บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา (Background study)

การศึกษาปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นรอบตัว ทั้งจากธรรมชาติและจากสิ่งอำนวยความสะดวกที่มนุษย์สร้างขึ้น เช่น การทรุดตัวของพื้นดิน การเกิดคลื่น การบวมตัวของของเหลวที่มีความหนืดในกระบวนการผลิตสายเคเบิล ท่อพีวีซีและภาชนะต่างๆ ที่ใช้ในครัวเรือน เป็นต้น นักวิทยาศาสตร์จำนวนมากได้ทำการค้นคว้าและทำการวิจัยเกี่ยวกับสิ่งต่างๆ เหล่านี้มาตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน เพื่ออธิบายถึงเหตุและผลของสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นรวมทั้งนำความรู้ที่ได้ไปปรับปรุงและพัฒนาสิ่งอำนวยความสะดวกเหล่านั้นให้ดีขึ้น

งานวิจัยทางด้านการยืดฟิลาเมนต์ (filament stretching) สำหรับปัญหาของของไหลวิสโคอีลาสติก (viscoelastic fluid) หรือของไหลที่มีความหนืดและยืดหยุ่นได้ เป็นปัญหาหนึ่งที่กำลังนิยมศึกษาอยู่ในปัจจุบันเกี่ยวกับพฤติกรรมการยืดของของไหล ทั้งในด้านการศึกษาทางรีโอโลยี (rheology) หรือเป็นการศึกษาการไหลและการผิดรูปของวัตถุ (deformation) และการศึกษาในเชิงอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตบางประเภท เช่น กระบวนการกดเป่าขึ้นรูปแผ่นบาง (blown film extrusion) การอัดรีดขึ้นรูปแผ่นบาง (sheet extrusion) และการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (vacuum forming) เพื่อประโยชน์ในการออกแบบขั้นตอนเหล่านั้น รวมทั้งนำองค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษามาอธิบายถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลที่ยืดออก ณ เวลาต่างๆ กัน จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์หาวิธีการต่างๆ เพื่อมาอธิบายถึงปรากฏการณ์เหล่านั้นโดยทำการทดลองและทำนายผลที่เกิดขึ้นด้วยการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (simulation)

ในปี 1990 Matta และ Tytus [1] เป็นกลุ่มแรกที่ได้ทำการทดลองปล่อยของไหลที่มีแผ่นโลหะ (plate) ติดอยู่ด้านล่างให้ตกลงมาตามแนวแรงโน้มถ่วงของโลก ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ออกจากแผ่นโลหะด้านบนในลักษณะที่คงตัวตามแนวแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity) และของไหลยืดออกเป็นลักษณะโค้งเว้าคล้ายสะพาน (liquid bridge) เชื่อมโยงระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง

อีก 3 ปีต่อมา Tirtaatmadja และ Sridha [2] ได้ทำการทดลองในลักษณะเดียวกับ Matta และ Tytus แต่เพิ่มการพิจารณาของไหลชนิดที่มีความหนืด (viscosity) ต่ำๆ จากการทดลองพบว่าที่แกนกลางของฟิลาเมนต์มีค่าอัตราการยืด (stretch rate) คงตัว เมื่อแผ่นโลหะเคลื่อนที่แยกออกจากกันด้วยอัตราการหดแบบเลขชี้กำลัง (exponential retraction rate) และอีก 2 ปีต่อจากนั้น พวกเขา [3] ได้ทำการเปรียบเทียบการใช้สมการองค์ประกอบ (constitutive equation) สำหรับสารละลายพอลิเมอร์ (polymer solution) ในการยืดแบบแกนเดียว (uniaxial extension)

ปี 1996 เป็นต้นมา มีผู้สนใจศึกษาปัญหาทางด้านนี้เพิ่มขึ้นอย่างแพร่หลาย ได้แก่ Spiegelberg et al. [4] ได้ทำการทดลองลดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นโลหะให้เล็กลงกว่าของ Tirtaatmadja และ Sridha เพื่อไม่ให้ยืดออกไปไกลเมื่อใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ (Rheometer) ที่เรียกว่า RDD (a reducing diameter device) ทำการทดลอง

Solomon และ Muller [5] ได้ศึกษาผลกระทบของของไหลโบเกอร์ (Boger fluid) ที่อยู่ในภาวะชั่วครู่ (transient) เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพของตัวทำละลาย (solvent) และองค์ประกอบทางเคมี (molecular weight)

Sizaire และ Legat [6] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขโดยใช้ตัวแบบ FENE-CR มาจำลองการยืดของไหลโบเกอร์ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากรีโอมิเตอร์โดยไม่คำนึงถึงผลกระทบของแรงโน้มถ่วงและความเฉื่อย (inertia) ของไหลที่ยืดออกไม่เป็นการยืดอย่างเดียว (purely extension) ดังนั้นจึงเกิดการศึกษาสมบัติของของไหลแต่ละชนิด โดยการนำเครื่องรีโอมิเตอร์ของ Tirtaatmadja และ Sridha มาใช้วัดของไหลที่มีความหนืดสูง และให้ข้อสรุปว่าความเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ (parameter) ที่ได้จากผลการทดลองที่นำมาใช้ในการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) ให้ผลที่ดีและสอดคล้องกับการทดลอง

ปี 1998 Yao และ McKinley [7] จากสถาบัน MIT ทำการศึกษาทำนองเดียวกับ Sizaire และ Legat ในการศึกษาครั้งนี้พวกเขาได้ทำการทดลองและทำการจำลองโดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อตรวจสอบผลการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลทั้งชนิดนิวโตเนียน (Newtonian) และชนิดวิสโคอีลาสติก โดยใช้วิธีชิ้นประกอบอันตะ (finite element method) แบบสี่เหลี่ยม 9 โนด ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีชื่อว่า POLYFLOW พร้อมทั้งใช้หลักการส่งเชิงวงรี (elliptic mapping) เพื่อปรับความเรียบ (smooth) ที่ผิวอิสระ (free surface) และใช้เทคนิคในการปรับโครงข่ายใหม่ (remesh) ของ Thompson [8] ซึ่งเป็นการจัดเรียงโนดที่อยู่ด้านในตามระยะของขอบที่กำลังเคลื่อนที่ (moving plate) วิธีการนี้จะใช้ความรู้จาก RDD ของ Spiegelberg et al. และความเร็วที่ใช้ตาม Tirtaatmadja และ Sridha โดยให้ข้อสรุปว่า รูปแบบการยืดของวัสดุไม่ได้ขึ้นกับค่าแรงดึงยืด (tensile force) เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับคุณสมบัติเฉพาะตัวของของไหลแต่ละชนิดด้วย

Gaudet และ McKinley [9] ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขถึงผลกระทบของผิวอิสระ และกำหนดแรงให้กับแผ่นโลหะทั้ง 2 แผ่นเมื่อแยกออกจากกันด้วยความเร็วคงตัว จนกระทั่งขาด (break-up) ออกจากกัน ของไหลนิวโตเนียนที่มีค่าความหนืดต่างๆ กัน โดยใช้วิธีการปริพันธ์เชิงขอบ (boundary integral method) และในปี 1998 พวกเขา [10] ได้ศึกษาเพิ่มเติมกับของไหลวิสโคอีลาสติกที่เรียกว่า ของไหลโบเกอร์ ซึ่งของไหลชนิดนี้เหมาะกับตัวแบบอ็อลดรอยบี (Oldroyd-B model) และนำผลที่ได้จากการศึกษาค่าความเครียดของเฮนคีย์ (Hencky strain) ค่าน้อยๆ มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองก่อนหน้านั้นของเขาซึ่งพบว่าได้ผลสอดคล้องกัน

Hassagar et al. [11] ศึกษาการไหลในรางน้ำ (ductile) สำหรับของไหลนิวโตเนียนและวิสโคอีลาสติก พวกเขาพบว่าการศึกษานี้ต้องคำนึงถึงแรงตึงผิว (surface tension) ถ้ามิฉะนั้นแล้วการทดลองจะล้มเหลว

ปี 1999 Kolte และ Szabo [12] ได้วิเคราะห์ถึงการยืดของฟิลาเมนต์ในหลอดรูเล็ก (capillary tube) ของของไหลนิวโตเนียนและวิสโคอีลาสติก โดยสร้างเครื่องมือวัดขึ้นมาใหม่มีชื่อว่า liquid filament rheometer (LFR) โดยยึดแผ่นโลหะด้านบน ในขณะที่แผ่นโลหะด้านล่างจะเคลื่อนที่ลงตามแนวแรงโน้มถ่วงของโลกและที่บริเวณตรงกลางของฟิลาเมนต์ หรือบริเวณที่พบว่ารัศมีของฟิลาเมนต์มีค่าน้อยที่สุดใช้กล้องวีดีโอจับภาพการเปลี่ยนแปลง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ได้ทำนายไว้

และในปีต่อมา Ainser et al. [13] ได้ทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการยืดของของไหลวิสโคอีลาสติก ภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก โดยใช้วิธีชิ้นประกอบอันตะของลากรานจ์ (Lagrange finite element) พร้อมกับใช้ตัวแบบของความเค้น (stress) ชนิดพีทีทีแบบหลายฐาน (multi-mode PTT model) ซึ่งจะใช้ค่าเวลาผ่อนคลาย (relaxation time) หลายค่า และทุกๆ ครั้งที่ปรับโครงข่ายใหม่จะแสดงเวกเตอร์ภาพฉายของความเร็ว (reprojection)

ในเร็วๆ นี้ M.S. Chandio et al. [14] ได้ทำการศึกษาเชิงตัวเลขกับของไหลนิวโตเนียน โดยใช้ระเบียบวิธีชิ้นประกอบอันตะแบบเซมิอิมพลิซิทเทย์เลอร์กาเลอร์คินเพรซเชอร์คอร์เรคชัน (semi-implicit Taylor-Galerkin/pressure-correction finite element method) ที่ได้มาจาก P. Townsend และ M.F. Webster [15][16] โดยแบ่งบริเวณที่ศึกษาออกเป็นชิ้นประกอบ (element) ย่อยๆ แบบสามเหลี่ยม 6 โนด หลักการที่พวกเขาใช้มีเสถียรภาพและความแม่นยำ (accuracy) เมื่อค่าความเครียดของเฮนคีย์มากขึ้น ในขณะที่ทำการปรับโครงข่ายใหม่ขณะยืดออก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการวิจัยที่ผ่านๆ มา และพร้อมกันนั้น K.S. Sujatha และ M.F. Webster [17] ได้พิจารณาถึงการยืดของฟิลาเมนต์ในระดับนาโน (nano-scale) ที่เล็กมาก โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเช่นเดียวกับของ M.S. Chandio et al.

ในการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สิ่งสำคัญที่ขาดไม่ได้คือ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งมีหลายวิธีเช่น ระเบียบวิธีชิ้นประกอบอันตะ (FEM) ระเบียบวิธีผลต่างอันตะ (FDM) ระเบียบวิธีปริมาตรอันตะ (FVM) และระเบียบวิธีชิ้นประกอบขอบ (BEM) เป็นต้น โดยจะเลือกวิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับปัญหาและขอบเขตที่เราต้องการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ จะสนใจศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของของไหลนิวโตเนียน โดยทำการพิจารณาปัญหาที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้น (non-linear partial differential equation) และจะหาผลเฉลยของปัญหาด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ที่เรียกว่าระเบียบวิธีชิ้นประกอบอันตะแบบสามเหลี่ยม 6 โนด โดยใช้หลักการเซมิอิมพลิซิทเทย์เลอร์กาเลอร์คินเพรซเชอร์คอร์เรคชัน ในระบบพิกัดทรงกระบอก 2 มิติ ซึ่งพิจารณาเป็นแบบไร้หน่วย (dimensionless) ภายใต้ข้อสมมติฐานที่ให้ของไหลไม่มีการบีบอัดตัว

(incompressible flow) ไม่ขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลก ไม่ขึ้นกับความเฉื่อย และเป็นกรณีที่อุณหภูมิไม่ขึ้นกับเวลา (isothermal case) แต่จะพิจารณาถึงแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นที่ผิวอิสระได้โดยกำหนดตามเงื่อนไขค่าขอบทั้งแบบพลศาสตร์ (dynamic) และแบบจลนศาสตร์ (kinematic) ทุกๆ ครั้งของการยืดนั้นจะมีการปรับโครงข่ายใหม่ การประมาณค่าในช่วง (interpolation) และคำนึงถึงการอนุรักษ์ปริมาตร (conservation of volume) ด้วย โดยได้อิงความรู้หลักจากงานวิจัยของ Sizaire และ Legat [6] ของ Yao และ McKinley [7] ของ K.S. Sujatha และ M.F. Webster [17] โดยเฉพาะอย่างยิ่งนำผลที่ได้จากการศึกษาของไหลนิวโตเนียนของ M.S. Chandio et al. [14] มาตรวจสอบผลที่ได้จากโปรแกรมที่สร้างขึ้นเองด้วยภาษาซีเพื่อยืนยันความถูกต้องและพัฒนาโปรแกรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ (Objective)

เพื่อจำลองการยืดชิ้นประกอบสำหรับของไหลนิวโตเนียน

1.3 วิธีการดำเนินงานและขอบเขต (Procedure and outline)

1.3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการยืดชิ้นประกอบ

1.3.2 ศึกษาความรู้พื้นฐานทางรีโอโลยีและระเบียบวิธีชิ้นประกอบอันตะ

1.3.3 พัฒนาระเบียบวิธีชิ้นประกอบอันตะกับปัญหาการยืดชิ้นประกอบของไหลนิวโตเนียน

1.3.4 เขียนโปรแกรม ทดสอบและตรวจแก้โปรแกรม

1.3.5 รวบรวมและวิเคราะห์ผล

1.3.6 สรุปผลที่ได้จากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พร้อมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาสู่การวิจัยระดับสูงต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ (Profit)

1.4.1 สามารถนำโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นไปใช้วิเคราะห์ปัญหาการยืดชิ้นประกอบสำหรับของไหลนิวโตเนียน

1.4.2 เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาและพัฒนาทางระเบียบวิธีชิ้นประกอบอันตะต่อไปในอนาคต