

## แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายการไหลท่วมของกระแสไหล สวนกันของของเหลวและก๊าซในท่อเอียง

รังสี ธนาภรณ์\* , สมชาย วงศ์วิเศษ  
ศูนย์วิจัยกลศาสตร์ของไหลและเครื่องจักรเทอร์โบ (FUTURE)  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

### บทคัดย่อ

การไหลสวนกันของของเหลวและก๊าซเป็นรูปแบบหนึ่งของการไหลสองสถานะ (Two Phase Flow) ในการไหลสวนกันของของไหลสองสถานะในท่อซึ่งวางในแนวเอียง ของเหลวจะไหลเป็นชั้นผ่านลงมาตามผนังของท่อและก๊าซไหลสวนทางขึ้นไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของของเหลวหรือก๊าซแล้วไม่ทำให้รูปแบบของการไหลเปลี่ยนแปลง แสดงว่าสภาวะนั้นยังสมดุลต่อการไหลสวนกัน แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของของไหลจนกระทั่งถึงจุดที่เรียกว่าการไหลท่วมของกระแสไหลสวน (Countercurrent Flooding) หรือจุดจำกัดในการไหลสวนกัน (Countercurrent Flow Limitation: CCFL) รูปแบบของการไหลจะเปลี่ยนจากการไหลสวนกันเป็นการไหลตามกัน

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการจำกัดในการไหลสวนกันของของเหลวและก๊าซในท่อที่วางอยู่ในแนวเอียงจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้จากสมการสมดุลย์โมเมนตัมของของไหลทั้งสอง ประกอบกับพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่ได้จากงานวิจัยในอดีต เช่น ความเค้นเฉือนที่ผนังท่อ และที่ผิวสัมผัสของของไหลทั้งสอง ตลอดจนสมการซึ่งแสดงสมมุติฐานในการเกิด CCFL ความสัมพันธ์ทั้งหมดจะถูกนำมาประกอบกันเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับใช้ทำนายการจำกัดในการไหลสวนกันของของเหลวและก๊าซในท่อเอียง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมา สามารถใช้ศึกษาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของระบบได้โดยไม่ได้ใช้การทดลองเข้าช่วย จากงานวิจัยนี้พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถทำนาย CCFL ได้ โดยที่มุมเอียงของท่อที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลกระทบต่อเกิดการเกิด CCFL ในช่วงที่มุมเอียงของท่อปานกลาง ( $30^{\circ}$  -  $60^{\circ}$  จากแนวนอน) ผลกระทบของมุมเอียงที่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อการเกิด CCFL ไม่มากนัก แต่เมื่อมุมเอียงของท่อเข้าใกล้แนวตั้งมากขึ้น ( $70^{\circ}$  -  $80^{\circ}$  จากแนวนอน) ผลกระทบของมุมเอียงที่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อการเกิด CCFL มากขึ้น เนื่องจากมุมเอียงของท่อที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## บทนำ

เราจะพบการไหลสองสถานะของของเหลวและก๊าซอยู่ตลอดเวลาในขบวนการทางอุตสาหกรรม เช่นในอุตสาหกรรมเคมี, โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนและอื่นๆ การไหลสวนกันของของเหลวและก๊าซเป็นรูปแบบหนึ่งของการไหลสองสถานะ ในการไหลสวนกันของของไหลสองสถานะในท่อซึ่งวางในแนวเอียงของเหลวจะไหลเป็นแผ่นบางผ่านลงมาตามผนังของท่อและก๊าซไหลสวนทางขึ้นไป เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของของเหลวและก๊าซแล้วไม่ทำให้รูปแบบของการไหลเปลี่ยนแปลง แสดงว่าสภาวะนั้นยังสมดุลต่อการไหลสวนกัน แต่ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของของไหลจนกระทั่งถึงจุดที่เรียกว่าจุดจำกัดในการไหลสวนกัน(Countercurrent flow limitation: CCFL) รูปแบบของการไหลจะเปลี่ยนจากการไหลสวนกันเป็นการไหลตามกัน

ได้มีการศึกษากันพอสมควรทั้งทฤษฎีและการทดลองของการไหลสวนกันของของไหลสองสถานะ โดยเฉพาะกรณีของท่อที่วางอยู่ในแนวตั้ง Wallis et.al. [1] ศึกษาพบว่าขนาดของท่อและสภาวะของทางเข้าออกของของเหลวและก๊าซ เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิด CCFL

Tien et.al. [2] ศึกษาถึงผลกระทบของขนาดท่อและลักษณะทางเข้าและทางออกของของเหลวที่มีต่อการเกิด CCFL ในท่อที่วางอยู่ในแนวตั้ง พบว่าเมื่อทำการออกแบบลักษณะทางเข้าให้มีผลกระทบให้น้อยที่สุดแล้ว ผลจากแรงกระทำระหว่างผิวสัมผัสของของเหลวและก๊าซ และขนาดท่อที่เปลี่ยนไปไม่ใช่ ผลกระทบหลักของการเกิด CCFL เมื่อเปลี่ยนลักษณะของทางเข้าของของเหลวและก๊าซเป็นแบบ Sharp edge inlet CCFL จะเกิดขึ้นที่บริเวณทางเข้าของของเหลว เนื่องจากผลของความหนาของของเหลวที่บริเวณทางเข้า เมื่อทางเข้าของของเหลวมีลักษณะที่ไม่ราบเรียบ ขนาดของท่อที่เปลี่ยนแปลงไป จะเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกปัจจัยหนึ่งต่อการเกิด CCFL

Hewitt [3] ศึกษาการเกิด CCFL ของท่อที่วางอยู่ในแนวเอียงและมีลักษณะทางเข้าของของเหลวแบบรูพรุน( porous section ) และทางออกของของเหลวสองรูปแบบคือแบบปลายตัดตรงและแบบปลายตัดทำมุม  $30^{\circ}$  พบว่าทางออกของของเหลวและมุมของท่อที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อการเกิด CCFL ที่ความเร็วของก๊าซคงที่ความเร็วของของของเหลวที่ CCFL จะสูงขึ้นเมื่อมุมเอียงของท่อเพิ่มขึ้นจากแนวนอน และท่อที่มีทางออกของของเหลวแบบปลายตัดทำมุม  $30^{\circ}$  จะทำให้ความเร็วของของเหลวที่ CCFL สูงกว่าท่อที่มีทางออกของของเหลวแบบปลายตัดตรง

Lee and Bankoff [4] ทำการศึกษาถึงผลกระทบจากการก่อกวนตัวของน้ำต่อการเกิด CCFL ในท่อหน้าตัดรูปทรงเหลี่ยมที่วางอยู่ในแนวเอียง โดยทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของเหลว

ที่จ่ายเข้าสู่ท่อทดสอบ พบว่าเมื่อท่อมีขนาดยาวอุณหภูมิของของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไม่มีผลต่อการเกิดCCFL และที่ความเร็วของก๊าซคงที่ความเร็วของของเหลวที่CCFL จะสูงขึ้น เมื่อมุมเอียงของท่อลดลงจากแนวนอนและเมื่อหน้าตัดท่อมีขนาดใหญ่ขึ้น

Barnea et.al. [5] ศึกษาถึงผลกระทบของทางเข้าและทางออกของของเหลวสองรูปแบบคือทางเข้าเป็นรูพรุน (porous section) และการใช้ท่อเล็กส่งของเหลวเข้าไป (inner tube section) ที่มีต่อการเกิดCCFL ของท่อที่วางในแนวเอียง พบว่าทางเข้าแบบรูพรุนและมุมเอียงมีผลต่อการเกิดCCFL เนื่องจากทางเข้าแบบรูพรุนทำให้เกิด local hump ซึ่งจะหายไปเมื่อมุมเอียงของท่อเพิ่มขึ้นและมุมเอียงที่เปลี่ยนแปลงทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลทั้งสองเปลี่ยนแปลงไป

Beckmann and Mewes [6] ศึกษาถึงการเกิดCCFL ในท่อเอียง พบว่าท่อที่มีมุมเอียงน้อยจากแนวนอน ( $5^{\circ}$ - $20^{\circ}$ ) มุมเอียงของท่อที่เปลี่ยนแปลงมีผลต่อการเกิดCCFL มากกว่าท่อที่มีมุมเอียงปานกลางจากแนวนอน ( $25^{\circ}$ - $50^{\circ}$ ) และที่ความเร็วของก๊าซคงที่ความเร็วของของเหลวที่CCFL จะสูงขึ้นเมื่อมุมเอียงของท่อเพิ่มขึ้น

Gardner [7] ได้พัฒนาบรรทัดฐานสำหรับทำนายการเกิดCCFLของเหลวและก๊าซในท่อที่อยู่ในแนวนอน ซึ่งปรับปรุงจากบรรทัดฐานของ Wallis [1] โดยนำอัตราส่วนของความหนาแน่นของของเหลวมาเพิ่มเติมจากบรรทัดฐานเดิม

Daly and Harlow [9] ได้ศึกษาระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของการไหลสวนกันของน้ำและไอน้ำในท่อขนาดใหญ่ที่วางอยู่ในแนวนอน เพื่อหาข้อมูลสำหรับอธิบายถึงการแลกเปลี่ยนกันของมวล,โมเมนตัม และ พลังงาน ระหว่างของไหลสองสถานะในขณะที่มีการจ่ายน้ำเข้าสู่ระบบท่อใน Nuclear Power Plant

Shearer and Davidson [10] , Centinbudakler and Jameson [11] และ Imura et.al. [12] ทำการศึกษาทฤษฎีที่ใช้ทำนายการเกิดCCFL และได้แนะนำว่าการเริ่มต้นของCCFLจะเกิดขึ้นเนื่องจากเกิดคลื่นในการไหลสวนกันอย่างรวดเร็ว

Wallis et.al. [13] อธิบายถึงรูปแบบของฟิล์มของเหลวสำหรับการไหลสวนกันในท่อที่วางอยู่ในแนวตั้ง ซึ่งพบว่าความหนาของของเหลวในท่อเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลกระทบต่อ การเกิดCCFL

เนื่องจากในปัจจุบันการศึกษาถึงการไหลสวนกันของของไหลในท่อเอียงยังไม่แพร่หลายเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาสำหรับท่อในแนวตั้งและในแนวราบ ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาการเกิดCCFLของเหลวและก๊าซในท่อที่วางอยู่ในแนวเอียงจากแบบจำลองทางคณิต-

ศาสตร์ซึ่งได้จากสมการสมดุลโมเมนตัมของของไหลทั้งสองประกอบกับตัวพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองในอดีต เช่น ความเค้นเฉือนที่ผนังท่อและที่ผิวสัมผัสของของไหลทั้งสอง ตลอดจนสมการซึ่งแสดงสมมุติฐานในการเกิดCCFL โดยใช้อากาศแทนก๊าซ และน้ำแทนของเหลวผลลัพธ์ที่ได้จะถูกใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ในระบบที่มีการไหลสวนกันของของไหลสองสถานะ

#### แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ก่อนที่จะเกิดCCFLขึ้นในท่อที่วางอยู่ในแนวเอียงการไหลของของไหลจะอยู่ในรูปของการไหลแบบแบ่งแยกชั้นซึ่งเราสามารถหาความสัมพันธ์ของการไหลได้จากสมการสมดุลโมเมนตัมในสภาวะสม่ำเสมอ (steady state momentum balance) จากรูปที่ 1 เราจะได้

$$-\tau_L S_L - \tau_i S_i + A_L \rho_L g \sin \beta - A_L \frac{dp}{dx} = 0 \quad (1)$$

$$\tau_G S_G + \tau_i S_i + A_G \rho_G g \sin \beta - A_G \frac{dp}{dx} = 0 \quad (2)$$

จากการรวมสมการที่ (1) และ (2) จะทำให้สามารถกำจัด  $\frac{dp}{dx}$  ออกไปได้ และได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\tau_G \frac{S_G}{A_G} + \tau_L \frac{S_L}{A_L} + \tau_i \left( \frac{S_i}{A_G} + \frac{S_i}{A_L} \right) - (\rho_L - \rho_G) g \sin \beta = 0 \quad (3)$$

โดยที่ Shear Stress หาได้จาก

$$\tau_L = f_L \frac{\rho_L U_L^2}{2}$$

$$\tau_G = f_G \frac{\rho_G U_G^2}{2} \quad (4)$$

$$\tau_i = f_i \frac{\rho_G (U_G + U_L)^2}{2}$$

friction factor ของก๊าซและของเหลวจะหาได้จาก

$$f_L = C_L \left( \frac{D_L U_L}{\nu_L} \right)^m$$

(5)

$$f_G = C_G \left( \frac{D_G U_G}{\nu_G} \right)^n$$

$D_L$  และ  $D_G$  คือ hydraulic diameter ซึ่งถูกตั้งขึ้นโดย Agrawal et.al.[13]

$$D_L = \frac{4A_L}{S_L}$$

(6)

$$D_G = \frac{4A_G}{S_G + S_i}$$

ความเร็วของของเหลว และก๊าซจะหาได้จาก

$$U_L = \frac{U_{LS} A}{A_L}$$

(7)

$$U_G = \frac{U_{GS} A}{A_G}$$

ค่า  $A_L$ ,  $A_G$ ,  $S_L$ ,  $S_G$  และ  $S_i$  เป็นปริมาณเชิงเรขาคณิตของรูปทรงจะขึ้นอยู่กับ ระดับของของเหลวที่สมดุล  $h_L$  และ  $f_i$ ,  $f_L$ ,  $f_G$ ,  $C_L$ ,  $C_G$ ,  $m$  และ  $n$  เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองในอดีต

สมการที่ (3) ถึงสมการ (6) ใช้สำหรับหาระดับของของเหลวที่จุดสมดุลซึ่งสามารถหาได้จาก วิธี iterative technique

พารามิเตอร์สำหรับกรณีการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบอลวน จะให้ไว้ดังนี้

กรณีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)  $C_G = C_L = 16$

$$n = m = 1.0$$

กรณีการไหลแบบอลวน (turbulent flow)  $C_G = C_L = 0.046$

$$n = m = 0.2$$

ในกรณีของ stratified smooth flow เราอาจจะสามารถหาค่าของ friction factor โดยใช้ค่า friction factor ของท่อเรียบแทนได้ กรณี wavy interface ก็จะสามารถหาได้ด้วยวิธีเดียวกัน สำหรับกรณีการไหลในแนวตั้งและแนวเอียงนั้น Wallis et.al.[1] ได้แนะนำค่าที่แสดงความสัมพันธ์ของ interfacial friction factor ในเทอมของความหนาของฟิล์มเฉลี่ย (average film thickness) หรือ Void fraction ไว้ดังนี้

$$f_i = a + b(1 - \alpha)^n \quad (8)$$

โดยที่

$a$  คือ interfacial friction factor ของการไหลในท่อที่ไม่มีของเหลว

$b(1 - \alpha)^n$  คือ ส่วนเสริมที่ได้มาจาก film waviness และ Momentum exchange ซึ่งทำให้เกิด interfacial shear

สำหรับกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อเท่ากับ 0.051 เมตร Wallis et.al.[1] ได้แนะนำให้ใช้ค่า  $a = 0.005$ ,  $b = 24$  และ  $n = 2.04$

กรณีการไหลสวนกันในท่อเอียงนั้นค่า interfacial friction factor ไม่สามารถหาได้ด้วยวิธีข้างต้น Cohen and Hanratty [14] ได้แนะนำให้ใช้  $f_i = 0.0142$  Gazley [15] แนะนำสำหรับการไหลตามกันแบบราบเรียบ ในกรณีที่ความเร็วของก๊าซมีค่ามากกว่าความเร็วของของไหลมาก ๆ ค่าของ  $f_i$  จะเท่ากับ  $f_G$

การวิเคราะห์การเกิดCCFLในท่อซึ่งวางอยู่ในแนวเอียงจะเริ่มพิจารณาจากการไหลสวนกันแบบแยกชั้น โดยที่ของเหลวจะไหลเป็นแผ่นบางผ่านลงมาตามผนังของท่อและก๊าซไหลสวนทางขึ้นไป ที่ผิวสัมผัสของของไหลจะมีคลื่นเกิดอยู่ที่ผิวของเหลวเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดลดลง ก๊าซจะมีอัตราเร่งเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้คลื่นมีขนาดโตขึ้นส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลขึ้นที่ผิวสัมผัสของของไหลทั้งสองจนกระทั่งสามารถเอาชนะแรงโน้มถ่วง รูปแบบของการไหลจะเปลี่ยนไปจากการไหลสวนกันเป็นการไหลตามกัน Taitel and Dukler[16] แนะนำให้ใช้ข้อจำกัดสำหรับกรณี unstable interface ซึ่งคลื่นจะยังคงมีขนาดใหญ่ขึ้นและของเหลวจะถูกกวาดไปในทิศทางของการไหลของก๊าซในรูปของ slug หรือ waves ไว้ดังนี้

$$U_G = \left(1 - \frac{h_L}{D}\right) \left[ \frac{(\rho_L - \rho_G)g \cos \beta A_G}{\rho_G dA_L / dh_L} \right]^{1/2} \quad (9)$$

โดยที่เราสามารถหา  $dA_L / dh_L$  ได้จาก

$$dA_L / dh_L = \sqrt{1 - (2h_L - 1)^2} \quad (10)$$

สมการทั้งหมดจะถูกนำมาประกอบกันเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการจำกัดในการไหลสวนกัน flow chart ของการคำนวณแสดงได้ดังรูปที่ 2

#### ผลจากแบบจำลอง

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นโดยใช้ อากาศแทนก๊าซ และน้ำแทนของเหลวที่อุณหภูมิเฉลี่ย  $30^{\circ}$  ในท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.051 เมตร ที่มุมเอียงของท่อตั้งแต่  $30^{\circ}$ - $80^{\circ}$  จากแนวนอน แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3 ถึง 8 โดยแสดงผลของสภาวะในการเกิดCCFL ในเทอมของความเร็วเทียบของน้ำ ( $U_{LS}$ ) และความเร็วเทียบของอากาศ ( $U_{GS}$ ) ซึ่งเป็นเทอมที่นิยมใช้กันในสาขาวิชานี้และสามารถหาได้โดยการนำอัตราไหลของของไหลแต่ละชนิดหารด้วยพื้นที่หน้าตัดของท่อ

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่ได้ (รูปที่ 3 ถึง 8) พบว่าแนวโน้มการเกิดCCFL จะเป็นไปในทางเดียวกัน คือที่ความเร็วของอากาศต่ำกว่าความเร็วของน้ำที่CCFL จะสูง และที่ความเร็วของอากาศสูงความเร็วของน้ำที่CCFL จะต่ำ เมื่อแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองช่วงคือ ที่มุมเอียงของท่อปานกลาง  $30^{\circ}$ - $60^{\circ}$  จากแนวนอน ( รูปที่ 3 ถึง 6 ) และที่มุมเอียงของท่อสูง  $70^{\circ}$ - $80^{\circ}$  จากแนวนอน ( รูปที่ 7 ถึง 8 ) พบว่าในช่วงแรกที่ความเร็วของอากาศคงที่ พบว่าความเร็วของน้ำที่CCFL จะสูงขึ้นเมื่อมุมเอียงของท่อเพิ่มมากขึ้น ในช่วงที่สองที่มุมเอียงของท่อ  $70^{\circ}$  ( รูปที่ 7 ) ที่ความเร็วของอากาศคงที่ในช่วงต่ำถึงปานกลางความเร็วของน้ำที่CCFL จะต่ำกว่าที่มุมเอียง  $80^{\circ}$  ( รูปที่ 8 ) และที่ความเร็วของอากาศคงที่ในช่วงปานกลางถึงสูงความเร็วของน้ำที่CCFL จะสูงกว่าที่มุมเอียง  $80^{\circ}$  เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างช่วงแรกและช่วงที่สอง พบว่าที่ความเร็วของอากาศคงที่ในช่วงต่ำถึงปานกลางความเร็วของน้ำที่CCFL ในช่วงแรกจะต่ำกว่าในช่วงที่สอง และที่ความเร็วของอากาศคงที่ในช่วงปานกลางถึงสูงความเร็วของน้ำที่CCFL ในช่วงแรกจะสูงกว่าในช่วงที่สอง ผลกระทบของมุมเอียงในช่วงแรกนั้นมุมเอียงที่เปลี่ยนแปลงไป จะมีผลต่อการเกิดCCFL ไม่มากนัก แต่เมื่อท่อมีมุมเอียงใกล้เคียงแนวตั้งมากขึ้น ผลกระทบของมุมเอียงที่เปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อการเกิดCCFL มากขึ้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากมุมเอียงของท่อที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีผลต่อค่าพารามิเตอร์ ในสมการที่ (3) และ (10) และเมื่อมุมเอียงของท่อใกล้เคียงแนวตั้งมากรูปแบบของการไหลจะเปลี่ยนจากการไหลแบบแยกชั้นเป็นการไหลแบบวงแหวนทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลทั้งสองมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนรูปแบบของการไหลนั้นจะขึ้นกับความเร็วของของไหลทั้งสองด้วย

## สรุป

การศึกษาการเกิดCCFL จากแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ที่สร้างขึ้นมาสามารถใช้ทำนายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยปราศจากการทดลอง ผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า

1.การเกิดCCFL จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือในช่วงความเร็วของอากาศต่ำ ความเร็วของน้ำที่CCFL จะสูง และในช่วงความเร็วของอากาศสูงความเร็วของน้ำที่CCFL จะต่ำ

2.ที่มุมเอียงของท่อปานกลาง  $30^{\circ}$ - $60^{\circ}$  จากแนวนอน เมื่อพิจารณาที่ความเร็วของอากาศคงที่ พบว่าความเร็วของน้ำจะสูงขึ้น เมื่อมุมเอียงของท่อเพิ่มมากขึ้น

3.ที่มุมเอียงของท่อสูง  $70^{\circ}$ - $80^{\circ}$  จากแนวนอน เมื่อพิจารณา ที่ความเร็วของอากาศคงที่ พบว่าในช่วงที่ความเร็วของอากาศต่ำท่อที่มีมุมเอียง  $70^{\circ}$  จะมีความเร็วของน้ำที่CCFL ต่ำกว่าท่อที่มีมุมเอียง  $80^{\circ}$  และในช่วงที่ความเร็วของอากาศสูงท่อที่มีมุมเอียง  $70^{\circ}$  จะมีความเร็วของน้ำที่CCFL สูงกว่าท่อที่มีมุมเอียง  $80^{\circ}$

4.เมื่อเปรียบเทียบผลระหว่างท่อที่มีมุมเอียงปานกลาง และท่อที่มีมุมเอียงสูงเมื่อพิจารณาที่ความเร็วของอากาศคงที่พบว่า ในช่วงที่ความเร็วของอากาศต่ำ ความเร็วของน้ำที่CCFL ของท่อที่มีมุมเอียงปานกลางจะต่ำกว่าท่อที่มีมุมเอียงสูง และในช่วงที่ความเร็วของอากาศสูงความเร็วของน้ำที่CCFL ของท่อที่มีมุมเอียงปานกลาง จะสูงกว่าท่อที่มีมุมเอียงสูง

สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากมุมเอียงของท่อที่เปลี่ยนไป นั้นจะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลทั้งสองเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังสมการที่ (3) และสมการที่ (10)

ที่มุมเอียงของท่อปานกลางผลกระทบของมุมเอียงที่เปลี่ยนแปลงไป จะไม่แตกต่างกันมากนัก แต่จะมีผลกระทบมากขึ้นเมื่อมุมเอียงของท่อเข้าใกล้แนวตั้งมากขึ้น และเพื่อให้มั่นใจในการจำลองแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมาจำเป็นต้องมีผลลัพธ์จากการทดลองมา ยืนยันผล ซึ่งจะได้นำเสนอในโอกาสต่อไป



รายการสัญลักษณ์

- $A$  = พื้นที่หน้าตัดของท่อ,  $m^2$   
 $A_L$  = พื้นที่หน้าตัดของของเหลว,  $m^2$   
 $A_G$  = พื้นที่หน้าตัดของก๊าซ,  $m^2$   
 $a$  = ค่าคงที่สำหรับสมการที่(8)  
 $b$  = ค่าคงที่สำหรับสมการที่(8)  
 $C$  = ค่าคงที่ของสัดส่วนแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส  
 $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางท่อ,  $m$   
 $D_L$  = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของของเหลว,  $m$   
 $D_G$  = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกของก๊าซ,  $m$   
 $f_L$  = แฟคเตอร์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของของเหลวและผิวท่อ  
 $f_G$  = แฟคเตอร์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของของก๊าซและผิวท่อ  
 $f_i$  = แฟคเตอร์แรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสของของเหลวและก๊าซ  
 $g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก,  $m/วินาที^2$   
 $h_L$  = ระดับของของเหลวภายในท่อ,  $m$   
 $m$  = ค่าคงที่ในสมการของแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส  
 $n$  = ค่าคงที่ในสมการของแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส  
 $P$  = ความดัน, นิวตัน/ $m^2$   
 $S_L$  = Perimeter ระหว่างของเหลวและผิวท่อ,  $m$   
 $S_G$  = Perimeter ระหว่างของก๊าซและผิวท่อ,  $m$   
 $S_i$  = Perimeter ระหว่างของเหลวและก๊าซ,  $m$   
 $U_L$  = ความเร็วเฉลี่ยของของเหลว,  $m/วินาที$   
 $U_G$  = ความเร็วเฉลี่ยของก๊าซ,  $m/วินาที$   
 $U_{LS}$  = ความเร็วเทียบของของเหลว,  $m/วินาที$   
 $U_{GS}$  = ความเร็วเทียบของก๊าซ,  $m/วินาที$   
 $\alpha$  = ค่าคงที่ในสมการที่(8)  
 $\beta$  = มุมเอียงของส่วนทดสอบ, องศา  
 $V_L$  = ความหนืดจลน์ศาสตร์ของของเหลว,  $m^2/วินาที$   
 $V_G$  = ความหนืดจลน์ศาสตร์ของก๊าซ,  $m^2/วินาที$

$\rho_L$  = ความหนาแน่นของของเหลว, ก.ก./ม<sup>3</sup>

$\rho_G$  = ความหนาแน่นของก๊าซ, ก.ก./ม<sup>2</sup>

$\tau_L$  = แรงเฉือนระหว่างของเหลวและผิวท่อ, นิวตัน/ม

$\tau_G$  = แรงเฉือนระหว่างก๊าซและผิวท่อ, นิวตัน/ม<sup>2</sup>

$\tau$  = แรงเฉือนระหว่างของเหลวและก๊าซ, นิวตัน/ม<sup>2</sup>

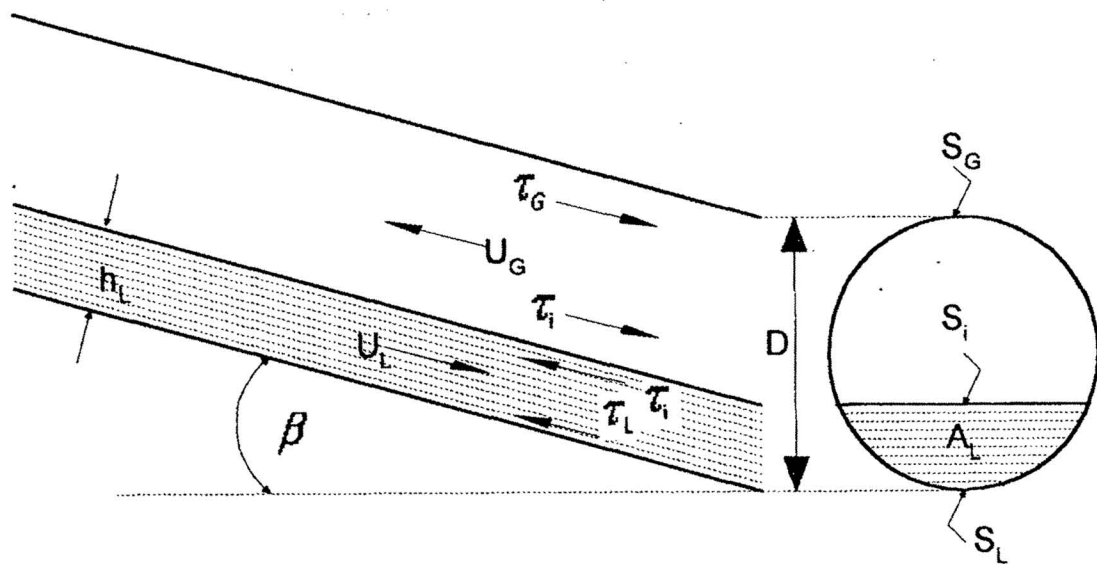
#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว) ที่ได้สนับสนุนด้านการเงินในการดำเนินงาน (ทุนวิจัยเลขที่ RSA 3880019)

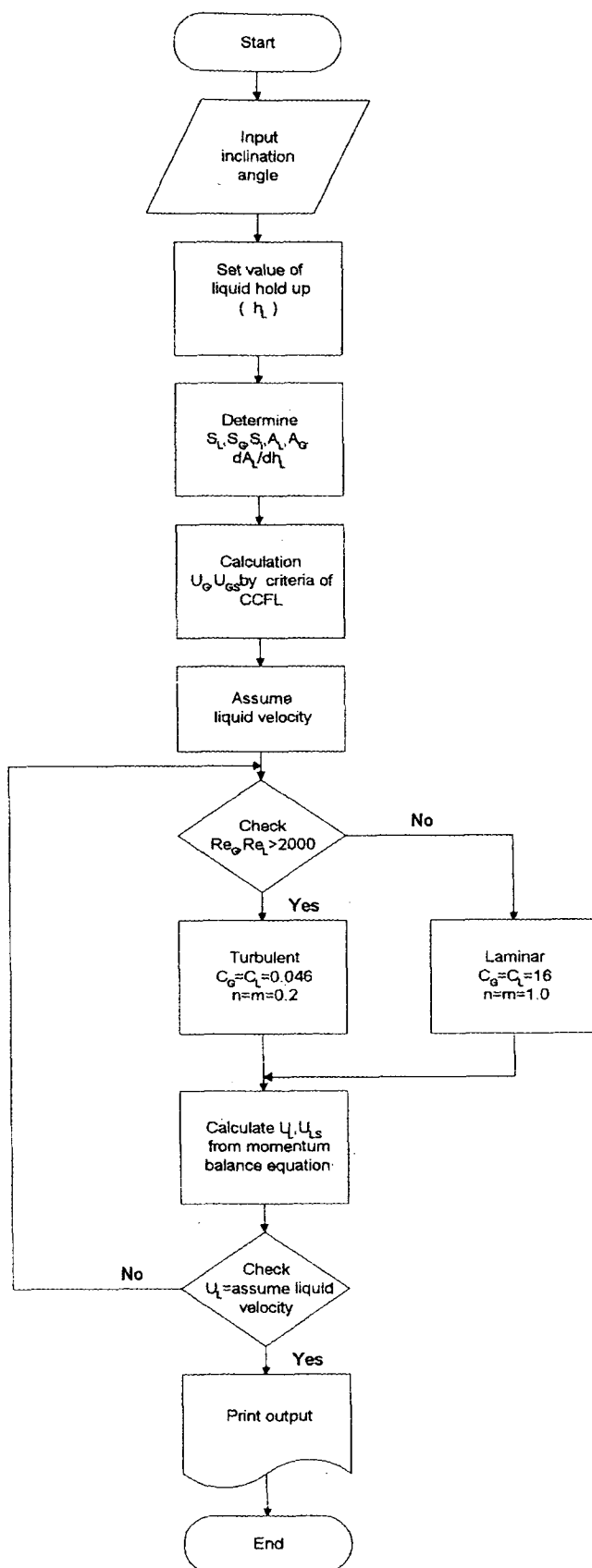
เอกสารอ้างอิง

1. Wallis, G.B., Richter, H.J. and Bharathan, D., 1979, "Air-Water Countercurrent Annular Flow, " Electric Power Research Institute Rep., EPRI NP-1165.
2. Tien, C.L., Chung, K.S., and Liu, C.P., 1980, "Flooding in Two Phase Countercurrent Flows, " Physico Chemical Hydrodynamics, No. 1, pp. 195-220.
3. Hewitt, G.F., 1977, "Influence of End Condition, Tube Inclination and Fluid Physical Properties on Flooding Gas-Liquid Flows, " Harwall Report, HTFS-RS222.
4. Lee, S.C. and Bankoff, S.G., 1983, "Stability of Steam-Water Countercurrent Flow in an Inclined Channel: Flooding, " J. Heat Transfer, No.105, pp. 713-718.
5. Barner, D., Shoham, O. and Taitel, Y., 1982, "Flow Pattern Transition for Downward Inclined Two Phase Flow: Horizontal to Vertical, " Chemical Engineering Science, No. 37, pp. 735-740.
6. Beckmann, H and Mewes, D , 1991, "Experimental Studies of Countercurrent Flow in Inclined Tubes, " European Two Phase Flow Group Meeting.
7. Gardner, G.C., 1983, "Flooded Countercurrent Two-Phase Flow in Horizontal Tubes and Channel, " Int.J.Multiphase Flow, Vol.9, No.4, pp. 367-382.
8. Hewitt, G.F., Lacey, P.M.C. and Nicholis, B., 1965, "Transition in Film Flow in a Vertical Tube, " AERE-R 4614.
9. Daly, B.J. and Harlow, F.H., 1981, "A Model of Countercurrent Steam-Water Flow in Large Horizontal Pipes, " Nuclear Science and Engineering, No.77, pp. 273-284.
10. Shearer, C.J. and Davidson, J.F., 1965, "The Investigation of Standing Wave Due to Gas Blowing Upward Over a Liquid Film; Its Relation to Flooding in Watted Wall Columns, " J. Fluid Mechanic, No. 22, pp. 321-335.
11. Centinbudakler, A.G. and Jameson, G.J., 1969, "The Mechanism of Flooding in Vertical Countercurrent Two Phase Flow, " Chemical Engineering Science, No.24, pp. 1669-1680.
12. Imura, H., Kusuda, H. and Fanotsu, S., 1977. "Flooding Velocity in a Countercurrent Annular Two-Phase Flow, " Chemical Engineering Science, No.32, pp. 49-87.

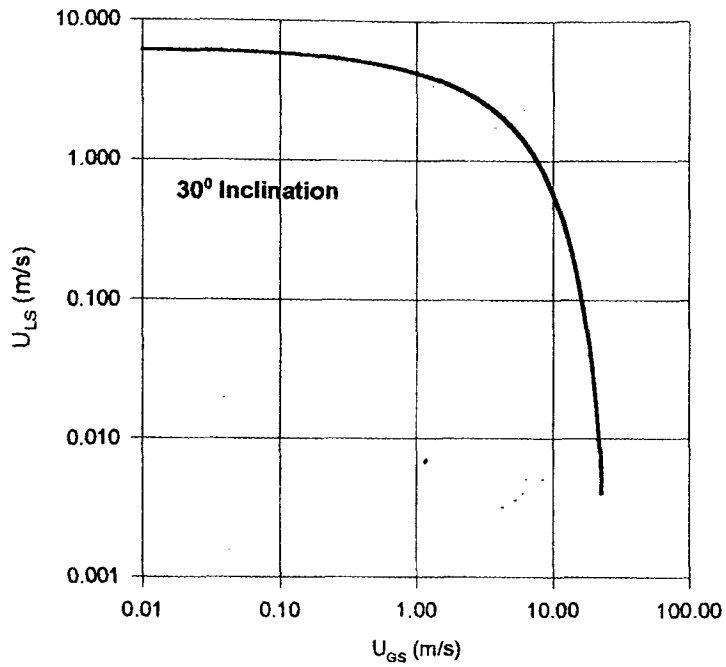
13. Agrawal, S.S., Gregory, G.A., and Govier, G.W., 1973 "An analysis of horizontal stratified two-phase flow in pipes, " *Can. J. Chem. Eng.*, No.51, pp. 280-286.
14. Gazley, C., 1964. "Interfacial Shear and Stability in Two-Phase Flow, "PhD thesis, University of Delaware., New York.
15. Choen, S.L. and Hanratty, T.J., 1968, "Effect of Waves at a Gas-Liquid Interface on a Turbulent Airflow, " *Fluid Mechanics*, No.31, pp. 467-469.
16. Taitel, Y. and Dukler, A.E., 1976, "A Model for Predicting Flow Regime Transition in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow, " *AIChE*, pp. 47-55.
17. Wallis, G.B., Richter, H.J. and Bharathan, D., 1978, "Air-Water Countercurrent Annular Flow in Vertical Tubes, " *Electric Power Research Institute Rep.*, EPRI NP-786.



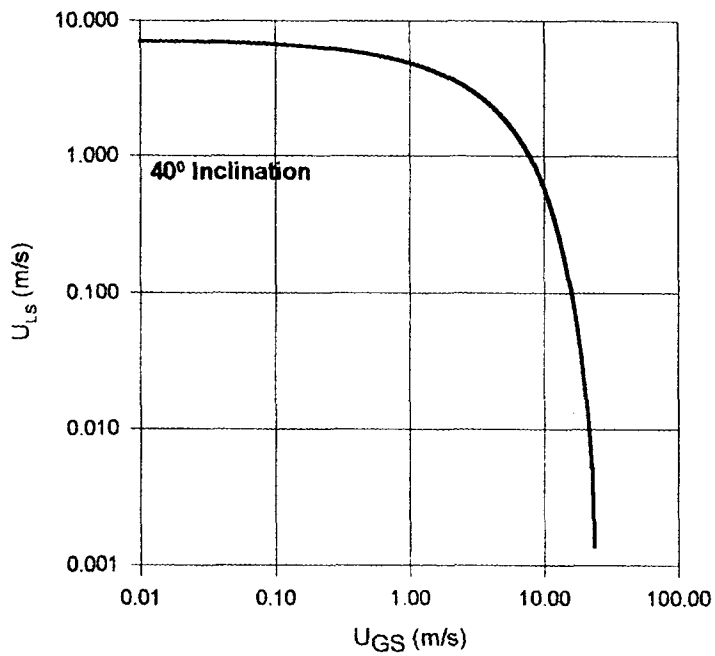
รูปที่ 1 การไหลสวนกันของของไหลสองสถานะแบบแยกชั้น



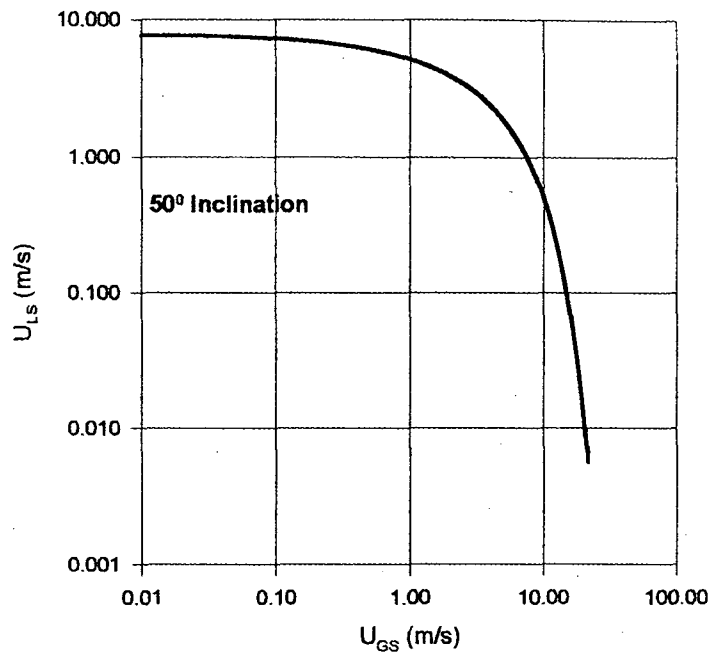
รูปที่ 2 แผนภูมิโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณจุดจำกัดในการไหลสวนกันของของเหลวและก๊าซในท่อเอียง



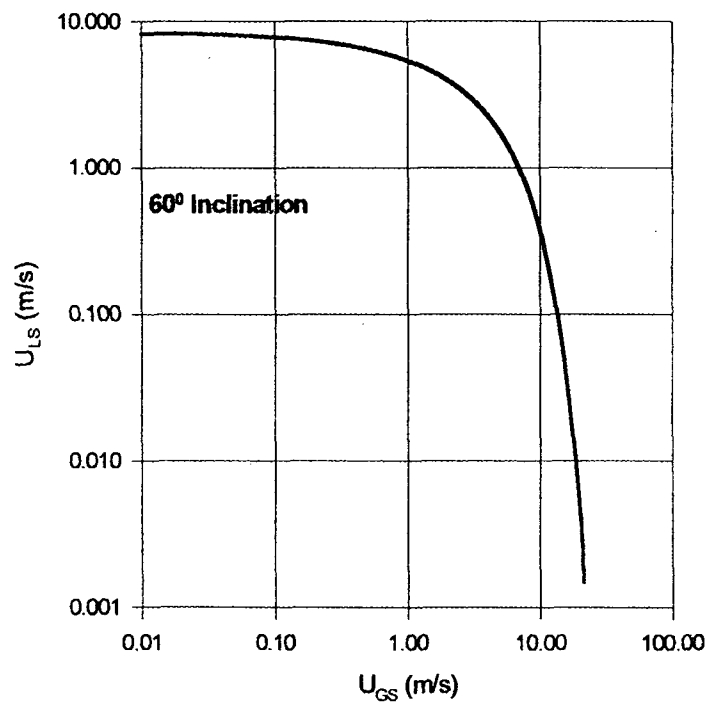
รูปที่ 3 แสดงจุดจำกัดในการไหลสวนกันของอากาศและน้ำในท่อขนาด  $d = 0.051$  เมตร ที่มุมเอียง 30 องศา



รูปที่ 4 แสดงจุดจำกัดในการไหลสวนกันของอากาศและน้ำในท่อขนาด  $d = 0.051$  เมตร ที่มุมเอียง 40 องศา

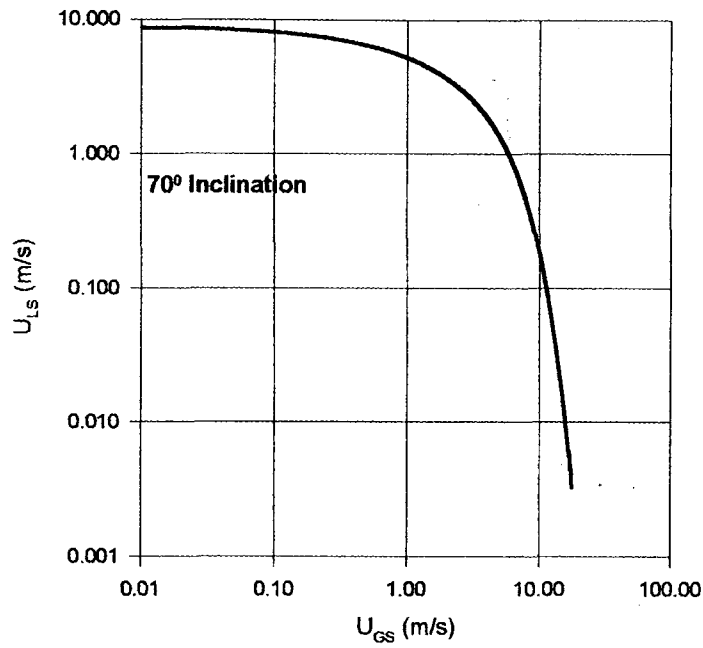


รูปที่ 5 แสดงจุดจำกัดในการไหลสวนกันของอากาศและน้ำในท่อขนาด  $d = 0.051$  เมตร  
ที่มุมเอียง 50 องศา

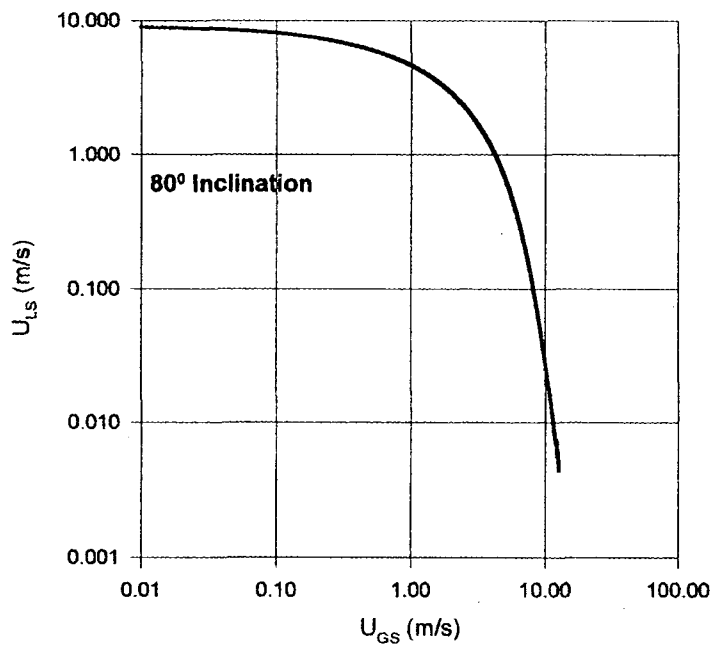


รูปที่ 6 แสดงจุดจำกัดในการไหลสวนกันของอากาศและน้ำในท่อขนาด  $d = 0.051$  เมตร  
ที่มุมเอียง 60 องศา





รูปที่ 7 แสดงจุดจำกัดในการไหลสวนกันของอากาศและน้ำในท่อขนาด  $d = 0.051$  เมตร ที่มุมเอียง 70 องศา



รูปที่ 8 แสดงจุดจำกัดในการไหลสวนกันของอากาศและน้ำในท่อขนาด  $d = 0.051$  เมตร ที่มุมเอียง 80 องศา