myers dan Radke, 2000).

RUJUKAN

- Adamson, A.W.(1982).” *Physical Chemistry of Surfaces.*” Fourth Edition, John Wiley & Sons, New York. USA. 478-486.
- Ahmad, S. (1989).”Pengenalan Kimia Koloid dan Kimia Permukaan.” Dewan Bahasa dan Pustaka, Selangor D.E. Malaysia.
- Aizad, T., and Okandan, E.(1977).”Flow Equation for Foam Flowing Through Porous Media and Its Application as a Secondary Recovery Fluid.” Paper SPE No.6599 presented at the Int. Symposium on Oilfield and Geothermal Chemistry held in La Jolla, CA, USA. June 27-28.
- Ali, J., Burley, R.W., Nutt, C.W. (1985).”Foam Enhanced Oil Recovery From Sand Packs.” *Chemical Engineering Resources Des.* Vol. 63, March 1985, 101-11.
- Alkan, H., Gortekin, A., and Satman, A.(1991).”A Laboratory Study of CO₂-Foam Process for Bati Raman Field, Turkey.” Paper SPE 21409 presented at the SPE Middle East Oil Show held in Bahrain, Nov. 16-19 617-28.
- Armitage, P. and Dawe, R.A.(1989).”What is the Rheology of Foam in Porous Media: A Micromodel Study.” Paper SPE 19495 presented at the SPE International and Symposium Oil Field and Chemistry, February.

- Armitage, P. and Dawe, R.A.(1990). "The Development of a Probabilistic Physical Model for Foam Generation by Snap off in Regular Grid Network Systems." Paper SPE/DOE 20217 presented at the SPE/DOE Seventh Symposium in EOR held in Tulsa, OK, April 22-25.
- Aronofsky, J.S.(1952). "Mobility Ratio- Its Influence on Flood Patterns During Water Enchroachment." *Petroleum Transactions AIME* no. 3221 Vol. 195 15-24.
- Aronson, A.S., Bergeron, M.F., Fagan, M.E. and Radke, C.J.(1994). "The Influence of Disjoining Pressure on Foam Stability and Flow in Porous Media." *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects* Elsevier Science B.V. 83 109-20.
- Bachu, S.(2001). "Screening and Ranking of Hydrocarbon Reservoir For CO₂ Storage in Alberta Basin, Canada." Personal Communications.
- Bahralolom, I., Bretz, R.E. and Orr, F.M. Jr.(1988). "Experimental Investigation of the Interaction of Phase Behavior with Microscopic Heterogeneity in a CO₂ flood." *SPE Reservoir Engineering*, May 662-672.
- Bahralolom, I.M. and Orr, F.M. Jr. (1988). "Solubility and Extraction in Multiple-Contact Miscible Displacement Comparison of N₂ and CO₂ Flow Visualization Experiments." *SPE Reservoir Engineering*, Feb. 213-219.
- Bardon, C.H. and Denoyelle, L."(1984). "CO₂ injection to Enhance Heavy Oil Recovery in "Heavy Crude Oil Recovery" by Ender Okandan (Editor). NATO ASI Series. Seri E. Applied Science No.76. 177-209.
- Baud, W. and Eastlund, B.(1994). "Electric Tubing Heater Improves Well Production in CO₂ Flood." *Oil and Gas Journal*. April, 18. 60-65.

- Bergeron, V., Hanssen, J.E., Shoughl, F.N.(1997).” Thin-Film Forces in Hydrocarbon Foam Films and Their Application to Gas Blocking Foams in Enhanced Oil Recovery.” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Eng. Aspects*. Elsevier Science B.V. Amsterdam, Vol. 123-124, 609-622.
- Bernard, G.G. and Holm, L.W.(1970).”Model Study of Foam as a Sealant For Leaks in Gas Storage Reservoirs.” *SPE Journal*. March, 9-15.
- Bernard, G.G. *et al.* (1965).”Effect of Foam on Trapped Gas Saturation and on Permeability of Porous Media to Water.” *SPE Journal*. Dec. 295-300.
- Bernard, G.G., Holm, L.M., and Harvey, C.P. (1980).”Use of Surfactants to Reduce Mobility Control in Oil Displacement.”*SPE Journal*. Aug. 281-92.
- Bikerman, J.J. (1965).” *Foams and Emulsions: Formation, Properties and Breakdown.*” in *Chemistry and Physics of Interfaces*, ACS, Publication Washington DC, Sydney Ross Edition ACS Publisher Washington DC, USA, 58-64.
- Bikerman, J.J. (1973). ”*Foams.*” New York. Springer-Verlag 62.
- Billiote, J., Moegen, H.D., and Oren, P.E.(1992).”Experimental Micro-modeling and Numerical Simulation of Gas/Water Injection/Withdrawal Cycles as Applied to Underground Gas Storage Reservoir.” Paper SPE 20765 in *SPE Advanced Technology Series*, Vol.1. No.1. pp 133-139.
- Blackwell, R.J. *et al.*(1959).” Factor Influencing the Efficiency of Miscible Displacement.” *Trans. AIME*. Vol. 216. 1-8.
- Blaker, T. *et al.*(2002).”Foam for Gas Mobility Control in the Snorre Field: FAWAG Project.” *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. August, 317-323.

- Boone, S.A. (1985). "CO₂ and H₂S Safety Regulation and Recommended Practices," Southerwestern Petroleum Assn. Short Course, Lubbock, Texas, 23-25 April.
- Bora, R., Maini, B.B. and Chakma, A.(2000). "Flow Visualization Studies of Solution Gas Drive in Heavy Oil reservoirs With a Glass Micromodel." *SPE Reservoir and Evaluation Engineering* 3(3), June. 224-229.
- Borchardt, *et al.* (1985). "Surfactant for CO₂ Foam Flooding." Paper SPE 14394 presented at the 60th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in Las Vegas. NV USA September 22-25.
- Bretz, R.E and Orr, F. M. Jr.(1986). " Interpretation of Miscible Displacement in Laboratory Cores." Paper SPE/DOE 14989 presented at the SPE/DOE Fifth Symposium on EOR of SPE and DOE held in Tulsa, OK USA. April 20-23.
- Brock, W.R. and Bryan, L. A. (1989). " Summary Results of CO₂, EOR Field Tests, 1972-1987," Paper SPE 18977 presented at the 1989 SPE Rocky Mountain Region/Low Permeability Reservoir Symposium EX, Denver, 6-8 March.
- Buckley, J.S. (1996). "Asphaltene and Crude Oil Wetting-The Effect of Oil Composition." Paper SPE/DOE 35366 presented at the 1996 SPE/DOE fifth Symposium on EOR held in Tulsa USA. April 21-24. 205-220.
- Buckley, J.S.(1993). "Asphaltene Precipitation and Crude Oil Wetting." Paper SPE no.26675 presented at the 68th ANTEX of SPE hold in Houston, Texas, USA October, 3-6, 729-741.
- Campbell, B.T. and Orr, F.M.(1985). " Flow Visualization for CO₂/Crude Oil Displacement." *SPE Journal*. Oct. 665-678.

- Casteel, J.F and Djabbrah, N.F.(1985).”Sweep Improvement in Carbon Dioxide Flooding Using Foaming Agents.” Paper SPE 14392 presented at the 60th Texas Vegas, NV, USA. September 22-25, 1-12.
- Caudle, B.H. and Dyes, A.B.(1958).” Improving Miscible Displacement by Gas –Water Injection.” Petroleum Transactions AIME no. 8038 Vol. 213.281-284.
- Chalbaut, C.A. *et al.* (2002).” Simulations Foam Process For A Venezuela and Pilot Test.” Paper SPE 77699 presented at SPE ANTEX held in San Antonio TX, 29- 2 Oct.
- Chambers, K.T. and Radke, C.J.(1991).”*Chapter 6: Capillary Phenomena in Foam Flow.*” in “*Interfacial Phenomena in Oil Recovery*” by N.R. Morrow (Editor) Marcel Dekker, New York USA. 191-255.
- Chang, S.H. and Grigg, R.B.(1998).”Effects of Foam Quality and Flow Rate on CO₂-Foam Behavior at Reservoir Conditions.” Paper SPE 39679 presented at the 1998 SPE/DOE Symposium on EOR held in Tulsa, OK USA. April 19-22, 265-75.
- Chang, S.H., Martin, F.D. and Grigg, R.B.(1994).”Effect of Pressure On CO₂ Foam Displacements : A Micromodel Visualization Study.” Paper SPE/DOE 27784 presented at the SPE/DOE Ninth Symposium on EOR of the SPE held in Tulsa, Oklahoma, April 17-20, 11-22.
- Chang, S.H., Owusu, L.A., French, S.B. and Kovarik, F.S.(1990).” The Effect of Microscopic Heterogeneity on CO₂-Foam Mobility: Part 2- Mechanistic Foam Simulation.” Paper SPE/DOE 20191 presented at the SPE/DOE Seventh Symposium on EOR held in Tulsa, Oklahoma, April 22-25, 185-98.

- Chatenever, A. and Calhoun, J.C, Jr.(1952)."Visual Examinations of Fluid Behavior in Porous Media-Part I." *Petroleum Transactions AIME* no. 3310 Vol.195, 149-156.
- Chatenever, A., Indra, M.K. and Kyte, J.R.(1959)."Microscopic Observation of Solution Gas Drive Behavior." *Journal Petroleum Technology*, June, 135-141.
- Chatzis, I. and Dullien, F.A.L, (1977)."Modelling Pore Structure By 2-D and 3-D Networks With Application to Sandstones." *Journal Canadian Petroleum Technology*, Montreal Canada Jan.-March, 97-107.
- Chiang, J.C. *et al.* (1986)."Foam as a Mobility Control Agent in Steam Injection Processes." Paper SPE 8912 presented at the 1980 California Regional Meeting, Los Angeles, April.
- Chou, S.I. (1991)." Conditions For Generating Foam in Porous Media." Paper SPE 22628 presented at the 66th ANTEX of the Society of Petroleum Engineers held in Dallas Texas.
- Chou, S.I. *et al.* (1992)." CO₂ Foam Field Trial at North Ward-Eates." Paper SPE 24643 presented at the 67th ANTEX of the Society of Petroleum Engineers held in Washington, D.C. October 4-7, 129-39.
- Christensen, J.R. Stenbey, E.H. and Skauge, A.(2001)." Review of WAG Field Experience." *Society Petroleum Engineering Reservoir Evaluation and Engineering*, April, 97-106.
- Dawe, R.A.(1990)."Reservoir Physics at Pore Scale." in *Seventy Five Years of Progress in Oil Field Science & Technology @ 1990*. Balkema. Rotterdam, 177-194.

- Dellinger, S.E., Patton, J.T., and Holbrook, S.T. (1984). "CO₂ Mobility Control." *Society Petroleum Engineer Journal*. April, 191-196.
- Di Julio, S.S and Emanuel, A.S.(1987). "Laboratory Study of Foaming Surfactant for Mobility Control." Paper SPE 16373 presented at the SPE California Regional Meeting held in Ventura, California, April 8-10.
- Dietz, D.N. *et al.*(1985). "Foamdrive Seldom Meaningful." *Journal Petroleum Technology*, May, 921-22.
- Dilgren, R.E., *et al.*(1982). "The Laboratory Development and Field Testing of Steam/Noncondensable Gas Foams for Mobility Control in Heavy Oil Recovery." Paper SPE 10774 presented at SPE California Regional Meeting, San Francisco, CA, March 24-26, 591-01.
- Duerksen, J.H.(1986). "Laboratory Study of Foaming Surfactant as Steam-Diverting Additives." *SPE Reservoir Engineering*, January 44-52.
- Ettinger, R.A and Radke, C.J. (1992). "Influence of Texture on Steady Foam Flow in Berea Sandstone." *SPE Reservoir Engineering*, Feb.83-90.
- Falls, A.H *et al.*(1989). "The Apparent Viscosity of Foams in Homogeneous Bead Pack." *SPE Reservoir Engineering*, May.155-64.
- Falls, A.H. *et al.* (1988). "Development of a Mechanistic Foam Simulator: The Population Balance and Generation by Snap-Off." *SPE Reservoir Engineering*, August. 884-892.
- Farouk Ali, S.M and Selby, R.J.(1986). "Function, Characteristics of EOR Foam Behavior Covered in Laboratory Investigation." *Oil Gas Journals* Feb. 3, 57-63.

- Fleming, E.A., Brown, L.M. and Cook, R.L.(1992).” Overview of Production Engineering Aspects of Operating The Denver Unit CO₂ Flood.” Paper SPE/DOE 24157 presented at the SPE/DOE Eight Symposium on EOR held in Tulsa, OK, April 22-24.
- Fox, C.E., Cooper, J.C., Ward, J.B. and Anderson, S.R.(1996).” Improved Technology and Field Application Profits Back to CO₂ EOR.” *JPT*. March. 200-202.
- Friedman, F. and Jensen, J.A. (1986).”Some Parameters Influencing the Formation and Propagation of Foam in Porous Media.” Paper SPE 15087 presented at the 56th California Regional Meeting of SPE, Oakland, C.A., April 2-4, 441-53.
- Friedman, F., Chen, W.H., and Gaultitz, P.A.(1991).”Experimental and Simulation Study of High Temperature Foam Displacement in Porous Media.” *SPE Reservoir Engineering*, Feb. 37-45.
- Gdanks, R.D. (1993).” Experience and Research Show Best Designs For Foam Diverted Acidizing.” *Oil and Gas Journal*, Sept. 6, 85-89.
- Green, D.W. and Willhite, G.P.(1998).”Chapter 5-Mobility Control Process.” in *Enhanced Oil Recovery*, Society Petroleum Engineering Richardson Texas, USA. 100-185.
- Grigg, R.B. and Schechter, D.S.(1996).”Improved Efficiency Of Miscible CO₂ Floods and Enhanced Prospects For CO₂ Flooding Heterogeneous Reservoirs.” Quarterly Technical Progress Report DOE Contract no. DE-FG22-94BC14977 New Mexico PRRC. Oct.-Dec.
- Grigg, R.B. and Schechter, D.S.(1996).”Improved Efficiency Of Miscible CO₂ Floods and Enhanced Prospects For CO₂ Flooding Heterogeneous Reservoirs.” Quarterly Technical Progress Report DOE Contract no. DE-FG22-94BC14977 New Mexico PRRC. Jun.-Sept.

Grigg, R.B. and Schechter, D.S.(1997).” State of Industry in CO₂ Floods.” Paper SPE 38849 presented at the 1997 ANTEX, San Antonio, Texas, Oct.5-8.

Habermann, B.(1960).” The Efficiency of Miscible Displacement as a Function of Mobility Ratio.” Petroleum Transactions AIME no. 8132 vol. **219**. 264-72.

Hadlow, R.E.(1992).”Update of Industry Experience With CO₂ Injection.” Paper SPE 24928 presented at ANTEX of SPE hold in Washington DC. Oct. 4-7. 743-752.

Haghighi, M., Xu,B. and Yortsos, Y.C.(1994).”Visualization and Simulation of Immiscible Displacement in Fractured Systems Using Micromodels : I. Drainage.” *Journal of Colloid and Interface Science*, Elsevier Science B.V vol.**166**. 168-179.

Hanssen, J.E. and Dalland, M.(1990).”Foams Effective Gas Blockage in The Presence of Crude Oil at Reservoir Temperature.” Paper SPE/DOE 20193 presented at 7th SPE/DOE Symposium EOR, Tulsa OK.

Hanssen, J.E.(1988). .”New Method for Testing of Gas-Blocking Foams.” Paper SPE/DOE 17362 presented at the SPE/DOE Symposium on EOR of the SPE held in Tulsa, Oklahoma, April 17-20.

Hanssen, J.E.(1993).” Foam a Gas Blocking Agent in Petroleum Reservoir II: Mechanism of Gas Blockage by Foam.” *Journal Petroleum Engineering and Science*, Elsevier B.V. Nederland, 135-136.

Hanssen, J.E., Holt, T., and Surguchev, L.M.(1994).” Foam processes: An Assessment of Their Potential in North Sea Reservoirs Based on a Critical Evaluation of Current Field Experience.” Paper SPE/DOE no.27768 presented at the

SPE/DOE Ninth Symposium on IOR held in Tulsa, OK, 17-20 April, 361-76.

Hazlett, R.D and Furr, J.M.(2000).” Percolation Model for Permeability Reduction in Porous Media by Continuous-Gas Foams.” *Industrial Engineering Chemical Resources*, Elsevier Science B.V **39**, 2709-2716.

Heller, J.P *et al.*(1985a).” Field Test of CO₂ Mobility Control.” Paper SPE 14395 presented at the 60th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in Las Vegas. NV September 22-25.

Heller, J.P. and Taber, J.J.(1980).”Mobility Control For CO₂ Floods- A Literature Survey.” Topical Report Work Performed Under Contract No. DE-AC21079 MC10689 New Mexico Institute of Mining and Technology Socorro, New Mexico. USA. October.

Heller, J.P.(1994).” *Chapter 5 : CO₂ Foams Flooding in Enhanced Oil Recovery in Foams: Fundamental & Application in Petroleum Industry.*” by Schramm L.L (Editor), American Chemical Society. Washington D.C. 201-234.

Heller, J.P., Boone, D.A. and Watts, R.J. (1985b).” Testing CO₂ – Foam for Mobility Control at Rock Creek.” Paper SPE no. 14519 presented at the 60th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in Las Vegas. NV September 22-25.

Heller, J.P., Lien, C.L., and Kuntamukkula, M.S. (1985c).”Foamlike Dispersions for Mobility Control in CO₂ Floods.” *SPE Journal*. August. 603-613.

Hirasaki, G.J. and Lawson, J.B.(1985).” Mechanisms of Foam Flow in Porous Media: Apparent Viscosity in Smooth Capillaries.” *SPE Journal*. April,176-190.

- Hirasaki, G.J.(1989)."The Steam-Foam Process." *Journal Petroleum Technology*, May. 449-456.
- Hoefner, M.L. and Evans, E.M. (1995)." CO₂ Foam: Results From Four Developmental Field Trials." *SPE Reservoir Engineering*, Nov. 273-81.
- Holbrook, S.T. *et al.*(1981)."Rheology of Mobility Control Foams." Paper SPE/DOE 9809 presented at the SPE/DOE second Joint Symposium on EOR of the SPE held in Tulsa, Oklahoma, April 5-8.
- Holm, L.M. and Garrison, W.H.(1986)."CO₂ Diversion Using Foam in an Immiscible CO₂ Field Project." Paper SPE/DOE 14963 presented at the SPE/DOE Fifth Symposium on EOR of the SPE and DOE held in Tulsa, OK, April 20-23. 497-08.
- Holm, L.W. (1968)."The Mechanism of Gas and Liquid Flow Through Porous Media in the Presence of Foam." *SPE Journal*. Dec.359-369.
- Holm, L.W. and Josendal, V.A. (1974)." Mechanism of Oil Displacement by Carbon Dioxide." *Journal Petroleum Technology*. Dec. 1427-1438.
- Holm, L.W.(1970)."Foam Injection Test in The Siggins Field, Illionis." *Journal Petroleum Technology*. Dec. 1499-1506.
- Holt, T., Vasenden, F. and Svorstøl, I.(1996)." Effects of Pressure on Foam Stability: Implications for Foam Screening." Paper SPE 35398 presented at the 1996 SPE/DOE Tenth Symposium on IOR held in Tulsa, OK. April 21-24. 543-52.
- Hornbrook, J.W., Castanier, L.M., Pettit, P.A.(1991)."Observation of Foam/Oil Interactions in a New High –Resolution Micromodel." Paper SPE 22631

presented at the 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in Dallas, TX. Oct 6-8, 377-82.

Hornof, V. and Morrow, N.R.(1988) .”Flow Visualization of the Effects of Interfacial Tension on Displacement.” *SPE Reservoir Engineering*, Feb. 251-256.

Hornof, V.. and Morrow, N.R.(1987).” Gravity Effects in The Displacement of Oil By Surfactant Solutions.” *SPE Reservoir Engineering*, Nov. 627-633.

Horton, R.L. *et al.* (1995).” An Objective Rapid Screening Tool For Surfactant Used in Foamlike Dispersions of CO₂ in Permian Basin Brines.” Paper SPE 29003, SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in San Antonio, TX, USA. Feb. 14-17. 629-647.

Huang, E.T. S. and Holm, L.W.(1988).” Effect of WAG Injection and Rock Wettability on Oil Recovery During CO₂ Flooding.” *SPE Reservoir Engineering*, 119-129.

Huh, D.G. and Handy, L.L.(1986) .”Comparison of Steady and Unsteady State Flow of Gas and Foaming Solution in Porous Media.” Paper SPE 15078 presented at the 1986 California Regional Meeting, Oakland, USA. April 2-4, 351-62.

Huh, D.G., Cochrane, and Kovarik, F.S(1988).”The Effect of Microscopic Heterogeneity on CO₂/Foam Mobility: Part-A Mechanistic Study.” Paper SPE/DOE 17359 presented at the SPE/DOE Symposium on EOR of the SPE held in Tulsa, Oklahoma, April 17-20, 413-431.

Hutchinson, D.A., Demiral, B.D.M. and Castanier, L.(1992).”Steam Foam Studies in the Presence of Residual Oil.” Paper SPE 23709 presented at the Second Latin American Petroleum Engineer Conference, II LAPEC, of the Society of Petroleum Engineers held in Caracas, Venezuela, March 8-11, 205-9.

- Iglesias, E., Anderez, J., Forgiarini, A. and Salager, J.L. "A New Method To Estimate The Stability Of Short-Life Foams." *Colloids and surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* Elsevier Science BV 98 167-174.
- Ihsan. A., Sugiarmo, Idris, A.K. (1997). "The CO₂ Flooding : Prospect and Challenges on Malaysian Oil Field." RESPECT, Hotel Hyatt, Johor Bahru, 14-17 Oct.
- Isaacs, E.E. *et al.* (1988). "Investigation of Foam Stability in Porous Media at Elevated Temperatures." *SPE Reservoir Engineering*, May, 565-572.
- Islam, M.R. Selby, R.J. and Ali, F.(1989). "Mechanics of Foam Flow in Porous Media and Applications." *Journal Petroleum Canadian Technology*, 88-96.
- Iyoho, A.W.(1977). "Selecting Enhanced Oil Recovery Processes." *World Oil* November 61-64.
- Jarrell, P.M., Fox, C.E., and Stein, M.H., and Webb, S.L.(2002). "The Practical Aspects of CO₂ Flooding". SPE Monograph no.22. SPE Henry L. Doherty Series. Richardson, Texas.
- Jensen, J.A. and Friedman, F. (1987). "Physical and Chemical Effects of an Oil Phase on the Propagation of Foam in Porous Media." Paper SPE 17375 presented at the SPE California regional Meeting held in Ventura, California, April 8-10, 473-85.
- Jikich, S.A.(1995). "Surfactant Based Mobility Control With CO₂ Foams." PhD Dissertations University of Wyoming, December.
- Jonas, T.M, Chou, S.L., and Vasicek, S.I.(1990). "Evaluation of a CO₂ Foam Field Trial- Rangely Weber Sand Unit." Paper SPE 20468 presented at the 65th

- Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in New Orleans, LA, Sept.23-26.
- Kanda, M. and Schechter, R.S. (1976)."On the Mechanism of Foam Formation in Porous Media ." Paper SPE 6200 presented at the SPE ANTEX held in New Orleans, Oct. 3-6.
- Kharabaf, H. and Yortsos, Y.C.(1996)."A Pore-Network Model For Foam Formation And Propagation in Porous Media." Paper SPE 36663 presented at the SPE ANTEX held in Denver, CO. Oct. 7-9, 779-790.
- Khatib, *et al.* (1988)."Effect of Capillary Pressure on Coalescence and Phase Mobilities in Foams Flowing Through Porous Media." *SPE Reservoir Engineering*, Aug. 919-25.
- Klins, M. A.(1984)."Carbon Dioxide Flooding: Basic Mechanism and Project Design." International Human Resources Development Corporation (IHRDC) Boston, Massachusetts, USA, 59-65.
- Klins, M.A. and Bordon, C.P.(1991)." Carbon Dioxide Flooding" in "*Basic Concepts in Enhanced Oil Recovery Processes*" by Baviere M.(Editor) SCI Critical Reports on Applied Chemistry Vol. **33**. New York 215-240.
- Koczo, K., Lobi, L.A., and Wasan, D.T.(1991)."Effect of Oil on Foam Stability: Aqueous Foams Stabilized by Emulsions." *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol.**150**, No.2, May, 492-506.
- Kovsek, A.R. and Radke, C.J.(1994)."Chapter 3: Fundamental of Foam Transport In Porous Media" in *Foams : Fundamentals and Application in Petroleum Industry*. Schramm L.L. ed. ACS Advances in Chemistry Series, Vol.242, Am. Chemical Soc.,Washington, D.C, 115-163.

- Kovsek, A.R. and Radke, C.J.(1996).” Gas Bubble Snap-off Under Pressure-Driven Flow in Constricted Noncircular Capillaries.” *Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects* Elsevier Science B.V. 55-76.
- Kuehne, D.L *et al.* (1992).” Evaluation of Surfactants for CO₂ Mobility Control in Dolomite Reservoirs.” Paper SPE/DOE 24177 presented at the SPE/DOE Eight Symposium on EOR held in Tulsa, Oklahoma, April 22-24, 215-24.
- Kuhlman, M.I. *et al.*(1994).”Gas/Oil Lamellae and Surfactant Propagation in the Oil in Carbon Dioxide Foam.” Paper SPE/DOE 27788 presented at the SPE/DOE Ninth Symposium on Improved Oil Recovery held in Tulsa, OK, USA., April 17-20, 57-70.
- Kuhlman, M.I.(1990).”Visualizing the Effect of Light Oil on CO₂ Foams.” *Journal Petroleum Technology*, July, 902-908.
- Kuhlman, M.I., Falls, A.H., Hara, S. K., Mc Clure, M., and Borhardt, J. K. (1992).”CO₂ Foam with Surfactants Used Below Their Critical Micelle Concentrations.” *SPE Reservoir Engineering*, Nov. 445- 452.
- Lake, L.W. (1989).” *Enhanced Oil Recovery*.” Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- Lau, H.C. and O’Brien, S.M.(1988).”Effects of Spreading and Non Spreading Oils on Foam Propagation Through Porous Media.” *SPE Reservoir Engineering*, 893-96.
- Law, D.H.S, Yang, Z.M. and Stone, T.W.(1992).”Effect of the Presence of Oil on Foam Performance: A Field Simulation Study.” *SPE Reservoir Engineering*, 228-36.

- Lee, O. H. and Heller, J.P.(1989).” *Chapter 27 : Mobility CO₂ and Surfactant Adsorption in Porous Rocks.*” in *Oil-Field Chemistry : Enhanced Recovery and Production Stimulation* by Borchardt J.K and Yen. T.F. Editors. ACS Symposium Series No.396, 502-517.
- Lee, O.H. and Heller, P.(1990).”Laboratory Measurements of - Foam Mobility.” *SPE Reservoir Engineering*, May, 193-197.
- Lee, O.H., Heller, J.P. and Hoeffler, A.M.W. (1991).” Change in Apparent Viscosity of CO₂ Foam With Rock Permeability.” *SPE Reservoir Engineering*, Nov. pp, 421-428.
- Lescure, B.M and Claridge, E.L(1986).”CO₂ Foam Flooding Performance vs. Rock Wettability.” Paper SPE 15445 presented at the 61st ANTEX of the SPE held in New Orleans, LA, 5-8 October.
- Li, Y., and Wardlaw, N.C.(1986).” Mechanism of Non Wetting Phase Trapping During Imbibition at Slow Rates.” *Journal of Colloids and Interface Science*, **109**, No. 2, February, 473-86.
- Li, Y., and Wardlaw, N.C.(1986).” The Influence of Wettability and Critical Pore - Throat Size Ratio on Snap-off.” *Journal of Colloids and Interface Science*, **109**, no.2, February, 461-72.
- Ling, T.F., Lee, H.K. and Shah, D.O.(1986).”*Surfactant in Enhanced Oil Recovery.*” In “*Industrial Applications Of Surfactant*” by Karsa. D.R.(Ed). Royal Soc. Chemistry. London, UK. 126-178.

- Lucassen, J.(1981).”*Dynamic Properties of Free Liquid Films and Foam.*” in *Anionic Surfactants-Physical Chemistry of Surfactant Action* (Ed. Lucassen-Rynders), Marcel-Dekker, New York, 1981, 217-263.
- Ma, T.D., Rutgers, J.A., and Stoisits, R.F.”(1995).” Simultaneous Water and Gas Injection Pilot at the Kuparuk River Field, Reservoir Impact.” Paper SPE30726 presented at the 1995 SPE ANTEX, Dallas, USA. October 22-25.
- Maini, B.B. and Ma, V.(1984).”Relationship Between Foam Stability Measured in Static Tests and Flow Behavior of Foam in Porous Media.” Paper SPE 13073 presented at the 59th ANTEX, Houston Texas, Sept.16-19.
- Maini, B.B. and Ma, V.(1986).”Laboratory Evaluation of Foaming Agents for High-Temperature Applications-I. Measurements of Foam Stability at Elevated Temperatures and Pressures.” *Journal Petroleum Canadian Technology*, Nov.-Dec. 65-69.
- Manlowe, D.J. and Radke, C.J.(1990) .” A Pore-Level Investigation of Foam/Oil Interactions in Porous Media.” *SPE Reservoir Engineering*, Nov, 495-502.
- Mannhardt, K. and Svortol, I. (1999).” Effect of Oil Saturation on Foam Propagation in Snorre Reservoir Core.” *Journal Petroleum Science and Engineering* 23, 189-200.
- Mannhardt, K. Novosad, J.J. and Schramm, L.L.(1996).” Core flood Evaluation of Hydrocarbon Solvent Foam.” *Journal of Petroleum Science and Engineering* 14, 183-195.

- Mannhardt, K. Novosad, J.J. and Schramm, L.L.(1998)."Foam/oil Interactions at Reservoir Conditions." Paper SPE 39681 presented at the 1998 SPE/DOE IOR Symposium held in Tulsa, OK, April 19-22. 287-300.
- Mannhardt, K. Novosad, J.J. and Schramm, L.L.(2000)."Comparative Evaluation of Foam Stability to Oil." *SPE Reservoir and Evaluation Engineering*, 3(1), February, 23-34.
- Marsden, S.S and Khan, S.A. (1966)."The Flow of Foam Through Short Porous Media And Apparent Viscosity Measurements." *SPE Journal*. March 17-25.
- Marsden, S.S.(1986)."Foams in Porous Media" Topical Report, National Petroleum Technology Office, U.S Department of Energy, Tulsa Oklahoma, July, 1-24.
- Martin, F.D. and Taber, J.J.(1992)." Carbon Dioxide Flooding." *Journal Petroleum Technology*, April, 396-400.
- Martin, F.D. *et al.* (1992)."CO₂-Foam Field Verification Pilot Test at EVGSAU Injection Project Phase I: Project Planning and Initial Results." Paper SPE/DOE 24176, presented at Eight SPE/DOE Symposium on EOR, Tulsa, OK April 22-24. 201-13.
- Martin, F.D., Stevens, J.E., and Harpole, K.J. (1995)."CO₂-Foam Field Test at the East Vacuum Grayburg/San Andres Unit." *SPE Reservoir Engineering*, Nov, 266-72.
- Mast, R.F.(1972)."Microscopic Behavior of Foam in Porous Media." Paper SPE. 3997 presented at the 47th Annual Fall Meeting of the SPE of AIME held in San Antonio, Texas, 8-11 October, 1-11.

- Mc Ree, B.C.(1977).” CO₂, How it Works, Where it Works.” *Petroleum Engineer International*, Nov.
- Mc. Kellar, M. and Wardlaw, N.C.(1982).”A Method of Making Two-Dimensional Glass Micromodels of Pore Systems.” *Journal Canadian Petroleum Technology*, July-August Montreal Canada. 39-41.
- Minssieux, L. (1974).”Oil Displacement by Foams in Relation to Their Physical Properties in Porous Media.” *Journal Petroleum Technology*, Jan. 100-08.
- Moritis, G. (1990).”CO₂ and HC Injection Lead EOR Production Increase.” *Oil and Gas Journal*. April 23, 49-82.
- Moritis, G. (1996).” New Technology, Improved Economics Boost EOR Hopes.” *Oil and Gas Journal Special*, 43-64.
- Moritis, G. (1998).”EOR Oil Production up Slightly.” *Oil and Gas Journal*. Vol. 96, No. 16, April 20, 49-77.
- Morrow, N.R.(1986):.”Effect of Crude -Oil-Induced Wettability Changes on Oil Recovery.” *SPE Formation Evaluation*, February 311-326.
- Mungan, N. R. (1991).”An Evaluation of Carbon Dioxide Flooding.” Paper SPE 21762 presented SPE Western Regional Meeting held in Long Beach, California USA. March 20-22, 113-122.
- Mungan, N. R.1984).” Carbon Dioxide Flooding-Fundamentals.” in “*Heavy Crude Oil Recovery*” by Ender Okandan (Editor). NATO ASI Series. Seri E. Applied Science No.76. 131-176.

- Myers, D.(1991).” *Surfaces, Interfaces, and Colloids.*” VCH publisher, New York. 251-270.
- Myers, T. and Radke, C.T.(2000).” Transient Foam Displacement in the Presence of Residual Oil: Experiment and Simulation Using a Population - Balance Model.” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **39**, 2725-2741.
- Nahid, B.H.(1971).”*Non- Darcy Flow of Gas Through Porous Media in The Presence Of Surface active Agents.*” PhD Dissertations University of Southern California, January.
- Nguyen, Q.P., Alexandrov, A.V., Zitha. P.L. and Currie, P.K. (2000). ”Experimental and Modeling Studies on Foam in Porous Media: A Review.” Paper SPE 58799 presented at the 2000 SPE International Symposium on Formation Damage Control held in Lafayette USA. February. 23-24, 1-22.
- Nguyen, Q.P., Zitha. P.L. and Currie, P.K. (2002).” Effect of Foam Film Gas Diffusions.” *Journal Colloid and Interface Science*, Vol. 248, Issue 2 April, 467-476.
- Nikolov, A.D. *et al.* (1986).”The Effect of Oil on Foam Stability: Mechanism and Implications for Oil Displacement by Foam in Porous Media.” Paper SPE 15443 presented at the 1986 SPE ANTEX, New Orleans USA. Oct. 5-8, 1-16.
- Novosad, J.J., Mannhardt, K. and Rendall, A. (1989).”The Interaction Between Foam and Crude Oils.” Paper No. 89-40-29 presented at the 40th Annual Technical Meeting Petroleum Society of CIM Hold in Banff, Canada, .May 28-31, 1-15.

- Oren, P.E. and Pinczewski, W.V.(1992).” The Effect of Wettability and Spreading Coefficients on The Recovery of Waterflood Residual Oil by Miscible Gas Flooding.” Paper SPE 24881 presented at 67th ANTEX at SPE held in Washington DC USA. October 4-7.
- Oren, P.E., Billiotte, J. and Pinczewski, W.V.(1992).” Mobilization of Waterflood Residual Oil by Gas Injection For Water-Wet Conditions.” *SPE Formation Evaluation*, March, 70-78.
- Owens, W.W. and Archer, D.L. (1971).” The Effect of Rock Wettability on Oil- Water Relative Permability Relationship.” *Journal Petroleum Technology*, July. 873-878.
- Owete, O.S., and Brigham, W.E. (1987).”Flow Behavior of Foam: A Porous Micromodel Study.” *SPE Reservoir Engineering*, August 315-323.
- Patton, *et al.*(1983).” Rheology of Mobility Control Foams.” *SPE Journal*. June, 456-60.
- Persoff, P., Radke, C.J., Pruess, K., Benson, S.M. and Whitterspoon, P.A.(1991).”A Laboratory Investigation of Foam Flow in Sandstone at Elevated Pressure.” *SPE Reservoir Engineering*, August, 365-72.
- Prieditis, J. and Paulett, G. S. (1992).” CO₂- Foam Mobility Test at Reservoir Conditions in San Andreas Cores.” Paper SPE /DOE no. 24178 presented at the SPE/DOE Eight Symposium on EOR held in Tulsa, OK USA. April 22-24.
- Prieditis, J.(1988).”A Pore Level Investigation of Foam Flow Behavior in Porous Media.” PhD Dissertation, University of Houston.
- Pulmann-Kellogg (1978).” Sources and Delivery of CO₂ for EOR.” DOE Report FE-2515-24, Wasington DC USA.

- Rand, P.B. and Kraynik, A.M.(1983).” Drainage of Aqueous Foams: Generation Pressure and Cell-Size Effects.” *SPE Journal*, February, 152-54.
- Ransohoff, T.C and Radke, C.J.,(1988).”Mechanisms of Foam Generation in Glass Bead Packs.” *SPE Reservoir Engineering*, May, 573-584.
- Ransohoff, T.C., Gaulitz, P. A. and Radke, C.J.(1987).” Snap-off of Gas Bubbles in Smoothly Constricted Noncircular Capillaries.” *AICHE Journal*. **33**, No.5. May, 753-65.
- Ratermann, K.T. (1989).” An Investigation of Oil Destabilization of Nitrogen Foams in Porous Media.” Paper SPE 19692 presented at the 64th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE held in San Antonio, TX, USA. Oct. 8-11, 645-655.
- Raza, S.H. (1970).”Foams in Porous Media: Characteristic and Potential Applications.” *SPE Journal*. Dec. 328-336.
- Robie, D.R. Jr., Roedell, J.W., and Wackowski, R.K.(1995).”Field Trial of Simultaneous Injection of CO₂ and Water, Rangely Weber Sand Unit, Colorado.” Paper SPE 29521 presented at the 1995 SPE Production Operations Symposium, Oklahoma City, OK, April 2-4.
- Rogers, J.D. and Grigg, R.B.(2001).” A Literature Analysis of the WAG Injectivity Abnormalities in the CO₂ Process.” *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*, 375-386.
- Roof, J.G. (1970).” Snap-off of Oil Droplets in Water Wet Pores.” *SPE Journal*. March, 85-90.

- Rosen, M.J. (1989).” *Surfactant and Interfacial Phenomena.*” 2nd Edition, John Wiley – Son, N. Y. 55-56.
- Rossen W.R.(1996).”*Chapter 11: Foams in Enhanced Oil Recovery.*” In *Foams-Theory, Measurements, and Application.*” by Prud’homme, R.K and Saad A.Khan (Editors), Marcel Dekker, Inc. New York. 413-457.
- Rossen, W.R. and Gaulitz, P.A.(1990).”Percolation Theory of Creation and Mobilization of Foams in Porous Media.” *AICHE Journal.* Vol. 36, 8, August, 1176-1187.
- Rossen, W.R.(1999).”Foam Generation at Layer Boundaries in Porous Media.” *SPE Journal.* Dec. 4. 409-412.
- Rossen, W.R.(2000).” Snap off in Constricted Tubes and Porous Media.” *Colloid and Surfaces: A Physicochemical and Aspects*, **166**. 101-107.
- Sanches, J.M and Hazlett. R.D. (1992).”Foam Flow Through an Oil-Wet Porous Medium : A Laboratory Study.” *SPE Reservoir Engineering*, Feb. 91- 97.
- Sarathi, P.(1986).” Using Micromodel to Study Steam Displacement Processes in Porous Media.” Contract No. Niper-180-US. DOE, August.
- Schramm, L.L and Mannhardt, K.(1996).”The Effect of Wettability on Foam Sensitivity to Crude Oil in Porous Media.” *Journal Petroleum Science and Engineering*,**15**, 101-113.
- Schramm, L.L and Novosad, J.J. (1990).” Micro-Visualization of Foam Interaction with Crude Oil.” *Colloid and Surfaces*, **46**, 21-43.
- Schramm, L.L and Novosad, J.J. (1992).” The Destabilization of Foams for Improved Oil Recovery by Crude Oils: Effects of Nature of the Oil.” *Journal Petroleum Science and Engineering*, **7**. 77-90.

Schramm, L.L. and Marangoni, D.G.(2000).” *Chapter I: Surfactants and Their Solution: Basic Principles.*” in “*Surfactants : Fundamentals and Applications in Petroleum Industry*” by Schramm. L.L.(Editor). Cambridge University Press, UK, 3-50.

Schramm, L.L., Editor (1994). ”*Foams: Fundamentals and Applications in Petroleum Industries.*” ACS Symposium Series no.242, Washington DC USA.

Schramm, L.L., Turta, A.T., and Novosad, J.J.(1993).”Microvisual and Coreflood Studies of Foam Interactions with a Light Crude Oil.” *SPE Reservoir Engineering*, August, 201-06.

Senol, T. N.N. (1998).” CO₂ Mobility Control by Foam at Bati Raman Heavy Oilfield-Laboratory Test on Mobility Reduction and Oil Recovery.” Paper SPE no. 39651 presented at the 1998 SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium held in Tulsa, OK, USA. April19-22. 473-481.

Shah *et al.* (1984) Formation Foam.” Paper Presented at 1984 Seminar Foam, Jackson Hole, WY, August, 12-17.

Shah *et al.* (1984). Paper presented at 1984 Formation Foam, Jackson Hole, W Y August 12-17.

Sharma, M.K., Shah, D., and Brigham, W.E.(1986).” Effect of Mixed-Chain -Length Surfactants on Fluid Displacement in Porous Media by In-Situ Foaming Process.” *SPE Reservoir Engineering*, May. 253-60.

Shaw, D.J. (1992).” *Introduction to Colloid and Surface Chemistry.*” 4th Edition Butterworth, Heineman Oxford, UK.

- Shirley, A.I. (1988). "Foam Formation in Porous Media: A Microscopic Visual Study." in "Surfactant Based Mobility Control Progress in Miscible- Flood for EOR Processes " by D.H. Smith, American Chemical Society Symposium Series No. 373, Washington DC USA. 234-257.
- Shyeh-Yung, J.J.(1991). "Mechanisms of Miscible Oil Recovery: Effects of Pressure on Miscible and Near-Miscible Displacements of Oil by Carbon Dioxide." Paper SPE 22651 presented at the 66th ANTEX of SPE held in Dallas, TX. Oct. 6-9.
- Smith, D.H.(1988). "Surfactant-Based Mobility Control: Progress in Miscible-Flood Enhanced Oil Recovery." American Chemical Society Symposium Series No. 373, Washington DC USA.
- Smith, D.H., and Jikitch, S.A.(1993). " Foams and Surfactants for Improved Underground Storage of Natural Gas by Blockage of Water Coning." Paper SPE No. 26908 presented at the 1993 Eastern Regional Conference & Exhibition held In Pittsburgh, P.A, U.S.A., November 2-4, 197-201.
- Srivastava, V.A. *et al.* (1995). "Quantification of Asphaltene Flocculation During Miscible CO₂ Flooding in the Weyburn Reservoirs." *Journal Canada Petroleum Techonology* October. 31.
- Stalkup, Jr, F.I.(1978). " Carbon Dioxide Miscible Flooding : Past, Present and Outlook for the Future." *Journal Petroleum Technology*, August, 1102-1112.
- Stalkup, Jr, F.I.(1983). "Miscible Displacement." SPE Monograph no. 8. New York, USA.

- Stephenson, D.J., Graham, A.G., and Luhning, R.W.(1993).” Mobility Control Experience in The Jeffre Viking Miscible CO₂ Flood.” *SPE Reservoir Engineering* (August) 183.
- Strycker, A.R., Madden, M.P., Sarathi, P. (1987).”Effetiveness of Screening Tests as Predictive Models for Steamflood Additives.” *SPE Reservoir Engineering*, Nov. 543-548.
- Suffridge, F.E. *et al.* (1989). .”Foam Performance under Reservoir Condition.” Paper SPE 19691 presented at the 1989 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio, Oct. 8-11.
- Svorstøl, I., Vassenden, F. and Mannhardt, K.(1996).”Laboratory Studies for Design of Foam Pilot in the Snorre Field.” Paper SPE/DOE 35400 presented at the 1996 SPE/DOE Tenth Symposium on Improved Oil recovery held in Tulsa OK, USA. April 21-24, 563-72.
- Tanzil, D., Hirasaki, G.J. and Miller, C.A.(2000).”Mobility of Foam in Heterogeneous Media: Flow Parallel and Perpendicular to Stratification” Paper SPE 63228 presented at the 2000 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Dallas, Texas, USA. Oct. 1-4, 1-11.
- Tortopidis, S. and Shallcross, D.C.(1994).”Carbon Dioxide Foam Flood under Australia Reservoir Condition.” Paper SPE 28811 presented at APOG Conference, Melbourne, Australia, Nov. 7-9.
- Tsau, J.S. and Grigg, R.B.(1997).”Assessment of Foam Properties and Effectiveness in Mobility Reduction for CO₂-Foam Floods.” Paper SPE 37221 presented at the 1997 SPE International Symposium on Oilfield Chemistry held in Houston, TX, USA. February, 18-21.117-126.

- Tsau, J.S., and Heller, J.P.(1992) .”Evaluation of Surfactant for CO₂-Foam Mobility Control.” Paper SPE 24013 presented at the 1992 SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference held in Midland, Texas, USA. March 18-20, 621-29.
- Tumasyan, A.B., Pantelev, V.G. and Meinster, G.P.(1969).” Influence de l’Anhydride Carbonique sur les Properites Physiques du Petrole et del’Law.” Neftefrom, del, 2. 20-23.
- Vassenden, F., Holt, T. Moen, A, and Ghaderi, A.(2000).”Foam Propagation in Absence and Presence of Oil.” Paper SPE 59284 presented at the SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium held Tulsa, Oklahoma, April, 3-5.
- Wang, G.C.(1982).”Microscopic Investigation of CO₂ Flooding Process.” *Journal Petroleum Technology*, August, 1789-1797.
- Wang, G.C.(1984).”A Laboratory Study of CO₂ Foam Properties and Displacement Mechanism.” Paper SPE /DOE 12645 presented at the 1984 SPE/DOE fourth on EOR held in Tulsa, OK. USA, April 15-18, 169-76.
- Wardlaw, N.C. (1982).”The Effects of Geometry, Wettability, Viscosity and Interfacial Tension on Trapping in Single Pore-Throat Pairs.” *Journal Petroleum Canadian Technology*, Montreal, Canada May-June 21-27.
- Wasan, *et al.*(1994).”Chapter 2: Mechanism of Aqueous Foam Stability and Antifoaming Action with and Without Oil. ” In *Foams: Fundamental & Application in Petroleum Industry.*” By Schramm, L.L., Advances in Chemistry Series No. 242, Washington DC, USA. 48-114.

Wellington, S.L. and Vinegar, H.J.(1985).” CT Studies of Surfactant-Induced CO₂ Mobility Control.” Paper SPE 14393 presented at the 1985 ANTEX of the SPE held in Las Vegas, NV, USA. Sept. 22-25.

Yaghoobi, H., and Heller, J.P. (1994).” Laboratory Investigating of Parameter Affecting CO₂-Foam Mobility in Sandstone at Reservoir Conditions.” Paper SPE 29168 presented at the 1994 Eastern Regional Conference and Exhibition held in Charleston, WV, USA. Nov 8-10, 107-21.

Yang, S.H. and Reed. R.L. (1989).” Mobility Control Using Foam. ” Paper SPE 19689 presented at the 1989 SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in San Antonio, Texas, USA.Oct. 8-11, 603-18.