



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ จุดคอนแทคชันสำหรับตัวแบบเพนเทียนแทนเนอร์  
ของการไหลเคลื่อนที่แบบทวิพหุคูณ

**Project: The Contraction Point for Phan-Thien/Tanner Model  
of Tube-Tooling Wire-Coating Flow**

โดย ผศ. ดร. วิมลรัตน์ งามอร่ามวารงกูร

30 มิถุนายน 2549

สัญญาเลขที่ MRG4780137

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ จุดคอนแทรคชันสำหรับตัวแบบแพนเทียนแทนเนอร์  
ของการไหลเคลือบเส้นลวดแบบทวิบ์ทูลิ่ง

**Project: The Contraction Point for Phan-Thien/Tanner Model  
of Tube-Tooling Wire-Coating Flow**

ผศ. ดร. วิมลรัตน์ งามอร่ามวารังกูร  
ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย  
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกอ. และ สกว. ไม่จำเป็นต้องเป็นด้วยเสมอไป)

**Project Code:** MRG4780137

**Project Title:** The Contraction Point for Tube-Tooling Wire-Coating Flow

**Investigator:** ผศ. ดร. วิมลรัตน์ งามอร่ามวรารังกูร ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**E-mail Address:** [vimolrat.n@chula.ac.th](mailto:vimolrat.n@chula.ac.th)

**Project period:** วันที่ 1 กรกฎาคม 2547 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2549

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันได้มีการศึกษาการจำลองกระบวนการอัดรีดเคลือบลวดสายไฟอย่างแพร่หลายเพื่อเพิ่มผลผลิตให้มีความเพียงพอต่อประชากรที่มีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นทุกปีและทำการปรับปรุงคุณภาพให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นปัญหาการเคลือบลวดสายไฟจึงได้ถูกพิจารณาอย่างกว้างขวาง การอัดรีดด้วยทิว์ทูลิ่งแบบวงแหวนได้ถูกจัดสร้างขึ้นด้วยสมการเนเวียร์-สโตกส์ พร้อมกับตัวแบบทางรีโอโลยีที่อยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์รูปเอ็กซ์โพเนนเชียลเชิงเส้น/แทนเนอร์ (พีพีที) หรือเรียกว่าสมการองค์ประกอบในระบบพิกัดทรงกระบอกสองมิติที่ใช้ค่าเวลาผ่อนคลายค่าเดียว เพื่อใช้ในการทำนายจุดคอนแทรกชันของโพลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่นอกตาย ผลเฉลยของปัญหานี้หาได้จากการใช้ระเบียบวิธีทางตัวเลข ซึ่งเรียกว่า ระเบียบวิธีขึ้นประกอบอันตราระเหยอิมพีชิตเทย์เลอร์-กาลีเคอร์-คินเพรชเชอร์-คอร์เรคชัน (เอสยูพีจี) เมื่อพิจารณาปัญหาของการไหลนี้อย่างช้าๆ ด้วยเวลาผ่อนคลายที่มีค่ามาก ในเทอมของตัวเลขไวส์เบอร์ก์ที่สูงถึง 200 โดยพิจารณาของไหลในกรณีที่อยู่หนุมึงตัวด้วยผลกระทบของแรงตึงผิวที่ผิวอิสระและไม่มีกรีน-ไกลที่ผนังตาย ด้วยหลักการสายกระแสฮัพวิน/เพทรอฟ-กาลีเคอร์-คิน (เอสยูพีจี) เพื่อให้ได้ค่าผลเฉลยที่มีค่าคลาดเคลื่อนน้อยเข้าอย่างสม่ำเสมอ หลังจากที่ได้ทำนายค่าผิวอิสระที่ด้านบนและด้านล่างแล้วให้ทำการปรับโครงข่ายนอกตายจนกระทั่งได้ค่าผลเฉลยที่ยอมรับได้จะพบว่าจุดคอนแทรกชันมีค่าประมาณ 1 หน่วยซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ประมาณจากผลการทดลอง

### Abstract

Now, the simulation of extrusion process is studied widely in order to increase products and improve quality so the problems of wire coating are considered generously. The annular tube-tooling extrusion was set up by a model that is called Navier-Stokes equation addition with a rheological model in the differential form based on single-mode exponential Phan-Thien/Tanner (PTT) constitutive equation in a two-dimensional cylindrical coordinate system in order to predict the contraction point of the polymer melt beyond the die. The solutions of this problem are solved by a numerical method which is called semi-implicit Taylor-Galerkin pressure-correction finite element scheme. The investigation was focused on incompressible creeping flow with long relaxation time in term of Weissenberg number ( $We$ ) up to 200. The isothermal case was considered with surface tension effect on free surface in

extrudate flow and no slip at die wall. The Stream line Upwind Petrov-Galerkin (SUPG) has been proposed to stabilize solution and the structure of mesh after die exit was adjusted after predicted both top and bottom free surfaces so the location of contraction point is around one unit length that is close to experimental estimation.

**Keywords:** wire coating, PTT model, extrusion, tube-tooling,

## เนื้อหางานวิจัย

### 1. วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อจำลองปัญหาการไหลในกระบวนการอัดรีด (extrusion process) ที่เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการขึ้นรูปในขั้นตอนการผลิตชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ในโรงงานอุตสาหกรรม
- เพื่อบุกเบิกการวิจัยและให้ความรู้ทางวิชาการแก่นักวิจัยที่มีความสนใจทางด้านนี้ รวมไปถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการทำนายผลลัพธ์ให้แม่นยำยิ่งขึ้น
- เพื่อสร้างผลงานวิจัยที่มีคุณภาพ และนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมการทำภาชนะพลาสติกบรรจุสิ่งของชนิดต่างๆ ให้เป็นที่ยอมรับของสังคม รวมทั้งประโยชน์ในการประหยัดเวลาและลดงบประมาณจากการทดลองของจริง

### 2. การดำเนินงานวิจัยตามวัตถุประสงค์

แบ่งการวิจัยเป็นสองช่วง ช่วงแรกคือหัวข้อการศึกษาความเครียดสูงและอัตราการผิดรูปมากของการไหลแบบขยาย โดยเริ่มการค้นคว้าจากการจำลองปัญหาในเชิงอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกดเป่าขึ้นรูปแผ่นบาง (blown film extrusion) การอัดรีดขึ้นรูปแผ่นบาง (sheet extrusion) และการขึ้นรูปแบบสุญญากาศ (vacuum forming) โดยพิจารณาของไหลชนิดนิวโตเนียน (Newtonian fluid) ซึ่งเป็นของไหลที่มีความหนืดคงที่จึงไม่มีความสลับซับซ้อนมากนัก เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาปัญหาของของไหลที่มีความใกล้เคียงกับของไหลที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจริง

ช่วงที่สองคือหัวข้อการศึกษาหาจุดคอนแทรคชันสำหรับตัวแบบเพนเทียนเทนเนอร์ ของการไหลเคลือบเส้นลวดแบบทวิบูล์ลิ่ง ซึ่งพิจารณาของไหลที่มีพฤติกรรมใกล้เคียงกับโพลีเมอร์หลอมเหลวจากสารที่เรียกว่า โพลีเอธิลีน เนื่องจากสารชนิดนี้เป็นสารที่ใช้ในการผลิตสิ่งต่างๆที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมการอัดรีด อันได้แก่ ท่อพีวีซี กระจกพลาสติก ขวดพลาสติก ฉนวนหุ้มสายไฟ เป็นต้น สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นการศึกษาฉนวนหุ้มสายไฟ ชนิดที่ประกอบไปด้วยฉนวนหุ้มสายไฟหลายเส้นมาหุ้มรวมกันอยู่ภายในเส้นเดียวกัน โดยใช้ตัวแบบเพนเทียนเทนเนอร์ (Phan Thien/Tanner model) ซึ่งมีความหนืดไม่คงที่และมี

ความยืดหยุ่นได้ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าของไหลวิสโคอีลาสติก ของไหลชนิดนี้จึงมีความสลับซับซ้อนในการคำนวณมากกว่าของไหลนิวโตเนียน

### 3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

ศึกษาตัวแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยไม่เชิงเส้นที่เรียกว่าสมการเนเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ของความเร็ว อุณหภูมิ ความดัน และความเค้น ที่ขึ้นกับปริภูมิ (space) 2 มิติ ในระบบพิกัดทรงกระบอก และเวลา (time) ซึ่งพิจารณาในระบบไร้หน่วย (dimensionless system) จากนั้นทำการสร้างโดเมนของปัญหาและแบ่งโดเมนเป็นแบบโครงข่าย (mesh) ซึ่งประกอบไปด้วยเอเลเมนต์ย่อยๆ จำนวนจำกัด ชนิดสามเหลี่ยมแบบ 6 โหนด เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีขึ้นประกอบ อันตะแบบเซมิอิมพลีซิทีแวลูเออร์กัลเลอร์คินเพรชเชอร์คอร์เรคชัน (semi-implicit Taylor-Galerkin/pressure-correction finite element method) ภายใต้ข้อสมมติฐานที่ว่าของไหลไม่มีการบีบอัดตัว (incompressible flow) ไม่ขึ้นกับแรงโน้มถ่วงของโลก ไม่ขึ้นกับความเฉื่อย และเป็นกรณีที่อุณหภูมิไม่ขึ้นกับเวลา (isothermal case) สำหรับหัวข้อที่สองเพิ่มการพิจารณาสมการองค์ประกอบที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมการไหลของของไหลวิสโคอีลาสติก ที่เรียกว่า ตัวแบบแพนเทียนแทนเนอร์

### 4. ผลงานวิจัยที่ได้รับ

ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับชาติ

Bunditsaovapak and V. Ngamaramvaranggul, "Element Stretching for a Newtonian Fluid" *KMITL SCIENCE JOURNAL*, vol 5, no.1, pp339-352, 2005

ผลงานวิจัยที่จะตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติ

ชื่อเรื่อง : The Contraction Point for Tube-Tooling Wire-Coating Flow

ชื่อวารสารที่คาดว่าจะตีพิมพ์:

1 *Int. J. Num. Meth. Fluids* มี impact factor 0.632

2. *European Journal of Mechanics B/Fluids* มี impact factor 0.75