VERTICAL TWO-PHASE FLOW REGIME AND PRESSURE GRADIENT UNDER THE INFLUENCE OF SDS SURFACTANT

Tanabordee Duangprasert

A Thesis Submitted in Partial Fulfilment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
The Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University
in Academic Partnership with
The University of Michigan, The University of Oklahoma,
Case Western Reserve University and Institut Français du Pétrole
2006

ISBN 974-993-751-1

Thesis Title:	Vertical Two-Phase Flow Regimes and Pressure Gradient under the Influence of SDS surfactant
By:	Tanabordee Duangprasert
Program:	Petroleum Technology
Thesis Advisors:	Assoc. Prof. Anuvat Sirivat
	Prof. James. O. Wilkes
	Asst. Prof. Kitipat Siemanond

Accepted by the Petroleum and Petrochemical College, Chulalongkorn University, in partial fulfilment of the requirements for the Degree of Master of Science.

Nantaya Yanumet. .....College Director

(Assoc. Prof. Nantaya Yanumet)

Thesis Committee:

.....

(Assoc. Prof. Anuvat Sirivat)

James O. Wilkes .....

(Prof. James O. Wilkes)

Kitipat Siemanond .....

(Asst. Prof. Kitipat Siemanond)

.....

(Assoc. Prof. Thirasak Rirksomboon)

Pramoch R .....

(Assoc. Prof. Pramoch Rangsunvigit)

490408

ABSTRACT

4773013063: Petroleum Technology Program
Tanabordee Duangprasert: Vertical Two-Phase Flow Regime and Pressure Gradient under the Influence of SDS Surfactant.
Thesis Advisors: Assoc. Prof. Anuvat Sirivat , Asst. Prof. Kitipat Siemanond, and Prof. James O.Wilkes, 266 pp. ISBN 974-993-751-1
Keywords: Flow regimes/ Bubble flow/ Slug flow/ Churn flow/ Annular flow/ Mist flow/ Pressure gradient/ Reynolds number

Two-phase gas/liquid flows in vertical pipes have been systematically investigated because of their importance in many industrial processes operating in the two-phase flow regimes. There are four principle flow regimes which occur successively at ever-increasing gas flow rates: the bubble, the slug, the annular, and the mist flow regimes. In this research, the flow regimes and their pressure gradients were be investigated at a fixed temperature of 30°C. Water and SDS solution (1 CMC) were used as the working fluids. In particular, we focused our work on the influence of surfactant addition on the flow regimes and the corresponding pressure gradients of the two-phase flow in a vertical pipe. An experiment was carried out in a vertical transparent tube with 0.019 m inner diameter and 3 m in length, and pressure gradients were measured by the pressure taps connected to a U-tube manometer. For both solutions, at a fixed Re_{water} or $Re_{SDS\ solution}$ with increasing Re_{air}, the pressure gradients decreased from the bubble flow regime to the churn flow regime. In the annular to mist flow regimes, the pressure gradients increased with increasing Re_{air}. In the slug and the slug-churn flow regimes, the pressures gradients of the SDS solutions decreased with increasing SDS concentrations, relative to that of water. At a fixed Re_{water} or $Re_{SDS\ solution}$ with increasing Re_{air}, the bubble height increased but the bubble width seems to be constant. At a fixed Re_{air}, the bubble velocity increased with increasing Re_{water} or $Re_{SDS\ solution}$. Finally, the experimentally measured pressure gradient values were compared with the theoretical values and they were in good agreement.

บทคัดย่อ

ธนบดี ด้วงประเสริฐ : ขอบเขตของการไหลในแนวดิ่งแบบสองเฟสและผลต่างความดันภายใต้อิทธิพลของสารลดแรงตึงผิว SDS (Vertical Two-phase Flow Regime and Pressure Gradient under the Influence of SDS surfactant) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร. อนุวัฒน์ ศิริวัฒน์, ผศ.ดร. กิติพัฒน์ สีมานนท์ และ ศ. เจมส์ โอวิลค์ 266 หน้า .ISBN 974-993-751-1

การไหลแบบสองเฟสของระบบของเหลวและก๊าซในท่อแนวดิ่งได้รับการศึกษาอย่างมีระบบกฎเกณฑ์เพราะมีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการอุตสาหกรรมที่ใช้ประโยชน์จากท่อและเครื่องมือที่มีการทำงานแบบขอบเขตการไหลแบบสองเฟส การไหลแนวดิ่งสองเฟสทิศทางเดียวของก๊าซและของเหลว มีจำนวนขอบเขตการไหลหลัก 4 ขอบเขต ได้แก่ ขอบเขตการไหลแบบฟองอากาศ แบบกระสุน แบบวงแหวนและแบบละออง งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาขอบเขตการไหลและระดับการเปลี่ยนแปลงของความดันที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส น้ำและสารละลายเอสดีเอสเข้มข้น 1 CMC ถูกใช้เป็นของไหลในการศึกษา โดยศึกษาอิทธิพลของสารลดแรงตึงผิวต่อขอบเขตการไหลและระดับการเปลี่ยนแปลงของความดันในการไหลแบบสองเฟสในท่อแนวดิ่ง การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาในท่อใสแบบแนวดิ่ง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.019 เมตรและยาว 3 เมตร ระดับการเปลี่ยนแปลงความดันถูกวัดโดยท่อความดันที่ต่อกับมาโนมิเตอร์รูปตัวยู

เมื่อแรงตึงผิวของของเหลวลดลง ที่ค่าเรโนด์ของน้ำ (Re_{water}) และสารละลายเอสดีเอส ($Re_{SDS\ solution}$) คงที่ โดยค่าเรโนด์ของอากาศ (Re_{air}) เพิ่มขึ้น ระดับการเปลี่ยนแปลงของความดันลดลงจากขอบเขตการไหลแบบฟองอากาศถึงแบบปั่น แต่ในชอบเขตการไหลแบบวงแหวนและแบบละออง ระดับการเปลี่ยนแปลงของความดันเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเรโนด์ของอากาศเพิ่มขึ้น ระดับการเปลี่ยนแปลงของความดันที่ได้จากการทดลองได้ถูกเปรียบเทียบและสอดคล้องด้วยดีกับระดับการเปลี่ยนแปลงความดันในทางทฤษฎี สำหรับขนาดของฟองอากาศ ที่ค่าเรโนด์ของน้ำและของสารละลายเอสดีเอสคงที่ โดยค่าเรโนด์ของอากาศเพิ่มขึ้น ความสูงของฟองอากาศเพิ่มขึ้นแต่ความกว้างดูเหมือนคงที่ สุดท้ายนี้ สำหรับความเร็วของฟองอากาศ ที่ค่าเรโนด์ของอากาศคงที่ความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อค่าเรโนด์ของน้ำและของสารละลายเอสดีเอสเพิ่มขึ้น

ACKNOWLEDGEMENTS

This Thesis work was carried out at the Petroleum and Petrochemical Collage, Chulalongkorn University, with the academic partnership among University of Michigan, University of Oklahoma, and Case Western Reserve University during years 2005-2006. The scholarship from this college throughout my study is gratefully acknowledged.

First of all, I am very grateful to Assoc. Prof. Anuvat Sirivat, Asst. Prof Kitipat Siemanond and Prof. James O. Wilkes for entrusting with this challenging topic, supporting my work over the year, and especially giving me the uncountable things beyond their duty as well as providing the financial.

I would like to give my thankfulness to Assoc. Prof. Pramoch Rangsunvigit and Assoc. Prof. Thirasak Rirksomboon who are my thesis committee for their well-intentioned suggestions and comments is greatly acknowledged. And also, unforgettable thanks are forwarded to Mr. Nan Da Hlaing and Ph.D students of the Petroleum and Petrochemical College, who gave me a lot of helpful advice and technical knowledge.

I wish to extend my thanks to all of my worthy friends and to the college staff who willingly gave me warm supports and encouragement.

And above all, my greatest debt of gratitude lines with all the members in my family who have filled my life with daily love and endless encouragement, making the frustration from my extended research effort easier to handle. And vice versa, it is surely my family who are most grateful that this research work is finally completed.

TABLE OF CONTENTS

		PAGE
Title Page		i
Abstract (in English)		iii
Abstract (in Thai)		iv
Acknowledgements		v
Table of Contents		vi
List of Tables		ix
List of Figures		x
CHAPTER		
I	**INTRODUCTION**	1
II	**BACKGROUND AND LITERATURE SURVEY**	3
	2.1 Theoretical Background	3
	2.1.1 Determination of Flow Regime	5
	2.1.2 Bubble Flow Regime	6
	2.1.3 Slug Flow Regime	8
	2.1.4 Churn or Froth Flow Regime	14
	2.1.5 Annular-Mist Flow Regime	14
	2.2 Literature Survey	16
III	**EXPERIMENTAL**	25
	3.1 Materials Preparation	25
	3.2 Experimental Apparatus	25
	3.2.1 Design and Experimental Setup of Two-Phase Flow	25
	3.3 Methodology	28

CHAPTER		PAGE
	3.3.1 Parameters	28
	3.3.1.1 Controlled Parameters of Two-Phase Flow	28
	3.3.1.2 Variable Parameters of Two-Phase Flow	29
	3.3.1.3 Measured Parameters of Two-Phase Flow	29
	3.3.2 Experimental Procedures	29
	3.3.2.1 Determination the Density of Surfactant (SDS) Solution by Pycnometer	29
	3.3.2.2 Determination the Viscosity of Surfactant (SDS) Solution by Cannon-Ubbelohde Viscometer	30
	3.3.2.3 Determination of Pressure Drops in the Main Column	31
	3.3.2.4 Determination of Bubble and Slug Size in The Maim Column	31
IV	**VERTICAL TWO-PHASE FLOW REGIMES AND PRESSURE GRADIENT UNDER THE INFLUENCE OF SDS SURFACTANT**	32
	4.1 Abstract	32
	4.2 Introduction	34
	4.3 Experimental Apparatus	36
	4.4 Results and Discussion	37
	4.5 Conclusions	47
	4.6 Acknowledgements	48
	4.7 References	49

CHAPTER		PAGE
V	**CONCLUSIONS**	67
	REFERENCES	69
	APPENDICES	72
	Appendix A Physical Properties of Liquid Used in Experiment	72
	Appendix B Determination of Pressure Gradient from Wilkes and Sylvester theory	83
	Appendix C Experimental Data for Pressure Gradient	126
	Appendix D Comparison Between Wilkes theory, Sylvester Theory and Experimental Data for Pressure Gradient	148
	Appendix E Determination of Bubble Size from Experiment	207
	Appendix F Determination of Bubble Velocity	222
	Appendix G Comparison the Pressure Gradient from The Experiment Between Pure Water and SDS Solution (1 CMC)	238
	Appendix H Determination The Effect of Surfactant Concentration on The Pressure Gradient	263
	CURRICULUM VITAE	266

LIST OF TABLES

TABLE		PAGE
	CHAPTER II	
2.1	Model variables for Sylvester theory	11
	CHAPTER III	
3.1	Physical properties of liquids used in experiment	28
	CHAPTER IV	
4.1	Physical properties of liquids used in the experiment	65
4.2	The critical Reynolds numbers $(Re_{air})_{critical}$ of various regimes	66

LIST OF FIGURES

FIGURE		PAGE
	CHAPTER II	
2.1	Modeling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tube.	4
2.2	Two-phase flow regimes in a vertical tube.	4
2.3	Bubble flow.	6
2.4	Two-phase slug flow in a vertical pipe.	8
2.5	Slug unit.	10
2.6	Vertical annular two-phase flow.	15
	CHAPTER III	
3.1	Schematic diagram of the experimental setup.	27
3.2	Schematic diagram of Cannon-Ubbelohde viscometer.	30
	CHAPTER IV	
4.1	Schematic diagram of the experimental setup.	53
4.2	Effect of $Re_{SDS\ solution}$ on pressure gradient (dp/dz): a) $Re_{water} = 0$ and $Re_{SDS\ solution} = 0$; b) $Re_{water} = 1010$ and $Re_{SDS\ solution} = 10650$; c) $Re_{water} = 2740$ and $Re_{SDS\ solution} = 2540$.	55
4.3	Effect of surfactant concentration on pressure gradient (dp/dz).	56
4.4	Comparison between theoretical and measured pressure gradient (dp/dz): a) $Re_{SDS\ solution} = 0$; b) $Re_{SDS\ solution} = 1065$; c) $Re_{SDS\ solution} = 2540$.	58
4.5	Photograph of bubble flow regime: a) Pure water at $Re_{water} = 480$, $Re_{air} = 5.64$; b) SDS solution (1 CMC) at $Re_{SDS\ solution} = 500$, $Re_{air} = 5.64$.	59

FIGURE **PAGE**

4.6 Effect of $Re_{SDS\ solution}$ on bubble size: a) $Re_{water} = 0$ and $Re_{SDS\ solution} = 0$; b) $Re_{water} = 1010$ and $Re_{SDS\ solution} = 1065$; c) $Re_{water} = 2740$ and $Re_{SDS\ solution} = 2540$. 61

4.7 Effect of $Re_{SDS\ solution}$ on the length of Taylor bubble: a) $Re_{water} = 0$ and $Re_{SDS\ solution} = 0$; b) $Re_{water} = 1010$ and $Re_{SDS\ solution} = 1065$; c) $Re_{water} = 2740$ and $Re_{SDS\ solution} = 2540$. 63

4.8 Effect of $Re_{SDS\ solution}$ on the bubble velocity. 64