

**VERTICAL TWO-PHASE FLOW REGIMES AND PRESSURE GRADIENT:  
EFFECT OF VISCOSITY**

Nan Da Hlaing

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

2005

ISBN 974-9651-21-9

I 2224 2909

**Thesis Title:** Vertical Two-Phase Flow Regimes and Pressure Gradient:  
Effect of Viscosity  
**By:** Nan Da Hlaing  
**Program:** Petroleum Technology  
**Thesis Advisors:** Asst. Prof. Kitipat Siemanond  
Prof. James O. Wilkes  
Assoc. Prof. Anuvat Sirivat

---

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:**

*Kitipat Siemanond*  
.....  
(Asst. Prof. Kitipat Siemanond)

*Anuvat Sirivat* 31/5/2005  
.....  
(Assoc. Prof. Anuvat Sirivat)

*James O Wilkes*  
.....  
(Prof. James O. Wilkes)

*Pomthong Malakul*  
.....  
(Asst. Prof. Pomthong Malakul)

*B. Kitiyanan*  
.....  
(Asst. Prof. Boonyarach Kitiyanan)

## ABSTRACT

4573018063: Petroleum Technology Program

Nan Da Hlaing: Vertical Two-Phase Flow Regimes and Pressure Gradients: Effect of Viscosity

Thesis Advisors: Assoc. Prof. Anuvat Sirivat,

Prof. James O. Wilkes, and Asst. Prof. Kitipat Siemanond,

67 pp. ISBN 974-9651-21-9

Keywords: Flow regimes/ Bubble flow/ Slug flow/ Churn flow/ Annular flow/ Mist flow/ Liquid viscosity/ Pressure gradient/ Reynolds number

Many industrial processes utilize pipes and equipments that are operated in two-phase flow regimes. In a two-phase gas-liquid co-current vertical flow, there exist a number of different flow regimes, of which the most important are the bubble, the slug, the churn, and the annular regimes. Experiment was carried out in a vertical transparent tube with 0.019 m in diameter and 3 m in length and pressure gradients were measured by the pressure taps connected to a U-tube manometer. Water and 50 vol% glycerol solution were used as the working fluids whose kinematic viscosities were  $0.85 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  to  $4.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , respectively. We varied superficial air velocity,  $j_{\text{air}}$ , between 0.0021~58.7 m/s, superficial water velocity,  $j_{\text{water}}$  between 0~0.121 m/s, and superficial aqueous glycerol solution,  $j_{\text{solution}}$ , between 0~0.1053 m/s. The effect of liquid viscosity on the flow regimes and the corresponding pressure gradients along the vertical flow were investigated. As liquid viscosity increases, the boundaries of the bubble, the bubble-slug, and the slug flow regimes in aqueous glycerol solution shift to the right relative to those of pure water. But the boundaries for the churn, the annular and the mist flow regimes remain nearly the same. As Reynolds number of air,  $(\text{Re})_{\text{air}}$ , increases the pressure gradients decreases in the bubble, the slug, and the slug-churn flow regimes. But in the annular and the mist flow regimes, the pressure gradients increases with increasing Reynolds number of air  $(\text{Re})_{\text{air}}$ . Finally, the experimentally measured pressure gradient values are compared and are in good agreement with the theoretical values.

## บทคัดย่อ

นาย นันตะ เสง : ขอบเขตของการไหลในแนวตั้งแบบสองเฟสและผลต่างความดัน : ผลของความหนืด (Vertical Two-Phase Flow Regimes and Pressure Gradients : Effect of Viscosity) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร.อนุวัฒน์ ศิริวัฒน์ ผศ.ดร.กิติพัฒน์ สีมานนท์ และ ศ. เจมส์ โอวิลค์ 70 หน้า ISBN 974-9651-21-9

การไหลแบบสองเฟสของระบบของเหลวและก๊าซในท่อแนวตั้งได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมเคมี โดยเฉพาะการนำไปประยุกต์ใช้ในการขนส่งน้ำมันและก๊าซจากหลุมขุดเจาะ กระบวนการอุตสาหกรรมมากมายใช้ประโยชน์จากท่อและเครื่องมือที่มามีการทำงานแบบขอบเขตการไหลแบบสองเฟส การไหลแนวตั้งสองเฟสทิศทางเดียวของก๊าซและของเหลว มีจำนวนขอบเขตการไหลแบบต่างๆ ได้แก่ ขอบเขตการไหลแบบฟองอากาศ แบบกระสุน แบบปั่นและแบบวงแหวน การทดลองนี้ได้ทำการศึกษาในท่อไอแบบแนวตั้ง มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.019 เมตรและยาว 3 เมตร ผลต่างความดันถูกวัดโดยท่อความดันที่ต่อกับมาโนมิเตอร์รูปตัวยู น้ำและสารละลายกลีเซอรอลร้อยละ 50 โดยปริมาตร ถูกใช้เป็นของไหลในการศึกษาซึ่งมีความหนืดโคเนมาติกส์เท่ากับ  $0.85 \times 10^{-6}$  เมตร<sup>2</sup>/วินาทีและ 40 เมตร<sup>2</sup>/วินาที ตามลำดับ นอกจากนี้ได้ทำการปรับความเร็วอากาศเหนือผิว,  $j_{air}$ , ระหว่าง 0.0021~58.7 เมตร/วินาที, ความเร็วน้ำเหนือผิว,  $j_{water}$ , ระหว่าง 0~0.121 เมตร/วินาที และความเร็วสารละลายกลีเซอรอลเหนือผิว,  $j_{solution}$ , ระหว่าง 0~0.1053 เมตร/วินาที ผลของความหนืดของของเหลวต่อขอบเขตการไหล และผลต่างความดันในการไหลในแนวตั้งได้ถูกทดสอบ

เมื่อความหนืดของของเหลวเพิ่มขึ้น ขอบเขตการไหลแบบฟองอากาศ แบบฟองอากาศ-กระสุน และแบบกระสุน ในสารละลายกลีเซอรอลจะย้ายไปทางขวาสัมพันธ์กับขอบเขตของน้ำบริสุทธิ์ แต่สำหรับขอบเขตแบบปั่น แบบวงแหวน และแบบละออง มีขอบเขตที่เกือบเหมือนกัน เมื่อค่าเรโนลด์ของอากาศ ( $Re_{air}$ ) เพิ่มขึ้น ผลต่างความดันจะลดลงในขอบเขตการไหลแบบฟองอากาศ แบบกระสุน และแบบกระสุน-ปั่น แต่ในการไหลแบบวงแหวนและละออง ผลต่างความดันจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าเรโนลด์ของอากาศเพิ่มขึ้น สุดท้ายนี้ผลต่างความดันที่ได้จากการทดลองได้ถูกเปรียบเทียบและสอดคล้องด้วยดีกับค่าผลต่างความดันในทางทฤษฎี

## ACKNOWLEDGEMENTS

This thesis can not be successful without the participation and support from the following individuals and organizations to whom the author would like to thank.

First of all, I gratefully acknowledge Associate Prof. Anuvat Sirivat for accepting me in his division, let me have to learn a lot of fruitful things, and also stand beside for several enlighten suggestions, discussions, and problem solving throughout my thesis works. I would like to express my deepest appreciation and thank to Assistant Prof. Kitipat Siemanond, and Prof. James O. Wilkes for all of their special guidance and assistance while I was conducting my research.

Thanks are also expressed to the faculty members and staffs of the Petroleum and Petrochemical College for their precious assistance. I am grateful for the partial scholarship and partial funding of the thesis work provided by the Postgraduate Education and Research Programs in Petroleum and Petrochemical Technology (PPT Consortium).

I would like to give my thankfulness to Assistant Prof. Pomthong Malakul and Assistant Prof. Boonyarach Kitiyanan who are my thesis committee for their well-intentioned suggestions and comments is greatly acknowledged. And also, unforgettable thanks are forwarded to my friends at PPC, Dr. Khine Yi Mya and friends from Myanmar. Their encouragement helped me accomplish my thesis without any stress.

I also forward my special acknowledgement to faculty members of Department of Petroleum Engineering, Yangon Technological University, Myanmar for their encouragement and assistance.

Finally, I would like to express deep appreciation to my father, mother, and my family for their support, love, encouragement, and understanding.

## TABLE OF CONTENTS

	<b>PAGE</b>
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
<b>CHAPTER</b>	
<b>I INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
<b>II BACKGROUND AND LITERATURE SURVEY</b>	<b>3</b>
2.1 Background	3
2.1.1 Two-Phase Flow	3
2.1.2 Determination of Flow Regime	5
2.1.2.1 Bubble Flow Pattern	6
2.1.2.2 Slug Flow Pattern	8
2.1.2.3 Churn or Froth Flow Pattern	10
2.1.2.4 Annular-Mist Flow Pattern	10
2.2 Literature Survey	12
<b>III EXPERIMENTAL</b>	<b>20</b>
3.1 Materials Preparation	20
3.2 Experimental Apparatus	20
3.2.1 Design and Experimental Setup of Two-Phase Flow	20
3.3 Methodology	24
3.3.1 Parameters	24

<b>CHAPTER</b>	<b>PAGE</b>
3.3.1.1 Controlled parameters of two-phase flow	24
3.3.1.2 Variable parameters of two-phase flow	24
3.3.1.3 Measured parameters of two-phase flow	24
3.3.2 Experimental Procedures	25
3.3.2.1 Determination of kinematic viscosities by viscometer	25
3.3.2.2 Calculations of kinematic viscosities of pure water and 50 vol% glycerol	26
3.3.2.3 Determination of Flow Pattern Map	27
3.3.2.4 Determination of Pressure Drops in the Main Column	27
3.3.3 Data Analysis	28
 <b>IV VERTICAL TWO-PHASE FLOW REGIMES AND PRESSURE GRADIENT: EFFECT OF VISCOSITY</b>	 29
4.1 Abstract	29
4.2 Introduction	31
4.3 Experimental Apparatus	32
4.4 Results and Discussion	33
4.5 Conclusions	42
4.6 Acknowledgements	43
4.7 References	43
 <b>V CONCLUSIONS</b>	 63
 <b>REFERENCES</b>	 65

<b>CHAPTER</b>	<b>PAGE</b>
<b>APPENDICES</b>	<b>68</b>
<b>Appendix A</b> Two-phase Flow	<b>68</b>
<b>Appendix B</b> Critical Reynolds numbers of Air in Two-Phase Flow	<b>107</b>
<b>Appendix C</b> Comparison between Theory and Experimental Data for Pressure Gradient	<b>113</b>
<b>Appendix D</b> Photos of Different Flow Regimes	<b>152</b>
<b>Appendix E</b> Experimental Setup	<b>160</b>
<b>CURRICULUM VITAE</b>	<b>162</b>



**LIST OF TABLES**

<b>TABLE</b>		<b>PAGE</b>
<b>CHAPTER II</b>		
2.1	Terminal velocities for Bubbles	7
2.2	Flow pattern details for air-water mixture flowing in 1.025 inch I.D vertical pipe	14
<b>CHAPTER III</b>		
3.1	Variable parameters of two-phase flow	25
<b>CHAPTER IV</b>		
4.1	Physical properties of liquids used in the experiment	45

## LIST OF FIGURES

FIGURE	PAGE
<b>CHAPTER II</b>	
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 Vertical annular two-phase flow	11
2.6 Flow pattern for air-water mixtures flowing in a 1.025-inch based on observations and calculations.	15
2.7 Pressure gradient data for air-water mixtures in a 1.025 inch pipe	16
2.8 Flow-pattern boundaries for vertical upflow of air and water at 15 psia in a 1 inch diameter tube.	16
2.9 Various “regimes” or subdivisions of the annular flow pattern for cocurrent upward flow of air and water in a 1.25 inch diameter pipe at 15 psia.	17
<b>CHAPTER III</b>	
3.1 Photograph for two-phase flow experiment setup with compressor developed in this study.	22
3.2 Schematic diagram of the experimental setup	23
3.3 Schematic diagram of the viscometer	25
<b>CHAPTER IV</b>	
4.1 Schematic diagram of the experimental setup	46
4.2 Different flow regimes for air-water mixture and air-50 vo% glycerol solution mixture.	47

FIGURE	PAGE
4.3 a) Flow pattern regimes for air-pure water mixture, b) Flow pattern regimes for air-50 vol% glycerol solution mixture.	48
4.4 Pressure gradient vs. air Reynolds number of pure water and 50 vol% glycerol solution a) $Re_{\text{water}} = 0$ , $Re_{\text{solution}} = 0$ ; b) $Re_{\text{water}} = 293$ , $Re_{\text{solution}} = 307$ ; c) $Re_{\text{water}} = 427$ , $Re_{\text{solution}} = 435$ ; d) $Re_{\text{water}} = 56$ , $Re_{\text{solution}} = 500$ ; e) $Re_{\text{water}} = 1628$ .	49
4.5 Comparison between theory and experimental pressure gradient vs. air Reynolds number of pure water and 50 vol% glycerol solution a) $Re_{\text{water}} = 0$ , b) $Re_{\text{solution}} = 0$ , c) $Re_{\text{water}} = 293$ , d) $Re_{\text{solution}} = 307$ , e) $Re_{\text{water}} = 427$ , f) $Re_{\text{solution}} = 435$ , g) $Re_{\text{water}} = 560$ , h) $Re_{\text{solution}} = 50$ , i) $Re_{\text{water}} = 1628$ .	52
4.6 Bubble size diameter in a) air-pure water mixture, b) air-pure water mixture, c) air-50 vol% glycerol solution mixture, d) air-50 vol% glycerol solution mixture, e) air-50 vol% glycerol solution mixture.	57
4.7 Comparison between the theory and the measured pressure gradient for air-pure water mixture a) bubble flow regime, b) slug flow regime, c) annular and mist flow regime.	59
4.8 Comparison between the theory and the measured pressure gradient for air-50 vol% glycerol solution mixture a) bubble flow regime, b) slug flow regime, c) annular and mist flow regime.	61