

การหาปริมาณสำรองสำหรับแหล่งกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มีหลายชั้น โดยวิธีการสมดุลเชิงสสาร

นาย เรืองศักดิ์ พานิชกุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเลียม ภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-652-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**RESERVE EVALUATION FOR MULTI-LAYERED GAS RESERVOIRS USING  
MATERIAL BALANCE METHODS**



**Mr. Ruengsak Panichakul**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Petroleum Engineering**

**Department of Mining and Petroleum Engineering**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 1997**

**ISBN 974-638-652-2**

Thesis Title        RESERVE EVALUATION FOR MULTI-LAYERED GAS  
RESERVOIRS USING MATERIAL BALANCE METHODS  
By                    Mr. Ruengsak Panichakul  
Department        Mining and Petroleum Engineering (Petroleum Engineering  
Program)  
Thesis Advisor     Assistant Professor Yothin Tongpenyai, Ph.D.  
Thesis Co-advisor Mr. Alain Neveux


---

Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn University in Partial  
Fulfillment of the Requirements for the Master's Degree.



.....Dean of Graduate School  
(Professor Supawat Chutivongse, M.D.)

#### Thesis Committee




.....Chairman  
(Assistant Professor Yingyos Khemayodhin)



.....Thesis Advisor  
(Assistant Professor Yothin Tongpenyai, Ph.D.)



.....Thesis Co-advisor  
(Alain Neveux)



.....Member  
(Fuenglarb Khambharatana, Ph.D.)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

เรื่องศักดิ์ พานิชกุล : การหาปริมาณสำรองสำหรับแหล่งกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มีหลายชั้น โดยวิธีการสมดุลเชิงสสาร (RESERVE EVALUATION FOR MULTI-LAYERED GAS RESERVOIRS USING MATERIAL BALANCE METHODS) อ.ที่ปรึกษา: ศศ.ดร. โยธิน ทองเป็นใหญ่, อ.ที่ปรึกษาร่วม : Alain Neveux, 177 หน้า, ISBN 974-638-652-2.

การศึกษานี้ได้นำเอาวิธีการ material balance หรือ p/z plot มาประยุกต์ใช้กับแหล่งกักเก็บก๊าซธรรมชาติที่มีลักษณะเป็นชั้นเดียวและหลายชั้น พร้อมทั้งยังได้ศึกษาถึงผลของการนำวิธีการดังกล่าวมาใช้อีกด้วย สำหรับทุก ๆ กรณีที่ศึกษา แหล่งกักเก็บก๊าซธรรมชาติจะถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นแหล่งกักเก็บแบบปิด โดยทั้งหมดจะกล่าวถึงเฉพาะก๊าซชนิดแห้ง (dry gas) เท่านั้น นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงการใช้สมการ pseudo - steady state หรือ PSSE ในการประมาณค่าความดันเฉลี่ย ( $\bar{p}$ ) แบบจำลองแหล่งกักเก็บก๊าซธรรมชาติ (reservoir simulator) ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างค่า  $\bar{p}$  และปัจจัย (parameter) ที่จำเป็นอื่น ๆ ในการสร้างกราฟ p/z โดยค่าทุกอย่างที่ได้รับจาก simulator จะเปรียบเสมือนเป็นค่าจริง ค่า  $\bar{p}$  ที่ได้จากทั้ง simulator และ PSSE จะถูกนำไปใช้ในการสร้างกราฟ p/z ค่าปริมาณก๊าซสะสมที่สภาวะเริ่มต้น (GIIP) ที่ได้จากกราฟ p/z ทั้งกรณีของการใช้ค่า  $\bar{p}$  จาก simulator และกรณีของการใช้  $\bar{p}$  จาก PSSE จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่า GIIP ที่แท้จริงที่ได้จากการคำนวณเชิงปริมาตร (volumetric calculation) ของ simulator นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลของปัจจัยบางตัวที่ทำให้ค่า  $\bar{p}$  ที่คำนวณได้จาก PSSE มีความคลาดเคลื่อนสูง สำหรับในกรณีของแหล่งกักเก็บที่มีลักษณะเป็นชั้นเดียวโดยมีหลุมผลิต 2 หลุม วิธีการคิดแบบแยกหลุมและแบบรวมหลุมได้ถูกนำมาใช้ ในส่วนของแหล่งกักเก็บที่มีลักษณะเป็น 2 ชั้น และมีหลุมผลิตหลุมเดียวนั้น ในการศึกษาวิธีการแบ่งอัตราการไหลของก๊าซ (flow rate allocation) รวมไปถึงวิธีการคิดแบบแยกชั้นและแบบรวมชั้นได้ถูกนำมาใช้ สำหรับในกรณีของแหล่งกักเก็บที่มีลักษณะเป็น 2 ชั้น และมีหลุมผลิต 2 หลุม วิธีการคิดแบบแยกชั้นแยกหลุม แบบแยกชั้นรวมหลุม แบบรวมชั้นแยกหลุม และแบบรวมชั้นรวมหลุมได้ถูกนำมาใช้ ส่วนกรณีของแหล่งกักเก็บที่มีลักษณะเป็น 3 ชั้น และมีหลุมผลิตหลุมเดียวนั้น วิธีการคิดแบบแยกชั้นและแบบรวมชั้นก็ถูกนำมาใช้ด้วยเช่นกัน ในตอนท้ายของการศึกษานี้ ได้นำเอาวิธีการ material balance มาประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม  
สาขาวิชา วิศวกรรมปิโตรเลียม  
ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิติ *Rungroek Panichakul*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *Y. Z. 27/7/21*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม *Alain*

# # C817845 : MAJOR PETROLEUM ENGINEERING

KEY WORD:

Reserves / RESERVE EVALUATION / GAS RESERVIOR / MATERIAL BALANCE / MULTI-LAYER

RUENGSAK PANICHAKUL : RESERVE EVALUATION FOR MULTI-LAYERED GAS RESERVOIRS USING MATERIAL BALANCE METHODS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. YOTHIN TONGPENYAI, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : Mr. ALAIN NEVEUX, 177 pp. ISBN 974-638-652-2.

This study is intended to investigate the validity of the material balance or the p/z plot method when applied to single- and multi-layered gas reservoirs. For all cases studied, a reservoir is assumed to be a volumetric dry gas reservoir. In this study, applicability of the pseudo-steady state equation (PSSE) in estimating  $\bar{p}$  was also investigated. A reservoir simulator was used in the study to generate  $\bar{p}$  and other parameters needed for generating a p/z plot. All the obtained parameters (including GIIP and reserves) from the simulator were considered as actual values. Both  $\bar{p}$ 's obtained from the simulation and the PSSE were used in generating p/z plots. Resulting GIIP's obtained from p/z plots generated from  $\bar{p}$ 's from the simulator or actual  $\bar{p}$ 's, and from  $\bar{p}$ 's from the PSSE were compared to the actual value obtained from volumetric calculation of the simulator. Effects of parameters which cause high deviation of calculated  $\bar{p}$  from the PSSE were also studied. For a single-layered reservoir with two wells, separated-well and combined-well methods were applied. For a two-layered reservoir with one well, flow rate allocation, and separated-layer and combined-layer methods were studied and applied. For a two-layered reservoir with two wells, separated-layer and separated-well, separated-layer and combined-well, combined-layer and separated-well, and combined-layer and combined-well methods were applied. For a three-layered reservoir with one well, both separated-layer and combined-layer methods were applied. Finally, application of the material balance method to real data was carried out.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม

สาขาวิชา วิศวกรรมปิโตรเลียม

ปีการศึกษา 2540

ลายมือชื่อนิสิต Ruengsak Panichakul

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา Y. Y. Y. Y.

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม J. J. J. J.



## ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my sincere appreciation and gratitude to Asst.Prof. Dr.Yothin Tongpenyai, my advisor for his valuable advice, criticism, and broad views and to my co-advisor, Mr. Alain Neveux, for his permission and support for the use of the reservoir simulator.

I wish to thank the thesis committee members for their comments and to my parents who give me their sympathy and encouragement.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## CONTENTS

	PAGE
ABSTRACT (IN THAI).....	iv
ABSTRACT (IN ENGLISH).....	v
ACKNOWLEDGEMENTS.....	vi
CONTENTS.....	vii
LIST OF TABLES.....	ix
LIST OF FIGURES.....	xii
 CHAPTER	
I. INTRODUCTION.....	1
II. LITERATURE REVIEWS.....	3
III. STUDY CONCEPT AND METHODOLOGY.....	12
IV. RELEVANT THEORIES.....	16
V. MODEL FORMULATION.....	23
VI. SINGLE-LAYERED RESERVOIR.....	35
VII. TWO- AND THREE-LAYERED RESERVOIRS.....	87
VIII. APPLICATION TO REAL DATA.....	112
IX. CONCLUSIONS.....	135
REFERENCES.....	139
APPENDIX A. EXAMPLES OF INTERESTING P/Z PLOTS FROM THE STUDY.....	142
APPENDIX B. CASES USED FOR RATE ALLOCATION STUDY FOR A TWO-LAYERED RESERVOIR WITH ONE WELL AT VARIOUS $Q_T$ .....	154

APPENDIX C. PLOTS OF FLOW RATE OF EACH LAYER VS. TIME OF INTERESTING CASES.....	165
VITAE.....	177



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## LIST OF TABLES

TABLE	PAGE
5-1 Fixed-value parameters (rock and fluid properties).....	24
5-2 Fixed-value parameters (well characteristics).....	25
5-3 Variable-value parameters to be studied for single-layered reservoir cases.....	25
5-4 Additional fixed-value parameters for two-layered reservoir cases.....	29
5-5 Variable-value parameters to be studied for two-layered reservoir cases.....	29
5-6 Additional fixed-value parameters for the three-layered reservoir case.....	33
6-1 Effects of permeability on the calculated GIIP and their errors.....	47
6-2 Effects of flow rate on the calculated GIIP and their errors.....	55
6-3 Effects of porosity and thickness on the calculated GIIP and their errors.....	63
6-4 Effects of gas gravity on the calculated GIIP and their errors.....	67
6-5 Z-factors of natural gas of four different impuritie concentrations.....	71
6-6 Calculated GIIP of natural gas of four different impurities' concentrations.....	74
6-7 Effects of skin factor on the calculated GIIP and their errors.....	77
6-8 Comparison of results from the separated and combined methods.....	82
7-1 Estimates of exponential constants.....	92
7-2 GIIP obtained from application of the separated-layered method to four different cases.....	97

7-3	Average parameters of the four cases used in the combination methods.	101
7-4	GIIP obtained from the application of the combination method to the four different cases.	101
7-5	Comparison of the errors of GIIP obtained from the separation and combination methods.	101
7-6	Comparison of the four different methods for a two-layered reservoir with two wells.	105
7-7	Comparison of the GIIP obtained from the two different methods for a three-layered reservoir with one well.	110
8-1	Reservoir characteristics and properties of layers in case I.	112
8-2	Recorded WHSIP data of BK-6-X.	114
8-3	Cumulative gas production of BK-6-X.	114
8-4	Estimated cumulative gas production of each layer in case I.	118
8-5	Estimated GIIP from the p/z plots of the layers in case I.	121
8-6	Reservoir characteristics and properties of layers in case II.	123
8-7	Gas properties and the calculated fluid gradients for case II.	125
8-8	Recorded WHSIP data of BK-4-X.	126
8-9	Recorded WHSIP data of BK-4-Y.	127
8-10	Cumulative gas production of BK-4-X.	129
8-11	Cumulative gas production of BK-4-Y.	130
8-12	Estimated GIIP from the p/z plots of the wells in case II.	133

## Tables in Appendices

B-1 Cases used for rate-allocation study for a two-layered reservoir with one well at $q_T = 1$ MMscf/d.....	155
B-2 Cases used for rate-allocation study for a two-layered reservoir with one well at $q_T = 5$ MMscf/d.....	157
B-3 Cases used for rate-allocation study for a two-layered reservoir with one well at $q_T = 10$ MMscf/d.....	159
B-4 Cases used for rate-allocation study for a two-layered reservoir with one well at $q_T = 15$ MMscf/d.....	161
B-5 Cases used for rate-allocation study for a two-layered reservoir with one well at $q_T = 20$ MMscf/d.....	163

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
5-1 Location of one production well for a single-layered reservoir.....	27
5-2 Location of two production wells for a single-layered reservoir.....	28
5-3 Location of one production well for a two-layered reservoir.....	30
5-4 Location of two production wells for a two-layered reservoir (both wells penetrate both layers).....	31
5-5 Location of two production wells for a two-layered reservoir (one well penetrates both layers while the other penetrates only one layer) .	32
5-6 Location of one production well for a three-layered reservoir.....	34
6-1 The p/z plot for the case with $q_g = 5$ MMscf/d, $k=20$ md....	37
6-2 The p/z plot for the case with $q_g = 5$ MMscf/d, $k=100$ md....	42
6-3 The p/z plot for the case with $q_g = 15$ MMscf/d, $k=20$ md.....	45
6-4 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different permeability values, $q_g = 5$ MMscf/d).....	48
6-5 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different permeability values, $q_g = 15$ MMscf/d).....	49
6-6 GIIP as a function of permeability ( $q_g = 5$ MMscf/d).....	51
6-7 GIIP as a function of permeability ( $q_g = 15$ MMscf/d).....	52
6-8 Errors of calculated GIIP as a function of permeability at different flow rates.....	53
6-9 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different flow rates, $k = 20$ md).....	56
6-10 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different flow rates, $k = 100$ md).....	57
6-11 GIIP as a function of flow rate ( $k = 20$ md).....	59
6-12 GIIP as a function of flow rate ( $k = 100$ md).....	60

6-13 Errors of calculated GIIP as a function of flow rate at different values of permeability.....	61
6-14 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different porosity values, $q_g = 15$ MMscf/d, $k = 100$ md).....	65
6-15 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different thickness values, $q_g = 15$ MMscf/d, $k = 100$ md).....	66
6-16 GIIP as a function of gas gravity ( $q_g = 1$ MMscf/d).....	69
6-17 GIIP as a function of gas gravity ( $k = 100$ md).....	70
6-18 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different gas gravity values, $q_g = 5$ MMscf/d).....	72
6-19 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different gas gravity values, $q_g = 10$ MMscf/d).....	73
6-20 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different impurity concentrations, $q_g = 15$ MMscf/d).....	75
6-21 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different skin-factor values, $q_g = 5$ MMscf/d).....	78
6-22 Average reservoir pressure as a function of cumulative production (different skin-factor values, $q_g = 15$ MMscf/d).....	79
6-23 Average reservoir pressure as a function of cumulative production for a one-layer-with-two-wells system (separated method).....	83
6-24 Average reservoir pressure as a function of cumulative production, one layer with two wells (combined method).....	84
6-25 The p/z plot of a one-layer-with-two-well system (separated method).....	85
7-1 Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	89
7-2 Relationship between cumulative gas production and average reservoir pressure for layer 1 of case I.....	98
7-3 Relationship between cumulative gas production and average reservoir pressure for layer 2 of case I.....	99
8-1 The p/z plot of BK-6-X.....	116

8-2	The p/z plot of BK-6-X, layer 1.....	119
8-3	The p/z plot of BK-6-X, layer 2.....	120
8-4	Schematic drawing for the real case study of the three-layered reservoir with two wells.....	124
8-5	The p/z plot of BK-4-X.....	131
8-6	The p/z plot of BK-4-Y.....	132
Figures in Appendices		
A-1	The p/z plot of a single-layered reservoir where $q_g = 10$ MMscf/d, $k = 20$ md .....	143
A-2	The p/z plot of a single-layered reservoir where $q_g = 1$ MMscf/d, $k = 20$ md .....	144
A-3	The p/z plot of a single-layered reservoir where $q_g = 10$ MMscf/d, $k = 50$ md .....	145
A-4	The p/z plot of a single-layered reservoir where $q_g = 5$ MMscf/d, $k = 50$ md .....	146
A-5	The p/z plot of a single-layered reservoir where $q_g = 1$ MMscf/d, $k = 50$ md .....	147
A-6	The p/z plot of a single-layered reservoir where $q_g = 1$ MMscf/d, $k = 10$ md .....	148
A-7	The p/z plot of layer 1 of case 2 in Table 7-2.....	149
A-8	The p/z plot of layer 2 of case 2 in Table 7-2.....	150
A-9	The p/z plot of a single-layered reservoir where $q_g = 15$ MMscf/d, $k = 500$ md .....	151
A-10	Relationship between $P_{avg}$ and $G_p$ for a single-layered reservoir where $q_g = 15$ MMscf/d, $k = 500$ md.....	152
A-11	Relationship between $P_{avg}$ and $G_p$ for a single-layered reservoir where $q_g = 15$ MMscf/d, $k = 100$ md.....	153

C-1	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	166
C-2	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	167
C-3	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	168
C-4	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	169
C-5	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	170
C-6	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	171
C-7	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	172
C-8	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	173
C-9	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	174
C-10	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir.....	175
C-11	Flow rate of each layer for a typical two-layered reservoir, $q_T = 5 \text{ MMscf/d}$ .....	176