



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยหลังปริญญาเอก PDF 48/2541
การออกแบบและพัฒนาเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์แบบ
ใหม่ที่ใช้งานสารพัดอย่าง

โดย ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

พฤศจิกายน 2542



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยหลังปริญญาเอก PDF 48/2541
การออกแบบและพัฒนาเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์แบบ
ใหม่ที่ใช้งานสารพัดอย่าง

โดย ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

พฤศจิกายน 2542

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยหลังปริญญาเอก PDF 48/2541 การออกแบบและพัฒนาเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์แบบ ใหม่ที่ใช้งานสารพัดอย่าง

คณะผู้วิจัย

สังกัด

ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

มจร.

Dr Alan K Wood

UMIST

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

กิตติกรรมประกาศ

หัวหน้าโครงการใคร่ขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) เป็นอย่างยิ่งในการให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการดำเนินการวิจัย หัวหน้าโครงการขอขอบคุณ นาย นเรศ อินตะวงค์ นักศึกษาปริญญาเอก นายนริศ อินตะวงค์ นักศึกษาปริญญาโท และคุณเครือวัลย์ มณีวัต หัวหน้างานคลังฯ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การช่วยเหลือในการดำเนินงานวิจัยในโครงการนี้

ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ

หัวหน้าโครงการ

สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Abstract

Project Code: PDF48/2541

Project Title: Design & Development of a Novel & Versatile Capillary Rheometer

Investigator: Dr Narongrit Sombatsompop

Dr Alan K Wood

Email address: inarmpop@cc.kmutt.ac.th

Project Period: 1st July 1998 – 30th November 1999

Objectives:

1. To design and develop a novel capillary rheometer that features the possibility of moving either the piston or the barrel, the latter being novel in design.
2. To determine the flow properties of polymer melts using the constructed capillary rheometer, the results being compared to those generated using a conventional capillary rheometer.

Methodology, Results and Discussion

This research project introduced a novel type of capillary rheometer, with respect to its design and operation, for investigating flow properties of a polymer melt. The constructed capillary rheometer was fitted into a standard tensile testing machine such that the mode of extrusion could be altered. The equipment featured the possibility of moving either the piston or the barrel, the latter being novel in design. In addition, this work presented a novel pressure sensor, so-called "Pin-Spring (PS) pressure sensor", for determining the pressure drop along the die in the capillary rheometer. The following were noted:

1. The PS sensor was found to be novel with respect to its design and operation and it can be used to accurately measure the pressure of polymer melts in polymer processing. The sensor was found to be reliable, simple and versatile in use, robust and low in cost. The reading accuracy of the sensor was $\pm 1\%$. The principle use of the PS sensor was very simple. It used a mechanical system, which was relatively novel in design, to transmit the pressure from the fluid system, utilising a variable resistance transducer to monitor the changes in pressure and displayed the data in the form of electrical voltage and thus real pressure.
2. The novel capillary rheometer featuring the possibilities of moving the piston and the barrel was introduced and it can be used to investigate the flow properties of the

polymer melts. The experimental results showed that the polymer melts used in this work exhibited psueoplastic non-Newtonian behaviour and the flow properties were dependent not only on the test temperature, but also on the mode of operation. It was thought that the discrepancies in the results by the mode of operation were caused by the flows occurring in the barrel that varied with the mode of operation.

3. The rheological results obtained by the novel capillary rheometer were different from those obtained by the standard type of capillary rheometer, the differences being around 15-20% which were larger than the experimental errors ($\pm 3\%$). It was concluded that the flow properties of the polymer melts were dependent on the style of rheometers used which was thought to be affected by the flow patterns of the polymer melts occurring in the rheometers.

The detailed discussion of the results can be sought in the accepted papers, gathering at the end of the report.

Conclusion

The novel capillary rheometer can be used to accurately determine the flow properties of polymer melts, the polymer melts used exhibiting psueoplastic non-Newtonian behaviour. It was found that the flow properties of the polymer melts were dependent on the mode of operation of the rheometer, this being associated with the flow occurring in the barrel of the rheometer.

Suggestions and Further Implication

Further work aims to investigate the relationship between the flow properties and flow patterns occurring in this type of apparatus, this allowing the quantifying and understanding of the flow properties of polymer melts. In addition, effects of barrel characteristics and barrel/die design on flow properties and flow patterns will also be of interest.

Keywords

1. Capillary rheometer
2. Flow properties
3. Polymer melts
4. Polymer rheology
5. Melt viscosity

บทคัดย่อ

รหัสงานวิจัย: PDF48/2541
ชื่องานวิจัย : การออกแบบและพัฒนาเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์แบบใหม่
ผู้วิจัย: ดร. ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
Dr. Alan K Wood
ที่อยู่อิเล็กทรอนิกส์ : inarmpop@cc.kmutt.ac.th
ระยะเวลาดำเนินงาน : 1 กรกฎาคม 2541 - 30 พฤศจิกายน 2542

วัตถุประสงค์ :

1. ออกแบบและพัฒนาเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์แบบใหม่ ที่สามารถขับเคลื่อนได้ทั้งระบบขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (Barrel) และระบบการขับเคลื่อนแท่งอัดทรงกระบอก (Piston)
2. ตรวจสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยใช้เครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ที่จัดสร้างขึ้น และนำผลการทดลองที่ได้เปรียบเทียบกับเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรม

วิธีการทดลอง ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์แบบใหม่ เพื่อใช้ในการศึกษาสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยทำการออกแบบให้สามารถประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Testing Machine) และสามารถขับเคลื่อนทั้งระบบ Mobile Barrel และระบบ Mobile Piston นอกจากนี้ยังได้นำเสนอเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ (Pin –Spring, (PS) Pressure Sensor) เพื่อใช้ในการวัดความดันตก (Pressure Drop) ใน Die ของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ที่จัดสร้างขึ้น ซึ่งสามารถสรุปพอเป็นสังเขป ได้ดังนี้

1. เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ที่ออกแบบและจัดสร้างขึ้น เพื่อใช้วัดความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวในกระบวนการผลิตพอลิเมอร์มีความเที่ยงตรงในการวัดสูง และมีค่าความเชื่อมั่น $\pm 1\%$ นอกจากนี้ยังมีหลักการทำงานที่ไม่ซับซ้อน มีความแข็งแรง ราคาถูกและสามารถใช้งานได้อย่างหลากหลาย โดยมีหลักการทำงานซึ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นระบบกลไก (mechanical system) ซึ่งทำหน้าที่ส่งถ่ายแรงในรูปของความดันจากห้องหลอมเหลวทรงกระบอกไปยังส่วนของชุดความต้านทานแบบปรับค่าได้ โดยค่าความต้านทานดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าและความดันจริง
2. เครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ที่จัดสร้างขึ้นทั้งแบบขับเคลื่อน Barrel และขับเคลื่อน Piston สามารถใช้ตรวจสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้ ผลการทดลองที่ได้จากพอลิเมอร์ที่นำมาทดสอบ คือ พอลิเมอร์ที่ใช้แสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Non-Newtonian ชนิด Psueoplastic สมบัติการไหลแปรผันตามอุณหภูมิและระบบการขับเคลื่อน ซึ่งกรข
หลังนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจากรูปร่างการไหลในทั้งสองระบบมีความต่างกัน

3. ผลการทดสอบสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ที่ได้จากเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ที่ได้จัดสร้างขึ้น มีความแตกต่างจากผลการทดสอบที่ได้จากเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์มาตรฐาน ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวมีค่าประมาณ 15-20 % โดยมีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดของผลการทดลอง (+/-3) จึงกล่าวได้ว่าสมบัติการไหลของพอลิเมอร์แปรผันตามลักษณะการออกแบบของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์แต่ละเครื่อง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากผลกระทบจากรูปร่างการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เกิดขึ้นในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์

รายละเอียดของผลการทดลองดูได้จากเอกสารตีพิมพ์ที่แนบมากับรายงานนี้

บทสรุป

เครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์แบบใหม่สามารถตรวจสอบคุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวได้อย่างถูกต้อง พอลิเมอร์ที่นำมาทดสอบแสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Non-Newtonian ชนิด Psueoplastic สมบัติการไหลแปรผันตามระบบการขับเคลื่อนของเครื่อง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากรูปร่างการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เกิดขึ้นในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์

ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตคือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการไหลกับรูปร่างการไหลในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ทั้งสองระบบการขับเคลื่อน ซึ่งจะนำไปสู่ความเข้าใจในสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวมากขึ้น รวมถึงผลกระทบของคุณลักษณะของการออกแบบ Die และ Barrel ที่มีผลต่อสมบัติและรูปร่างการไหลที่ศึกษา

คำสำคัญ

1. คาปิลารีโอมิเตอร์
2. คุณสมบัติการไหล
3. พอลิเมอร์หลอมเหลว
4. คุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว
5. ความหนืดของของไหล

หน้าสรุปโครงการ (Executive Summary)

โครงการวิจัยหลังปริญญาเอก PDF48/2541 นี้มีเป้าหมายที่จะออกแบบและจัดสร้างเครื่องคาลาร์รีโอมิเตอร์แบบใหม่ที่สามารถขับเคลื่อนได้ทั้ง barrel และ piston เพื่อใช้สำหรับการวัดสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ระยะเวลาที่ได้รับทุนวิจัยคือ ตั้งแต่ 1 กรกฎาคม 2541 ถึง 30 มิถุนายน 2543 รวมเป็นเวลา 2 ปี แต่คณะวิจัยได้ใช้เวลาประมาณ 1.5 ปี (ตั้งแต่ 1 กรกฎาคม 2541 ถึง 30 พฤศจิกายน 2542) ในการดำเนินงานวิจัยให้บรรลุวัตถุประสงค์ที่วางไว้ โดยได้มีผลงานวิจัยที่รอตีพิมพ์อยู่รวม 6 บทความ (โปรดดูรายละเอียดในหัวข้อ Research Output) และได้ผลิตนักศึกษาระดับปริญญาโทได้ 2 คน (หนึ่งในสองคนสำเร็จการศึกษาไปแล้ว)

ในโรงงานอุตสาหกรรมและหน่วยงานที่ศึกษาวิจัยด้านสมบัติการไหล (rheological properties) ของพอลิเมอร์หลอมเหลว มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องใช้เครื่อง capillary rheometer เพราะจะช่วยให้ผู้ออกแบบกระบวนการผลิต ผู้วิจัยและผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ทราบถึงความเป็นไปได้ของวัตถุดิบพลาสติกที่กำลังพิจารณาเพื่อใช้ในการผลิตชิ้นงาน นอกจากนี้ ยังสามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต เช่น อุณหภูมิ ความดันและอัตราเร็วในการไหล (flowrate) และการผลิต rheometer ที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันมีขีดความสามารถในการทำงานที่จำกัด ประกอบกับ ปัญหาทางด้านเศรษฐกิจที่ประเทศไทยประสบอยู่ในปัจจุบัน เงินทุนที่จะนำมาใช้เพื่อซื้ออุปกรณ์หรือเครื่องมือวัดจากต่างประเทศมีจำนวนจำกัด อีกทั้งเครื่องมือหรืออุปกรณ์ดังกล่าวล้วนมีราคาสูงทั้งสิ้น ดังนั้น งานวิจัยครั้งนี้เล็งเห็นว่าเครื่องมือวัดแบบใหม่และง่าย สามารถใช้วัดสมบัติทาง rheology ได้หลายประการ และ capillary rheometer ที่จะถูกจัดสร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ในห้องปฏิบัติการและเพื่อการทำวิจัย ซึ่งระดับความถูกต้องของผลการวัดใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดมาตรฐานในอุตสาหกรรม ในการกระทำเช่นนี้จะช่วยประหยัดต้นทุนในการจัดซื้ออุปกรณ์ที่มีราคาแพง อีกทั้งยังช่วยฝึกฝนหรือสร้างนิสัยให้นักวิจัยไทยมีการปรับปรุงพัฒนาความรู้ความสามารถทางด้านเทคโนโลยี อันจะนำไปสู่ความยอมรับต่อประเทศเพื่อนบ้านต่อไปในอนาคตอันใกล้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยในโครงการนี้ คือ เพื่อจัดสร้างเครื่องคาลาร์รีโอมิเตอร์แบบใหม่โดยใช้ระบบขับเคลื่อนของบาร์เรล (mobile barrel) และศึกษาสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์ โดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นและเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับเครื่องมือวัดมาตรฐานในอุตสาหกรรมทั่วไป อีกทั้งยังเป็นการประหยัดและลดรายจ่ายในการจัดซื้ออุปกรณ์การวัดจากต่างประเทศ ในสภาวะเศรษฐกิจของประเทศไทยในปัจจุบัน โครงการวิจัยครั้งนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ใหญ่ ๆ คือ ส่วนที่ 1 เป็นการจัดสร้างชิ้นส่วนของเครื่อง capillary rheometer ด้วยหลักการของ capillary rheometer ซึ่งประกอบด้วย motor, piston, barrel, die และ die holder และ pressure transducer ในการนำ barrel และ die เข้าไปติดตั้งในเครื่อง tensile tester การออกแบบในส่วน

นี้จะแบ่งออกเป็นสองอย่างคือ แบบระบบขับเคลื่อนของ piston และแบบระบบขับเคลื่อนบาร์เรล (mobile barrel) ในระบบแรก เป็นแบบมาตรฐานสากลทั่วไป ซึ่งเป็นการนำ piston ลงมาใน barrel เพื่ออัดโพลิเมอร์ จะต้องมีการติดตั้งส่วนที่ยึด barrel ให้มั่นคงไม่เลื่อนไปเลื่อนมา และทนแรงดันภายในที่เกิดขึ้นระหว่างการวัด เพราะจะมีผลให้ piston สัมผัสกับพื้นผิวหน้าของ barrel ซึ่งทำให้เกิดรอยขีดข่วนและข้อผิดพลาดต่อการวัด สุดท้ายสามารถทำให้เครื่องมือวัดเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นส่วนของ barrel & die จะถูกยึดกับโครงสร้างใหญ่ของเครื่อง tensile สำหรับในระบบที่สอง (mobile barrel) ส่วนของ piston จะอยู่คงที่และ barrel จะเลื่อนเข้าหา ซึ่งในระบบที่สองนี้ ถือเป็นการค้นคว้าซึ่งให้องค์ความรู้ใหม่ทาง rheology หรือ/และปรากฏการณ์ของการไหลที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนของการใช้งาน ในการวัดความหนืดของพลาสติกเหลว ซึ่งมีหลักการวัดคือ การวัดความดันตกที่บริเวณทางเข้า die ณ อัตราเนื่องต่างๆ ซึ่งความดันถูกวัดโดยใช้ pressure transducer โดยในโครงการนี้ คณะวิจัยได้ออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ โดยใช้หลักการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ activate โดยการใช้สปริง ซึ่งได้กำลังขอรับการจดสิทธิบัตรอยู่ในขณะนี้ สำหรับงานในส่วนที่ 2 คือ การวัดสมบัติการไหลของพลาสติกเหลวโดยเม็ดพลาสติกทางการค้า ซึ่งจะได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Thai Petrochemicals Industry Public Co. Ltd. (TPI) จะถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางการไหล โดยใช้เครื่อง capillary rheometer ที่จัดสร้างขึ้น ผลการทดลองที่ได้รับ จะถูกวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐานทางอุตสาหกรรม ในที่นี้ใช้ Rosand Precision Capillary Rheometer (RPCR) ซึ่งได้รับการช่วยเหลือจากบริษัท TPC (Thai Plastics & Chemicals Co. Ltd)

นอกจากจะได้เครื่อง capillary rheometer ที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ผลงานวิจัยทำให้ทราบว่า สมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวนอกจากจะมีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทดสอบแล้วยังมีผลกระทบมาจากความแตกต่างของระบบการขับเคลื่อนของ barrel และ piston อีกด้วย ผลการทดสอบพบว่าความแตกต่างของผลการทดสอบสมบัติการไหลอันเนื่องมาจากระบบการขับเคลื่อนมีความมากกว่า 15% ณ สภาวะการทดสอบเดียวกัน โดยในเบื้องต้นสรุปว่า ความแตกต่างของผลการทดสอบนี้มีความเกี่ยวข้องกับรูปแบบและคุณลักษณะของการไหลของพอลิเมอร์ในเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์ ผลงานวิจัยในโครงการนี้ได้ทำให้เกิดความสนใจที่จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติการไหลและรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ใน capillary rheometer ซึ่งจะมีการดำเนินการศึกษาวิจัยต่อไป

Research Output ที่ได้จากงานวิจัยในโครงการ

ผลงานวิจัยจากโครงการวิจัยหลังปริญญาเอก (PDF48/2541) มีดังนี้

Publication Level	No. of Papers	Status
International Journals	3	All accepted
International Conferences	1	Published
National Journals	1	Published
Patent	1	Submitted

ชื่อเรื่องของผลงานวิจัย และแหล่งที่รับการตีพิมพ์เผยแพร่

International Refereed Journals

1. Sombatsompop N, Intawong N-T, & Intawong N-S - A Novel Sensing Device for Pressure Measurement in Molten Polymer Systems - ***Polymer Testing***, (accepted).
2. Sombatsompop N & Intawong N-T - A Novel Capillary Rheometer for Measurement of Flow Properties of Polymer Melts - ***Materials Research Innovations***, (accepted).
3. Sombatsompop N & Wood AK - Error Sources in Rheological Measurements of Carbon Black Filled Rubber Compounds – ***ScienceAsia***, (accepted).

International Conference

1. Intawong N-T & Sombatsompop N - Flow Properties of Molten Polymers By Mobile Barrel Capillary Rheometer - ***The Polymer Processing Society (PPS) Conference***. 1st-3rd December, Bangkok, Thailand 1999.

National Refereed Journals

1. Intawong N-T, Intawong N-S & Sombatsompop N - A Novel Pressure Sensor for Polymer Melts in Capillary Rheometers - ***KKU Engineering Journal***, 26 (1&2), 59-81, 1999.

Patents

1. Sombatsompop N, Intawong N-T & Intawong N-S - Pin-Spring Pressure Sensing Device for Pressure Measurement of Polymer Melts in Capillary Rheometers - ***Thai Patent Applications*** - (Submitted No. 047983: Dec. 1998).

ภาคผนวก

เอกสารแนบในภาคผนวกนี้เป็นสำเนาบทความวิจัยที่ขอรับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการ (ในรูปแบบของ galley-proofs และ revised manuscript) สิทธิบัตรและบทความที่นำเสนอในที่ประชุมวิชาการ ซึ่งได้รับจากโครงการวิจัยหลังปริญญาเอก (PDF48/2541)

Test Equipment

A novel sensing device for pressure measurement in molten polymer systems

N. Sombatsompop*, N.-T. Intawong¹, N.-S. Intawong*Division of Materials Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Bangmod, Bangkok 10140, Thailand*

Received 9 February 1999; received in revised form 15 April 1999; accepted 15 April 1999

Abstract

This paper introduces a novel sensing device for measuring pressures of highly viscous polymer melts. The sensor called 'Pin Spring' is found to be novel with respect to its design and operation. The design and development of the sensor are based on a measure of resistance change of a sliding contact resistor which is activated by the movement of a spring that is attached to the resistor. The pressure sensor is found to be reliable, simple and versatile in use, robust and low in cost. The reading accuracy of the sensor is found to be $\pm 1\%$. © 1999 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

Keywords: Pressure sensing device; Pressure measurement; Fluid engineering; Polymer melts

1. Introduction

The most important parameters that are measured to provide information on the operating conditions in any forming process are pressure, flowrate and temperature, these parameters being inter-related. Their relationship needs to be measured and understood. It is well known that the pressure of polymer melt plays an important role in the processing of polymers. Therefore, it is significant to measure melt pressure and control the variable in the processing. For example, in extrusion, the dimensions of the extrudate are very important [1]. Fluctuations in die-head pressure cause variations in the flow rate through the die and thus in the extrudate dimensions. In injection

* Corresponding author. Tel.: + 662-470-8645; fax: + 662-427-9062; e-mail: inarmpop@cc.kmutt.ac.th

¹ Also at Faculty of Industrial Engineering, Rajamangala Institute of Technology, North Campus, Changmai, Thailand.

moulding, polymers encounter high pressures, as high as 200 MPa, during processing [2]. These pressures significantly affect many parameters such as melt temperature, thermal expansivity and compressibility of the polymers, these parameters being related to shrinkages, warpages and internal stresses in the products [3]. If the pressures are not accurately measured the control of processing operations may be impossible. Another example is the measurement of pressure drop in capillary rheometers [4]. Since the shear stress is calculated using the value of pressure drop at the die entrance in the rheometer the accuracy of the pressure measurement becomes very important [4,5]. As a consequence, it is essential to have a good pressure transducer that performs the measurement satisfactorily.

Specifications on pressure transducers may vary significantly depending on the manufacturers. However, it is very important to understand how and to what extent specifications affect the accuracy of the measurement. The best way to evaluate the accuracy of different pressure sensors is to compare them with an ideal pressure sensor, which would have a number of characteristics such as accuracy, fast response, repeatability, reliability and economy [6]. An ideal transducer would have an exactly linear relationship between pressure and output voltage. However, in practice, this is not the case, the relationship being non-linear [6,7]. In addition, temperature changes will cause variations in pressure reading [8].

Nowadays, a variety of pressure devices are available. In the past, Bourdon gauges were used, but they present a problem because the polymer melt enters the gauge, cools down and solidifies, thereby rendering the gauge useless. This problem was overcome by filling the gauge with silicone grease [1]. However, at high temperature, the grease tends to leak out causing inaccurate readings and product contamination. At present, more accurate measurements and continuously recording pressure readings are demanded. Therefore, more sophisticated pressure transducers are introduced. These transducers use strain gauges to convert the applied pressure into electrical signals. Since the strain gauge cannot be in contact with the melt stream, a mechanical system has to be used for transmitting the pressure, as in diaphragm gauges [8,9]. The output of these gauges is a function of the local strain, which is related to the diaphragm deflection and pressure differential. The mechanical system linking the diaphragm and the strain gauge can be either capillary type (containing mercury) or force rod [7–10]. Apart from the mentioned transducers, there are other types of pressure transducers available such as piezoelectric pressure transducers, the details of these transducers being found elsewhere [8,10].

In this initial article, a pressure sensor is introduced which is novel with respect to its design and operation for measuring pressures of highly viscous polymer melts. The calibration and examples of measurements are also outlined in order to confirm that the sensor is a reliable and useful device for pressure measurements in molten polymer system.

2. Experimental

2.1. Design of the novel pressure sensor

2.1.1. General description

In this work, a novel pressure sensor is designed and manufactured for measuring melt pressure in polymer testing and processing equipment such as capillary rheometer, extruders and injection

moulders. The design and manufacture of the sensor is based on use of a mechanical system to transmit a pressure from the fluid (polymer melt) to a variable resistance transducer, which monitors the resistance changes corresponding to changes in pressures of the fluid. The changes in resistance of the resistance transducer are then converted into the electrical voltage and thus, the relationship between the real pressure and the electrical voltage is constructed. The design and construction of the sensor presented is novel, aiming to develop a pressure sensor with a high accuracy, good mechanical strength, simplicity and versatility in use, and low costs.

The novel pressure sensor in this work is called a 'Pin-Spring, (PS)' pressure sensor, which is shown in the form of part assembly in Fig. 1. The sensor consists of a number of components as follows:

1. **Adapter:** This is a connector between a fluid system, in which the pressure is being measured, and the sensor.
2. **High temperature O-ring:** This is made of high temperature rubber in the form of an annular ring. This O-ring is placed around the tip of a steel pin, located inside the adapter, to prevent leakage of the fluid from the (fluid) system to the sensor. Since the O-ring is used in direct contact with the fluid at elevated temperatures, it has to be able to withstand a temperature up to 300°C.
3. **Steel pin:** This is used to transmit the pressure from the fluid to a resistance transducer. One end of the pin is placed within the adapter in direct contact with the fluid whereas the other is attached to a variable resistance transducer. As the pressure is applied to the end of the pin, the pin will move backwards in response to the pressure, causing a displacement of the variable resistance transducer and thus giving rise to changes in resistance.

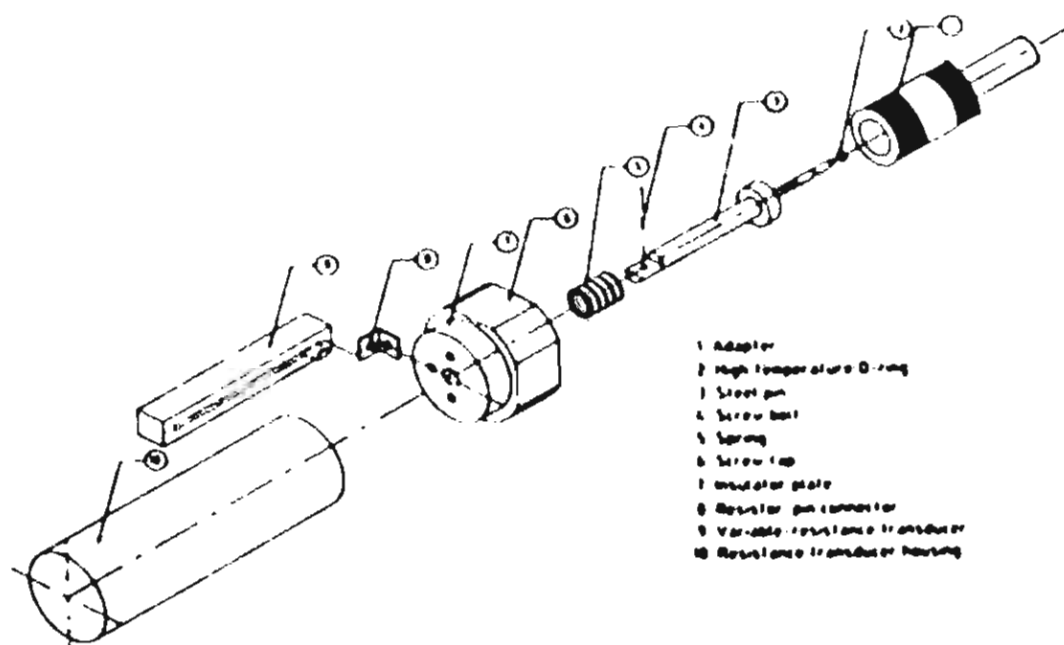
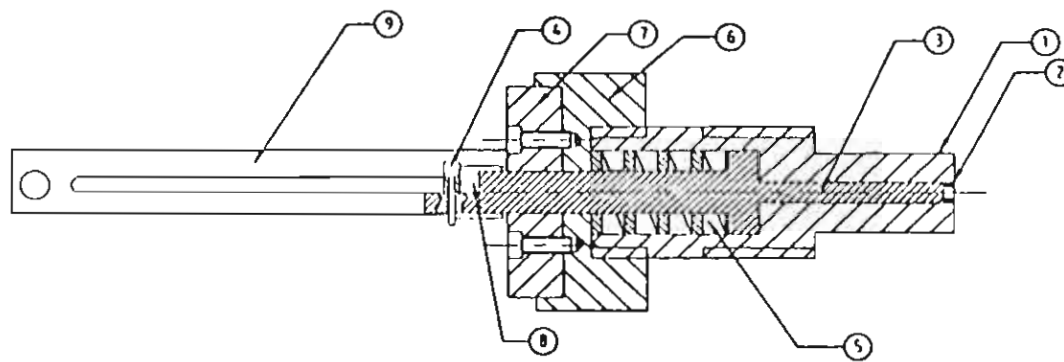


Fig. 1. The design and assembly of the PS sensor.

4. *Screw bolt*: This is used for connecting one end of the steel pin to the variable resistance transducer.
5. *Spring*: The spring is located around the steel pin (see Fig. 1) and is used to control the displacement of the steel pin corresponding to the amount of pressures applied onto the pin. Due to the highly elastic property of the spring, it also functions to reverse the movement of the steel pin when the pressure of the fluid is removed or reduced.
6. *Screw tap*: This is attached to the end of the adapter. This part encases all the above parts (O-ring, steel pin, spring).
7. *Insulator plate*: This insulator is made of Bakelite. This is used as an insulator of the system, insulating the heat from the fluid system, transmitted through the pin, spring, to the resistance transducer. This insulating plate is attached to the end of the screw tap using two screw bolts. In addition, it is used as a base for locating the variable resistance transducer.
8. *Resistor-pin connector*: This is a connector for joining the resistance transducer and one end of the steel pin by use of a bolt.
9. *Variable-resistance transducer*: This is a variable resistor in the form of a moving contact on a solid conductor, this transducer converting linear displacement (movement) into an electric signal.
10. *Resistance transducer housing*: This is an enclosure of the resistance transducer and made of stainless steel. It is used for protecting the resistance transducer from dust and other contaminants.
11. *Converter circuit and data logging system*: This converter circuit is used for changing the measured output from analog to digital signals and to real pressure values. A data logging system, which is connected to a personal computer, is used for taking the measurements in real time and under dynamic conditions.

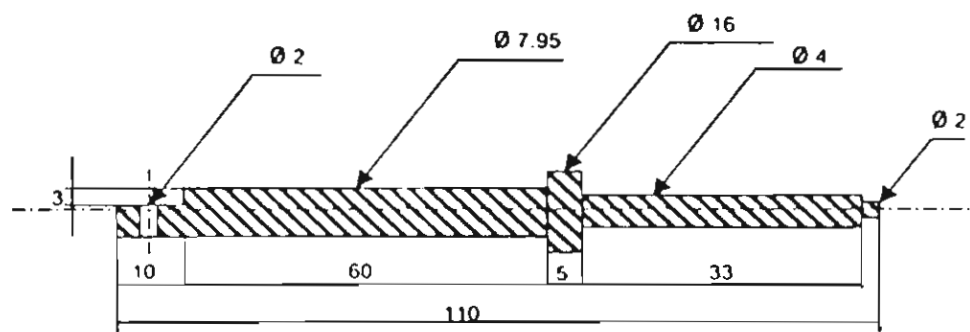
2.1.2. Manufacture of the PS sensor

All the machined parts are made of mild steel (ST-37) unless indicated otherwise. The manufacturing procedures and preparation of the PS sensor are described in a sequence of the sensor assembly as follows: the way that the novel pressure sensor introduced in this work is used is the same as conventional pressure sensing devices. That is, the pressure sensor is attached to a system where the pressure measurement is required. Usually, an adapter or a connector between the fluid system and the sensor may be required. In this particular example, a cylindrical barrel containing a fluid is used as a fluid system to illustrate the design and application of the PS sensor. The cross-sectional view of the sensor is shown in Fig. 2. The barrel and the sensor are connected using an adapter, specially designed as part of the sensor. The adapter is divided into two sections: one attached to the barrel and the other connected to the screw tap. The whole length of the adapter is 70 mm. The first end has inside and outside diameters of 4 and 15 mm respectively, whereas the other end has 16 mm inside diameter and 25 mm outside diameter. Both ends of the adapter are outer-screwed by M25 × 1.5. The adapter has a 4 mm diameter hole with a length of 35 mm. The rest of the length of the adapter is also hollowed out, giving an inside diameter of 16 mm. The steel pin is located within the adapter and is 125 mm long with various diameters along its length. The steel pin can be described in five different sections with respect to its dimensions (diameter and length), this being shown in Fig. 3. The first section is placed into the 4 mm hole of the adapter, this section being in direct contact with the polymer flowing



- | | | |
|--------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1. Adapter | 2. High temperature O-ring | 3. Steel pin |
| 4. Screw bolt | 5. Spring | 6. Screw tap |
| 7. Insulator plate | 8. Resistor-pin connector | 9. Variable-resistance transducer |

Fig. 2. Cross-sectional view of the PS sensor (without the transducer housing).



Units in mm.

Fig. 3. Cross-sectional view of the steel pin.

in the fluid system (barrel). This section is 1 mm in diameter and 2 mm long. An O-ring made of high temperature rubber in the form of annular ring, having inner and outer diameters of 1 and 3.95 mm respectively, is placed around the tip of the pin in the adapter and it also is used to prevent leakage of the fluid from the barrel to the sensor. The second zone of the pin has a diameter of 3.95 mm and a length of 33 mm, this being inserted into the 4 mm hole of the adapter. Since this part of the pin experiences friction during operation, the surface area is important. The surface of the pin at this part is hard-chrome-electroplated. The third part is 16 mm in diameter and 5 mm long, and the fourth is 7.95 mm in diameter and 90 mm long. The fourth part is surrounded by the spring, the spring characteristics being detailed later. Finally, the last section of the steel pin, attached to the resistance transducer by a screw bolt, is half-circular rod having the same diameter as the fourth zone with a length of 10 mm.

The spring is one of the most important parts of the sensor. The spring used in this work is a compression spring and its so-called name is 'Yellow Spring'. The spring has a free length of

30 mm and an effective cross-sectional area of 100 mm². Its walls are 1 mm thick and it contains 10 convolutions in an active length of 10 mm. The spring has a constant of 8.8 N/mm. The steel pin and spring are located inside the adapter firmly, as shown in Fig. 2, by use of the screw tap, which is directly attached to the end of the adapter. The screw tap has a circular shape with an outside diameter of 50 mm and length 25 mm. At the centre, the screw tap is drilled, giving a circular hole of 8.2 mm for allowing the steel pin to pass through. This end of the steel pin is attached to a variable resistance transducer via a bolt (resistor-pin connector). In between these, there is an insulating plate made of Bakelite that is placed and screwed onto the screw tap, the insulator having a thickness of 12 mm which is sufficient to insulate the heat from the barrel of the extruder to the resistance transducer. From our isolated experiment, it is found that this thickness can reduce the heat by 97%. This suggests that with this type of design of sensor, shift in pressure value due to changes in temperature of the sensor can be neglected. The variable-resistance transducer used in this work is in the form of a moving contact that slides along a solid conductor, (Type-B and Sang-Chai Meter Co. Ltd). The resistance transducer used gives a maximum resistance of 10 K Ω . The resistance transducer is protected from dust and contaminants by use of a resistance transducer housing made of stainless steel and made in form of a hollow thin-wall-cylinder, one end of the housing being sealed. The housing has an inner diameter of 42 mm and is 90 mm long. The measurements in this work are obtained in the form of either resistance change or electrical voltage which is then converted into real pressure using a data display unit or data logging system, which is attached to a personal computer. At the present time, the measurements are restricted to the pressure of polymer melts with high viscosity.

2.2. Basic principle of the sensor

The principle use of the PS sensor is very simple. It uses a mechanical system which is novel in design to transmit the pressure from the fluid system, utilising a variable resistance transducer to monitor the changes in pressure and display the data in the form of electrical voltage and thus real pressure. As the pressure of the fluid is applied to the tip of the steel pin, displacement of the steel pin will occur, the displacement corresponding to the extent of the applied pressure (see Figs. 1 and 2). The displacement of the pin will then cause the moving contact on the variable resistance transducer to move and this will result in changes in the resistance. The resistance changes are converted into electric voltage and real pressure value by a direct calibration.

2.3. Calibration

All transducers must be calibrated at intervals to ensure that the calibration constant has not changed. The Pin Spring pressure sensor designed and constructed in this work is calibrated on a basis similar to the dead-weight method [7,8]. The experimental apparatus used for calibrating the sensor is shown in Fig. 4. The calibrating apparatus consists of the heated barrel, die and die holder at the bottom of the barrel and piston drive, all the component being fitted into an AGS-500 D(SHIADZU) Instron tensile testing machine. In this work, the fluid used for calibration is a low-density polyethylene melt (LD100BW: Exxon) since the proposed sensor is to be used in the polymer processing industry. The PS sensor is installed near the die entrance as shown in Fig. 4. The calibration is commenced by allowing the apparatus to warm up and the temperature

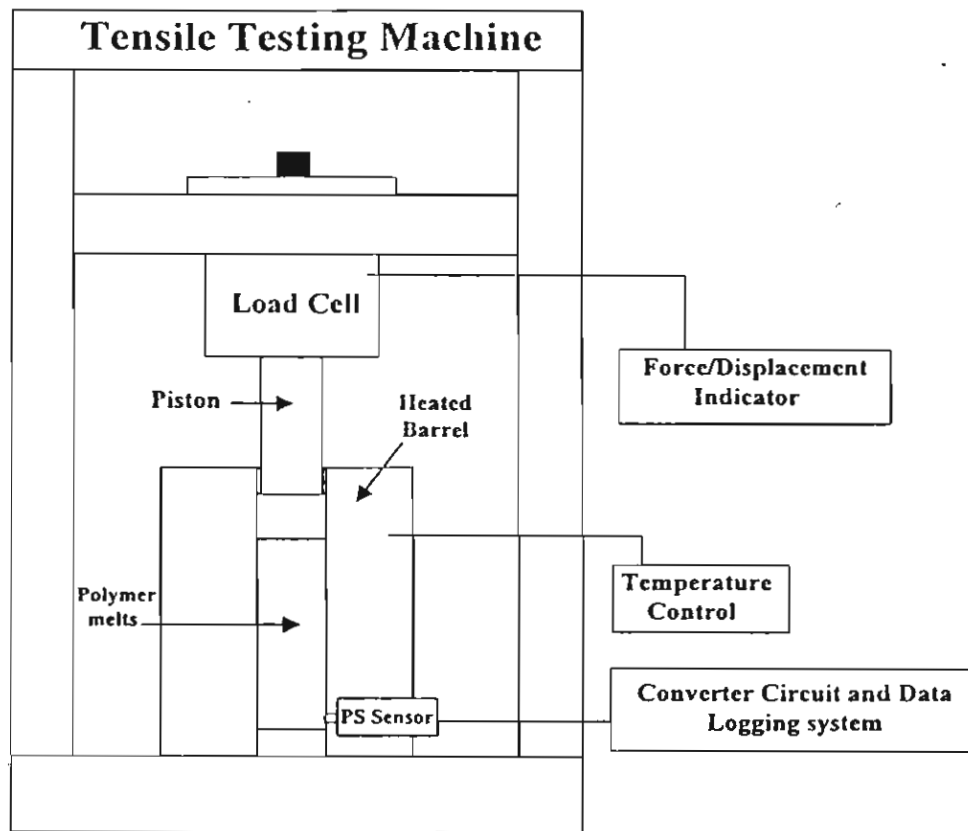


Fig. 4. The experimental arrangement for pressure measurement.

(160°C) to stabilise. The die and die holder are inserted. The barrel is charged with the polymer using a charging tool to regularly tamp down the polymer. The piston is mounted, the motor starts and the piston drive engages in order to compress the polymer slightly. The polymer is left in the barrel for a period of ten minutes in order to allow the polymer to melt and consolidate. After that the die outlet is completely blocked using a screwed cap to prevent the polymer from flowing out. The piston drive is then engaged and the pressure exerted on the polymer melt is then transmitted to the sensor via steel pin and spring. This pressure is varied by changing the piston displacement, the greater the piston displacement down the barrel the higher the force (pressure) exerted on the polymer melt. The exerted (calculated) pressure (P) is calculated using the force values indicated on a load indicator on the tensile testing machine and the mean cross-sectional area using the following equation [8]:

$$P = \frac{F}{A}$$

where F is the force exerted on the polymer melt and A is the mean value of cross-sectional area calculated from the cross-sectional areas of the piston and barrel [8].

The PS sensor is calibrated by recording the voltage signal for a particular calculated pressure as indicated on the machine console. The calibrations are carried out by setting different loads

or forces (corresponding to piston displacements) on the polymer melt. On application, the voltage values are converted into the actual pressure values. A graph of the calculated pressure on the machine and the voltage signal is shown in Fig. 5. The result shows that the response of the sensor to the applied pressure is linear as one would expect [7,8].

2.4. An example of measuring data

In order to prove that the PS sensor is suitable and can be used to accurately measure the pressure in a molten polymer system, we used this sensor to monitor the flow properties of a polymer melt in a capillary rheometer [4,11], details of the experimental procedure being found elsewhere [4]. The results obtained by the PS sensor are then compared with those obtained by use of a standard pressure transducer. The standard pressure transducer is the strain gauge-diaphragm transducer (PT-800SB: Sang Chai Meter Co. Ltd, Thailand). The calibrated PS sensor is inserted near the die entrance for the measurements of pressure drop of the polymer melt (LDPE) in the system. The various speeds of the piston drive are controlled and indicated via a control system (supplied with the tensile testing machine). The pressure drop at the die entrance is measured using the PS sensor at various piston speeds. The measured pressure drop is used to calculate the shear stress whereas the piston speed is used to determine the shear rate, the details of the calculations of the shear stress and shear rate can be found elsewhere [11]. For comparison purposes, the above procedures are repeated but this time the PT-800SB standard transducer is used. In this work, the relationships between shear stress, shear rate and viscosity of the polymer melt are our main interest. The test temperature of 160°C and a die of 55/2.75 L/D are used. It should be noted that Bagley corrections are not applied to the flow data. In this case the data is solely being

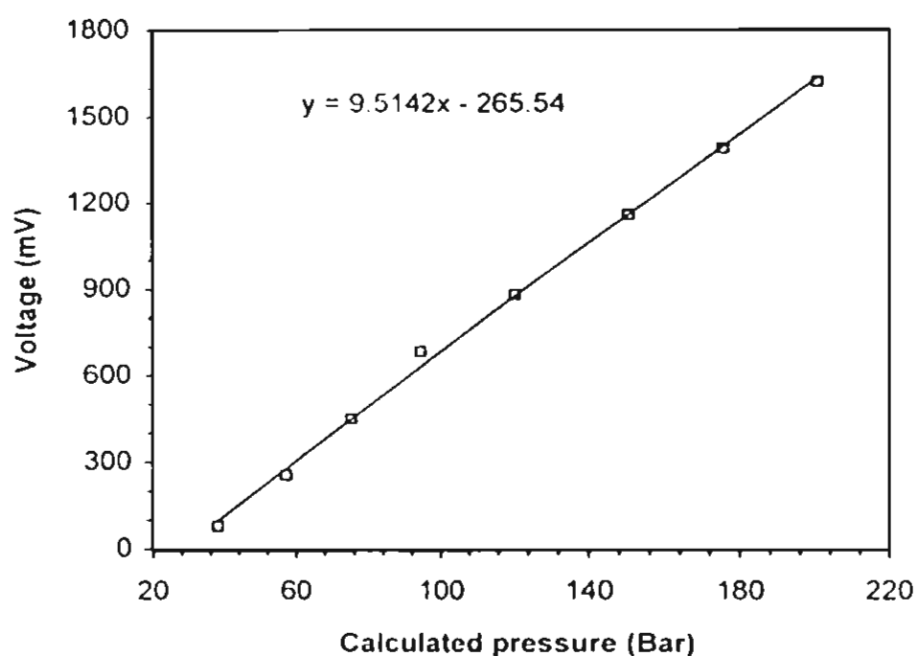


Fig. 5. Calibration of the PS sensor.

used for comparative reasons to illustrate the similarity or the difference in the flow curves of the material as a function of the transducers used [4]. The results of the flow curves obtained by using the two types of transducers are shown in Fig. 6. The following are to be noted:

- It can be seen that both transducers give very similar flow curves. The differences in the flow curves, obtained by the two pressure transducers, are within the experimental errors, this being in the order of $\pm 4\%$, in which it is acceptable in practice [12,13]. It can also be seen that for high shear rates the differences become smaller.
- Typical flow curves of the LDPE melt obtained by both pressure transducers exhibit a pseudoplastic non-Newtonian behaviour, the viscosity decreasing with shear rate, as one would expect [4,11–13].

The above points, coupled with the results in Fig. 6, are sufficient to confirm that the novel Pin-Spring pressure sensor is a reliable and useful device to accurately measure melt pressure in polymer processing.

2.5. Supplemental comments on the PS sensor

In this initial investigation, some comments with respect to advantages of the PS sensor over other transducers should be noted:

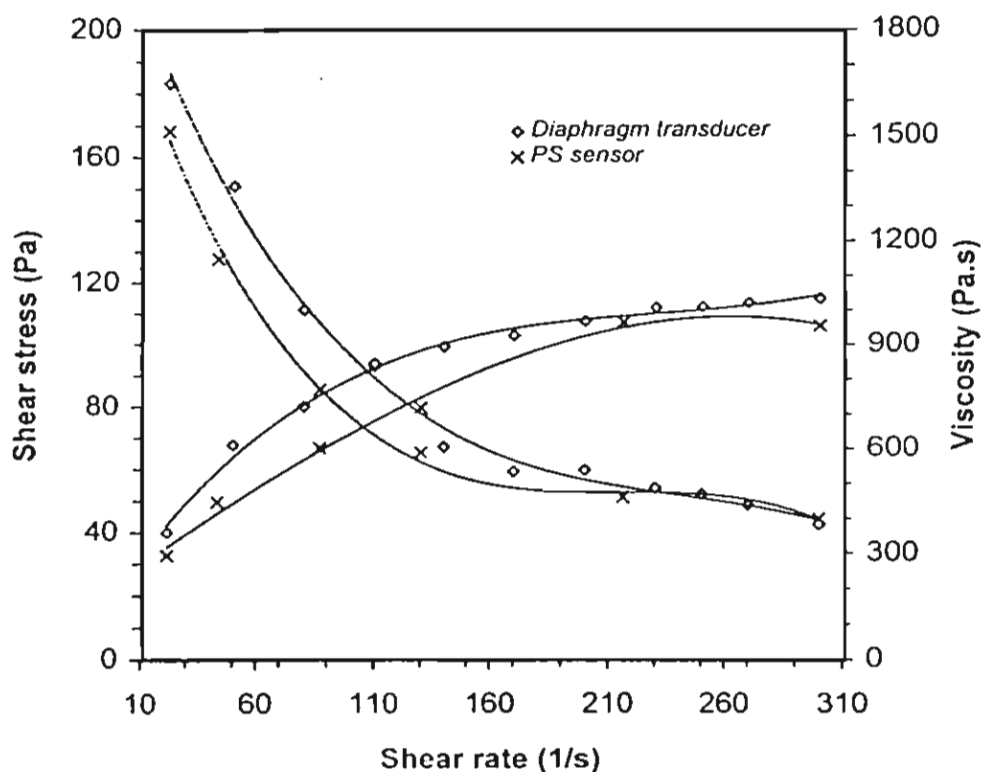


Fig. 6. Comparison of flow curves for LDPE melt obtained by the PS sensor and the diaphragm transducer, at 160°C test temperature and $L/D = 55/2.75$ (solid lines: shear stress data; dashed lines: viscosity data).

1. *Measuring range*: One of the advantages of the PS sensor over other pressure sensing devices is that the maximum measuring range for this sensor can be altered easily within one sensor. This can be achieved by varying the characteristics of the spring, including the free length, effective cross-sectional area, the number of convolutions, and the k constant value. It is very convenient to change the spring because all the components are designed and manufactured such that they can be dismantled very easily. In this paper, the so-called yellow spring is used and it gives a maximum pressure, that can be measured, of 200 bar. It should be borne in mind that each spring requires its own calibration.
2. *Versatility*: Because of (1) the PS sensor could be used in any type of polymer testing and processing equipment, such as capillary rheometers, extruders and injection moulders, that encounter different pressure values during processing. For instance, the pressure measurements in injection moulding machines may require a spring with greater k value than those in capillary rheometers. In the case of different sizes of fluid system, the sensor can also be adaptable in use by changing the size of the adapter (connecting between the sensor and the fluid system).
3. *Repeatability*: A number of pressure measurements of the polymer melt are carried out under conditions of calibration and flow property measurement (not shown in the paper). The results are obtained from the mean value of five separate determinations and it is found that the results are reproducible, the differences in the results of each run being very small ($\pm 1\%$).
4. *Accuracy*: The accuracy of the sensor in this work is calculated from the repeatabilities of the measured results and it is found that the sensor has a reading accuracy of $\pm 1\%$.
5. *Temperature effect*: The pressure measurements carried out by the PS sensor are found to be unaffected by temperature. In other words, the calibration curve (Fig. 5) is valid for the pressure measurements of any temperature, this being due to the fact that the sensing element (the variable resistance transducer) is isolated from the fluid system. This is another advantage of the sensor because this requires no further calibrations and additional electric elements, such as temperature-compensation gauges.
6. *Simplicity*: The design and construction of the sensor is very simple and easy to operate and calibrate. Since it is a simple mechanical sensing device it is robust. All the parts of the sensor are available and easily changed.
7. *Cost*: The total cost for making this type of sensor (as presented in this paper) is relatively low as compared to other pressure sensors like strain-gauge diaphragm pressure transducers. This is due to the simplicity of the sensor. The estimated cost (in Thailand) for production of one PS sensor is around \$75 whereas a strain-gauge diaphragm transducer costs around \$2500, excluding data logging system, computer and Value Added Tax.
8. *Other comments*: At the present time, it is felt that the PS sensor is more suitable for highly viscous fluids (such as polymer melts) with requirements of mid- to high-pressure measurements.

No further attempts have been made with respect to the development of the PS sensor. However, it is hoped that in our ongoing investigations and development of the sensor, this type of sensor would offer some significant contributions to pressure measurement in other types of fluid system.

3. Conclusion

The sensor called 'Pin Spring' is found to be novel with respect to its design and operation. It is found in this work that the sensor can be used to accurately measure the pressure of polymer melts in polymer processing. The sensor is reliable, simple and versatile in use, robust and low in cost. The reading accuracy of the sensor is found to be $\pm 1\%$.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Thailand Research Fund (TRF) for financial support throughout this work (Funding Code: PDF/48/2541). Our sincere thanks are also expressed to the Thai Plastics and Chemicals Co. Ltd for the use of a diaphragm pressure transducer.

References

- [1] Rauwendaal C. Polymer extrusion. New York: Hanser Publishers, 1990.
- [2] Sombatsompop N, Liolios K, Mohd-Jamel MII, Wood AK. Polym. Polym. Compos. 1997;5(4):259–64.
- [3] Sombatsompop N, Wood AK. ASME Fluid Engineering Division Conf. Fluid Measur. and Instrum. 1996;FED-239(4):385–90.
- [4] Sombatsompop N, Tan MC, Wood AK. Polym. Eng. Sci. 1997;37(2):270–80.
- [5] Sombatsompop N, Wood AK. Polym. Eng. Sci. 1997;37(2):281–90.
- [6] Report of the Dynisco UK Co. Ltd. Infrared temperature measurement for better and quality and bigger profit. Dynisco Day, DEMAG, July 1994.
- [7] Dally JW, Riley WF, McConnell KG. Instrumentation for engineering measurements. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1984.
- [8] Holman JP. Experimental methods for engineers. New York, McGraw-Hill Inc., 1996.
- [9] Bird JO. Science for engineering. Oxford: Butterworth-Heinemann Ltd, 1995.
- [10] Morris AS. Principles of measurement and instrumentation. London: Prentice Hall, 1988.
- [11] Wood AK, Read AGG, Lovegrove JGA. Plast. Rubb. Process. Appli. 1989;12(1):15–20.
- [12] Sombatsompop N, Wood AK, Godfrey IS. SPE ANTEC Tech. Papers 1997;43(1):388–92.
- [13] Sombatsompop N, Wood AK. ASME Fluid Engineering Division Conf.: Fluid Measur. and Instrum. 1996;FED-239(4):447–52.

ORIGINAL ARTICLE

Sombatsompop · N. Intawong

novel capillary rheometer for measurement of flow properties of polymer melts

Abstract This paper introduces a novel type of capillary rheometer, with respect to its design and operation, for investigating flow properties of a polymer melt. The constructed capillary rheometer is fitted into a standard tensile testing machine such that the mode of extrusion could be altered. The equipment features the possibility of moving either the piston or the barrel, the latter being novel in design. In addition, this work presents a novel pressure sensor for determining the pressure drop along the die in the capillary rheometer. It is found that the constructed capillary rheometer, coupled with the novel pressure sensor, is a useful device to monitor the flow properties of the polymer melt. The preliminary results show that the flow properties are dependent not only on the test medium used, but also on the mode of operation.

Key words Capillary rheometer · Polymer melts · Rheological properties · Pressure transducer · Non-Newtonian behaviour · Pseudoplastic fluids · Low-density polyethylene · Polymer melt flow properties · Polymer rheology Instrumentation

Introduction

It is essential in most fields of polymer processing to understand the rheological properties of polymer melts. Polymer melts generally exhibit non-Newtonian flow behaviour of a pseudoplastic nature. The flow properties of thermoplastic melts, including rubber compounds, are important in processing, but are complicated by a number of

parameters such as flow rate, pressure, and temperature. Flow properties of a polymer melt are usually expressed in terms of plots between either wall shear stress and wall shear rate or apparent viscosity and wall shear rate. Such properties are widely determined using a capillary rheometer [1]. The common type of the capillary rheometer consists of a heated barrel at the bottom of which is fitted a small capillary die. The principle is that a polymer melt is extruded through a capillary die by the action of a piston which is driven at a constant speed. This gives a constant flow rate and hence a constant shear rate test. A pressure transducer is used to measure the melt pressure generated by the motion of the piston and is usually situated at the base of the barrel just above the die face. The other case is a pressure driven rheometer, where the volumetric flow rate is the measured quantity.

Many workers [2–10] have carried out the measurements of the flow properties of polymer melts using various styles of capillary rheometers. It has been found that the results of flow properties of polymer melts varied with the style of rheometer used. Horsfall and Sambrook [2] compared measurements of rubber processability obtained using different devices such as rotational (Mooney Viscosity), compression (Williams Plasticity) plastometers and extrusion rheometers, and found that the results obtained from the capillary rheometer seemed to give better detailed descriptions, the results being more consistent. Wood et al [3] investigated the flow properties of polymer melts using various designs of rheometers, these including a constant shear rate viscometer, a constant shear stress viscometer, and an injection moulding machine, using the same die. The results showed that the flow characteristics of a range of polymer melts obtained were different, the results varying with the style of rheometer used. It was suggested that the design of the apparatus and the flow patterns occurring in the barrel of the rheometer had a significant effect on the measured flow properties, these results and suggestions being supported by their later work [4]. This statement was deduced based on the fact that, for a polymer melt flowing along a tube, there is a loss in driving

Sombatsompop · N. Intawong (✉)
Division of Materials Technology, School of Energy and Materials,
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT),
Bangmod, Bangkok 10140, Thailand
mail: inarnpop@cc.kmutt.ac.th
fax: +662-4279062

Present address: N. Intawong
also at Faculty of Industrial Engineering,
Chiangmai Institute of Technology North Campus,
Chiangmai, Thailand

pressure (pressure drop) at the entrance region. The pressure loss is partly converted into viscous dissipation due to converging flow on entering the capillary die, and its acceleration due to velocity profile rearrangement. In other words, the pressure loss was influenced by the arrangement of the flow patterns at the die entrance [4]. This view was also correlated to the results obtained by Wang [5] who suggested that the relationships between entrance pressure loss and the rheological characteristics of a rubber compound were very much affected by die geometry and rheometer used, which was closely related to the flow of the polymer at the die entrance. More recent evidence [4] investigates the flow properties, with respect to apparent viscosity, of carbon black filled rubber compounds using a capillary rheometer (constant shear rate viscometer) having two different tip designs of piston, one being a flat-tip (which is usually used in the constant shear rate viscometer) and the other being a dome-tip (which is similar in design to the shape of the ball bearing in the constant shear stress viscometer). The results obtained from the use of the two pistons within the same rheometer (using the constant shear rate viscometer) were found to be different. The results obtained from the use of dome-tip piston were very similar to those generated by using the constant shear stress (ball bearing) viscometer. The discrepancies in the results from the two pistons were larger than those influenced by varying concentrations of carbon black. These are thought to be caused by different flow patterns occurring and developing in the barrel which were affected by the design and geometry of the machine used, this being referred to as the piston design. More information concerning the effect of rheometer design with respect to geometry and shape on flow patterns of polymer melts were detailed elsewhere [6-7]. The rheological results of polymer melts were found [8] to be dependent on die size and geometry, and the melt shear viscosity and shear stress varied with die size and die entry angle, melt viscosity and shear stress increasing with decreasing size of the die diameter and/or increasing die entry angle, this being related to changes in characteristics of the elastic and viscous dissipation of energy during the flow. It was also observed [7] that the flow behaviour was dependent on the action of the piston along the barrel. Recent investigations [9] concerning the investigation of flow patterns of polymer melts occurring in the barrel of a capillary rheometer and an injection molding machine suggested that the nature of the flow developing in the barrel of these two machines was very similar, but not the same, and influenced the rheological properties of the melts being measured.

Relation to previous work

Attempts [10] have been made to correlate the results obtained from different designs of the measuring equipment. That is, one tries to take the results given from one piece of equipment and adjust or convert them to obtain

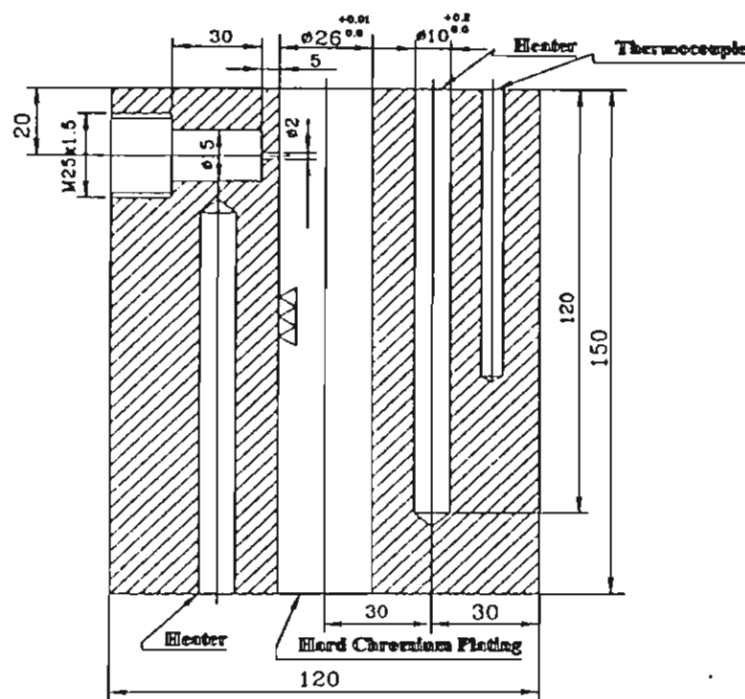


Fig. 1 Plan and section view of the barrel system (dimensions in mm)

the results for another piece of equipment. So far, this encounters many difficulties, including modeling and factors used for such conversion [10-12]. This work is initiated in order to investigate some other factors concerning the effect of the design of rheometers on flow properties of polymer melts. In this work, a novel type of capillary rheometer, coupled with a novel pressure sensor, is designed and manufactured so that it can be fitted into a standard tensile testing machine. The equipment features the possibility of moving either the piston or the barrel, the latter being novel in design. This is interesting and of practical importance because it would help to understand the flow behaviour and other flow related properties occurring in polymer processing. It is aimed in this paper to preliminarily investigate the flow properties of polymer melts as a function of the operation modes (either moving the piston or moving the barrel).

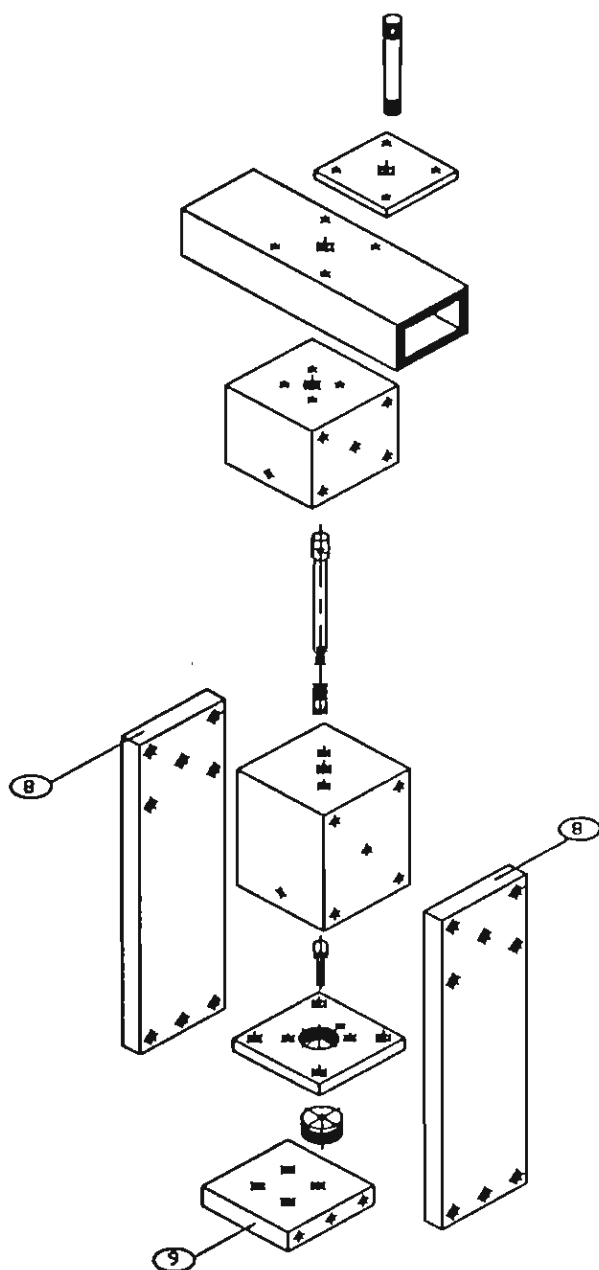
Experimental

Experimental design of the novel capillary rheometer

In this work, a novel capillary rheometer is designed and manufactured for determining the flow properties of polymer melts. The constructed rheometer is a constant shear rate rheometer, and it consists of a number of components as follows:

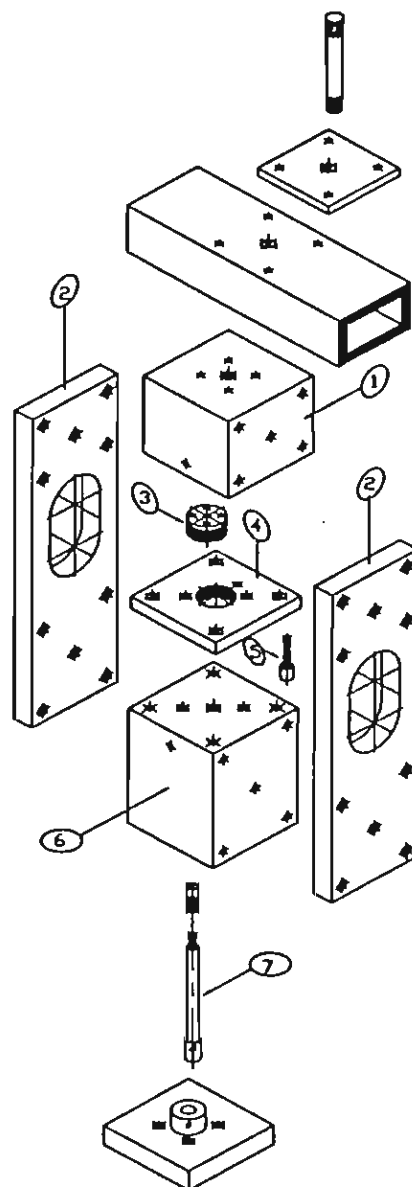
1. **Barrel:** The barrel system was specially designed such that it could be fitted into an AGS-500 D(SHIADZU) Instron tensile testing machine. The barrel is made of SKD61 tooling steel that can be used at elevated temperatures. The fitting of the barrel onto the tensile testing machine is designed so that it allows the rheometer to move either the barrel or the piston. The barrel system including its dimensions is shown in Fig. 1. A small pressure hole (2 mm in diameter) is located near the bottom of the barrel (near the die entrance) for pressure measurement. The

Figure 2a



Moving Piston

Figure 2b



Moving Barrel

Part Name

1. Piston Holder
4. Barrel Plate
7. Piston

2. Side Plate (1)
5. Die
8. Side Plate (2)

3. Cap
6. Barrel
9. Bottom Plate

2a, b The experimental arrangements of the capillary rhcometer with moving piston (a) and moving barrel systems (b)

side surface of the barrel is hardened by hard chromium plating [13], giving the hardness of approximately 50–60 HRC. The barrel has four holes located along its length for installing heaters and a thermocouple (Type K).

Die and die holder: The die used is 55 mm long (L) and 2.75 mm in diameter (D). A separate die plate (holder), designed for holding the die, is bolted to the bottom of the barrel. The material used for making the die and die holder is made of mild steel (T37).

Piston: The piston is divided into two parts, these being piston body and piston tip. The piston body is made of mild steel (T37) while the piston tip is made of copper.

High temperature O-ring: An O-ring made of high temperature rubber in the form of an annular ring is used to prevent leakage of the polymer melt along the piston. This O-ring is placed between the piston surface and the polymer melt during extrusion.

Operation control systems: These can be divided into three separate systems, these being temperature, pressure, and test speed control systems.

Temperature control system: It consists of four heaters, a Type K thermocouple and a Eurotherm Type 018 temperature controller, these being used for monitoring and controlling the temperature of the apparatus (rheometer).

Pressure control system: This work uses a novel pressure sensor designed and developed by Sombatsompop et al, the sensor being so-called Pin-Spring (PS) pressure sensor whose plan and section view are being published elsewhere [14]. The sensor is connected and situated at the base of the barrel just above the die face using an adapter. The principle use of the PS sensor is very simple. It uses a mechanical system, which is novel in design, to transmit the pressure from the fluid system, utilising a variable resistance transducer (sliding contact type) to monitor changes in pressure and using a computer to display the data in the form of electrical voltage and real pressure values. The details of the PS sensor as to its design and construction are discussed later.

Test speed: With the design of the rheometer in this paper, either the barrel or the piston is able to move. The speed of the movement is used to calculate the shear rate of the system. The test speed is controlled and monitored by use of a transducer that is applied with the standard tensile testing machine, the accuracy being in the order of $\pm 0.1\%$.

The experimental apparatus has to be fitted into the standard tensile testing machine. Two connecting plates and a piston holder are required. Figure 2 shows the experimental arrangements of the constructed capillary rheometer for the moving piston (Fig. 2a) and the moving barrel (Fig. 2b) systems, the latter being novel in design. The constructed rheometer is assembled with most care to ensure the alignment of the apparatus.

Experimental procedure

Low-density polyethylene (LDPE, Exxon Chemical Ltd, 100BW) is used to investigate the flow properties, the measurements being made using the arrangements of the novel capillary rheometer coupled with a novel pressure sensor (PS sensor), which is attached to the barrel of the rheometer. The test temperature range used are in the range of 160 to 200°C and the die used L/D of 55/2.75. The experimental procedures are commenced allowing the apparatus to warm up and the required temperature to stabilise. The die and die holder are inserted. The barrel is charged with the polymer using a charging tool to regularly tamp on the polymer. The piston is mounted, the motor starts and the piston drive engages in order to compress the polymer slightly. The polymer is left in the barrel for a period of ten minutes in order to allow the polymer to melt and consolidate. In the case of moving piston (Fig. 2a), the piston drive is engaged and the polymer melt extrudes through the die. The pressures generated at various piston speeds are recorded and flow curves are generated. In the case of moving barrel (Fig. 2b), the piston is rigidly mounted at the base of the tensile testing machine and the barrel and die

move downwards along the piston at various speeds, these also generating the pressures. The pressures generated at various barrel speeds are recorded and flow curves are generated. The barrel and piston speeds are used to calculate the shear rate ($\dot{\gamma}$) while the pressures generated are used for calculating the shear stress (τ). Shear rate and shear stress data are obtained from the experimental data generated on the novel capillary rheometer using Equations 1 and 2. It should be noted that Bagley corrections are not applied to the flow data generated. In this case, the data is solely being used for comparative reasons [7] to illustrate the similarity or the difference in the flow curves of the material as a function of the operation systems used.

$$\text{Apparent wall shear stress} = \tau = \frac{RP}{2L} \quad \text{Eqn.1}$$

$$\text{Apparent wall shear rate} = \dot{\gamma} = \left[\frac{(3n+1)}{4n} \right] \left[\frac{(4Q)}{\pi R^3} \right] \quad \text{Eqn.2}$$

where R is the radius of the die, P is the pressure drop along the die, L is the length of the die, Q is the volumetric flow rate along the capillary die and n is the power law index.

Results and discussion

It should be noted that the results of flow properties obtained in this work are not to be compared with other systems. The objectives of the work are to introduce a novel type of capillary rheometer with respect to its design and operation, and also to preliminarily investigate the effects of the operation modes (moving piston and moving barrel) on the flow properties of the polymer melts using the constructed capillary rheometer. A novel type of pressure sensor designed and developed by the authors for measuring the pressure drop along the die is also presented with a relevant reference [14].

In order to verify that the constructed capillary rheometer is reliable and gives accurate results of the flow properties, the repeatabilities in the measured results are required, this being carried out by taking a number of measurements, for a given test condition (180°C test temperature). The results, plots of apparent wall shear stress versus apparent wall shear rate, are shown in Figs. 3a and 3b for the moving piston and barrel systems respectively. It can be seen that the flow curves of each run for both system are very similar, the differences in the results of each run being within the experimental errors of the order of $\pm 3.5\%$ and the repeatabilities of the results being independent of the mode of operation. This confirms that the rheometer is reliable for measurements of the flow properties of polymer melts.

Figure 4 shows a comparison of flow curves for LDPE melt at various temperatures generated using the constructed capillary rheometer with two different modes of operation (moving piston & moving barrel). Figure 5 shows plots of apparent viscosity against apparent wall shear rate for LDPE melt, the data being the same as used with Fig. 4. It is evident that the LDPE melt exhibits a pseudoplastic non-Newtonian behaviour. That is, the viscosity decreases with shear rate [1], this being the case for the two operation modes. However, the flow properties seem to be dependent on the mode of operations used. For a given test temperature, it is clearly

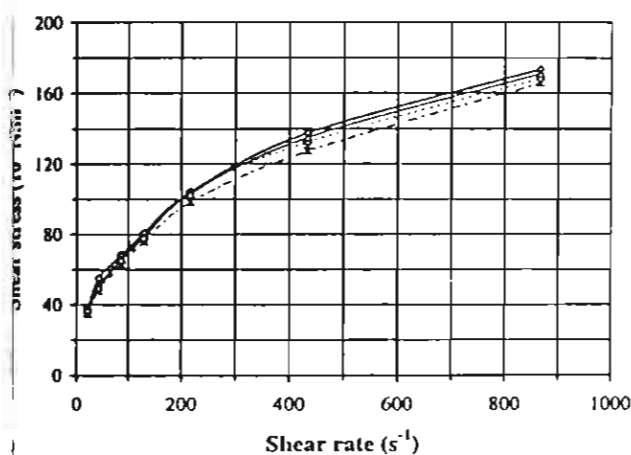
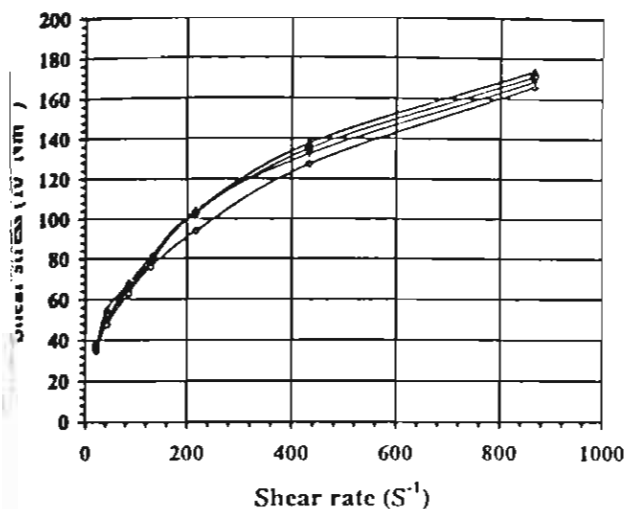


Fig. 3a, b A set of measurements of flow properties of the LDPE melt using the constructed capillary rheometer with moving piston (a) and moving barrel (b) at 180°C test temperature, $L/D = 55/2.75$

observed that the flow curves from the two operation modes are different. The discrepancies in the results are relatively large, this being in the order of 10–20%. After taking account of the experimental errors, the differences in the results are strongly caused by the mode of operation used. This could be a result of the flows occurring in the two operation modes. Recent evidence [3, 12] has indicated that the flow properties of polymer melts are dependent on the design of the apparatus used, this influencing flow patterns occurring inside the barrels. Relating to this present investigation, the flow patterns occurring in the barrel of the two operation modes may probably be different and thus resulting in the discrepancies in the measured results.

In this work, the moving of barrel when measuring the flow properties of polymer melts in a capillary rheometer is interesting and of practical importance because it would help to understand the flow behaviour and other flow related properties occurring in polymer processing [15]. In this initial work, no further attempts have been made regarding the cause of the discrepancies in the rheological results obtained by the moving piston and moving barrel systems. In our ongoing investigations,

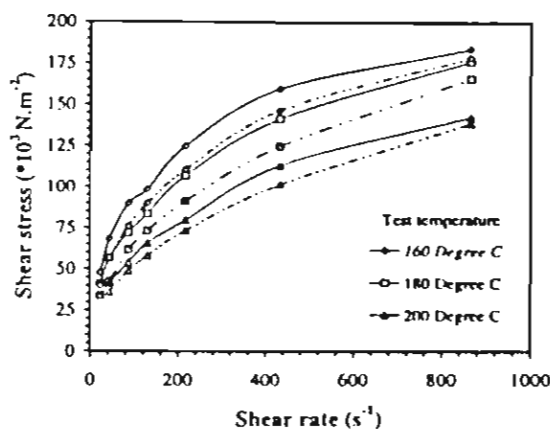


Fig. 4 Comparison of flow curves for LDPE melt in the rheometer with moving piston system (solid lines) and moving barrel system (dashed lines), at various test temperatures

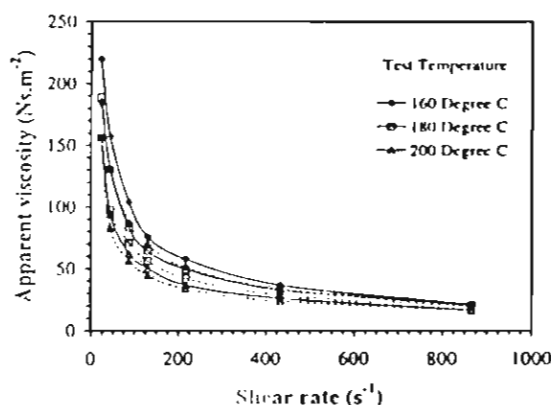


Fig. 5 Comparison of plots of apparent viscosity versus wall shear rate for LDPE melt in the rheometer with moving piston system (solid lines) and moving barrel system (dashed lines), at various test temperatures

we are currently examining the effects of the operation modes on flow patterns and other flow related effects of polymer melts in the capillary rheometer. It is hoped that these would provide the definitive cause of the discrepancies in the results reported in this paper, and to offer some significant understandings as to the measurements of the flow properties of polymer melts in capillary rheometers.

Conclusions

A novel capillary rheometer which features the possibilities of moving the piston and the barrel is introduced and can be used to investigate the flow properties of the polymer melts. The experimental results show that the LDPE melt exhibits pseudoplastic non-Newtonian behaviour and the flow properties are dependent not only on the test temperature, but also on the mode of operation. It is thought that the discrepancies in the results are due to the flows occurring in the barrel that are varied with the mode of operation.

Acknowledgement The authors would like to thank the Thailand Research Fund (TRF) for financial support throughout this work (Funding Code: PDF/48/2541).

References

- Brydson JA (1981) Flow properties of polymer melts, George Godwin, London
- Horsfall F, Sambrook RW (1972) RAPRA Bulletin, August: 217
- Wood AK, Read AGG, Lovegrove JGA (1989) Plast Rubb Comp Appl 12: 15
- Sombatsompop N, Wood AK (1999) J Sci Soc Thail (in press)
- Liang JZ (1996) Plast Rubb Comp Proc Appl 25: 495
- Sombatsompop N, Wood AK (1997) Polym Eng Sci 37: 281
7. Sombatsompop N, Tan M, Wood AK (1997) Polym Eng Sci 37: 270
8. Liang JZ, Huang YO, Tang GJ, Ness JN (1992) Plast Rubb Comp Proc Appl 18: 311
9. Sombatsompop N, Wood AK, Godfrey IS (1997) SPE ANTEC Tech Papers 43: 388
10. Popovic RS, Plavsic M, Popovic RG, Krusevac NI, Kauts Gumm Kunsts 44: 702
11. Todd DB, Gogos CG, Essegheir M, Yu DW, Widagdo S (1997) Plast Eng, March: 107
12. Sombatsompop N (1999) Progr Rubb Plast Technol 15: 2
13. Greenwood DJ (1971) Hard Chromium Plating: Handbook of Modern Plactice, Robert Draper Ltd., Teddington
14. Sombatsompop N, Intawong N-T, Intawong N-S (1999) Polym Test (in press)
15. Sombatsompop N, Wood AK (1998) Polym-Plast Technol Eng 37: 317

Error Sources in Rheological Measurements of Carbon Black Filled Rubber Compounds

N Sombatsompop

Division of Materials Technology, School of Energy and Materials,
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) Bangmod,
Bangkok 10140, Thailand

A K Wood

Manchester Materials Science Centre, University of Manchester & UMIST
Manchester, England

Abstract

Rheological properties of natural rubber compounds filled with carbon black were determined using two different designs of rheometers. The results from the two rheometers for a given test condition were found to be different. The discrepancies in the results due to the design of the rheometers were observed to be larger than that due to the effect of material characteristics. This was considered to be caused by the differences in flow patterns occurring in the rheometers.

Keywords: Rheological properties, Polymer melt flow, Shear heating, Capillary rheometer, Rubber compounds

Introduction

It is well known that polymer melts exhibit viscoelastic behaviour under normal processing conditions and their rheological characteristics depend on how the polymer melt is being deformed [1]. The extent of deformation and deformation history are strongly affected by the flow geometry which is determined by the types of deformation [1-2]. For instance, the rheological characteristics of a polymer melt in an injection moulding machine are different from those in an extruder. It is essential to understand the effects of machinery on the rheological behaviour occurring. In injection moulding, the physical, optical and mechanical properties of a moulding are determined by the rheological characteristics of the polymer melt, these being melt viscosity and elasticity [2-3]. In extrusion, the processing of polymeric materials involves drag flow deformation. The residence time and the volumetric flow rate of the melt are controlled in order to prevent thermal degradation and melt instability. The rheological characteristics can become unstable if badly designed screws and dies are used.

Generally, flow properties of a polymer melt are determined using a capillary rheometer [4]. The common type of the capillary rheometer consists of a heated barrel at the bottom of which is fitted a small capillary die. These devices are of two general designs, these being constant shear stress devices such as Davenport Extrusion Rheometer, and constant shear rate devices such as Davenport High Shear Viscometer. In practice, when determining the flow characteristics of a polymer melt using a rheometer (or viscometer) the measurements taken are

pressure drop along the capillary (P), die length (L), die radius (R) and volumetric flow rate (Q). The apparent shear stress (τ_w) and apparent shear rate ($\dot{\gamma}_w$) at the wall are usually used and they can be calculated as follows [4-5]:

$$\tau_w = \frac{RP}{2L} \quad \text{Eqn. 1}$$

$$\dot{\gamma}_w = \left[\frac{(3n+1)}{4n} \right] \left[\frac{4Q}{\pi R^3} \right] \quad \text{Eqn. 2}$$

where n is the power law index

The viscosity (η) of polymer melts is practically expressed in the form of [4-5]:

$$\eta = \frac{\tau_w}{\dot{\gamma}_w} \quad \text{Eqn. 3}$$

In practice, the flow data needs to be *accurately* determined. Flow curves of apparent wall shear stress against apparent wall shear rate are widely accepted as the method for categorising the rheological characteristics of polymer melts. Errors in such measurements may lead to disaster events during processing of polymer products such as badly designed screws and dies, wears in processing equipment, improper processing conditions used and unwanted features of the products. Rudin and Schreiber [6] investigated viscous and elastic dissipations of polymer melts by determining the effect of testing time on the variations of output rates. Significant variations in output rates (Q) (exceeding the initial output rate by as much as 40%)

with extrusion time were found to be due to changes in melt viscosity and decreases in elastic deformation, that is increases in viscous deformation. However, since the time scale of test is normally very short the error in Q can be negligible [7]. Horsfall and Sambrook [8] compared measurements of rubber processability obtained using different devices such as rotational (Mooney viscosity), compression (Williams plasticity) plastometers and extrusion rheometers and found that the results obtained from the extrusion rheometer seemed to give better detailed descriptions. Wood et al [9] utilised a Davenport High Shear Viscometer to assess the processing stability of polyethylene melts and observed large changes in rheological characteristics under prolonged shear at elevated temperatures. Recent evidence by Wood et al [4] and Sombatsompop and Wood [10] indicated that the differences in rheological properties of thermoplastic melts, such as LDPE and PS, using different designs of rheometers with the same die appeared to be significant especially at high shear rates. The effect of test conditions such as temperature, pressure, and shear rate on the flow properties of polymer melts have been widely investigated by Cogswell [11]. Sombatsompop et al [1] studied the effect of test temperature, mastication time and thermal history on the flow curves and power-law index variations of unfilled natural rubber compounds using a extrusion rheometer. They found that the rubber compounds were pseudoplastic non-Newtonian fluids and the viscosity was observed to decrease with increasing test temperature and to increase with increasing molar mass. In this current work, rheological properties of unvulcanised natural rubber compounds filled with different concentrations of carbon black (from 0-50 parts per hundred rubber, phr) were

investigated using two different styles of rheometers. The variations of the rheological results were discussed in detail. Finally possible reasons causing such variations were given and verified.

Experimental

Material Preparation

All natural rubber formulations were based on the same bale of smoked sheet SMR-60CV supplied by the Malaysian Rubber Producers Research Association. Carbon black was supplied by WOM Polymers Ltd (grade NB102) as a preformulated masterbatch of 50% carbon black and 50% SMR-60CV by weight. The initial stage of the testing process was the mastication of the natural rubber. Batches of 400 g of natural rubber was masticated and milled on a two-roll mill with the nip set at 0.1 cm for 20 minutes according to previous investigations [1,7,12], the mill rolls being cooled using chilled water at 15°C. Where appropriate, carbon black was added in the required proportions (from 0-50 parts per hundred rubber, phr) for a further ten minutes. Continuous cutting and folding ensured good dispersion before taking off the mill.

Experimental Apparatus

Rheological properties of unvulcanised natural rubber compounds filled with different concentrations of carbon black were determined using two different designs of rheometers (viscometers). Two conventional rheometers were used, these being a Davenport Extrusion Rheometer (sometimes called Capillary

Rheometer) and a High Shear Viscometer. The resulting data were used to calculate apparent wall shear stress and apparent shear rate according to equations 1 and 2. The die used had L/D of 15/1.5 and test temperature was 80 °C unless otherwise indicated. The experimental procedure on the Devenport Extrusion Rheometer and the High Shear Viscometer were explained elsewhere [2,10].

Results and Discussion

The rheological properties of a polymer melt are usually reported in the form of a flow curve, a plot of apparent shear stress against apparent shear rate. Bagley corrections [1,5] were not applied to the flow data generated because, in this case, the data is solely being used for comparative reasons to illustrate the magnitude of the changes observed in the flow characteristics of the materials as a function of the design of the apparatus and temperature used.

Figures 1 and 2 show flow curves for the rubber compounds having different concentrations of carbon black using the Extrusion Rheometer and the High Shear Viscometer respectively. It was found that the results from the two rheometers were different. However, it was clear that the rubber compounds exhibited a pseudoplastic non-Newtonian behaviour, showing non-linear relationship between apparent shear stress and apparent shear rate. For both rheometers, it was observed that the apparent shear stresses (hence apparent viscosity) increased, for any shear rates, with increasing concentration of carbon black. The flow curves from the two rheometers were observed to be different. On the whole, for any

given apparent shear rate, the apparent shear stresses measured by the High Shear Viscometer were found to be higher than those measured by the Extrusion Rheometer. It was extremely interesting to note that the differences of the flow curves due to different concentrations of carbon black seemed to be less pronounced (only 10-15% for 20 phr difference in carbon black content) than those (around 25-35%) of the flow curves obtained from the two rheometers for a given content of carbon black, all the percentage differences being shown in Table 1. It was expected to observe changes in the results with adding various amount of carbon black and the results from two rheometers for a given content of carbon black should be the same. The latter was not seen to be the case, the results from the two rheometers for a given condition being different. This phenomenon was extremely unacceptable in the determination of processability and the flow properties of polymer melts. This led to a significant question of which rheometer gave accurate and reliable results.

In this present investigation, it was aimed to analyse the error sources which caused the variations in the results obtained from two styles of rheometer. It is important because one wishes to obtain correct and reliable data in order to control and determine the processability of rubber compounds during processing. The possible causes of the differences in the results could arise from the following:

- Changes in temperature of the compound
- Characteristics of the compound
- Errors in pressure measurement

- Changes in density of the polymer

Changes in temperature of the compound

Initial test temperature was set at 80 °C, this being the temperatures of die and barrel. During the tests, compound temperatures were measured instantly as the melt was extruded through the die at various extrusion speeds (shear rates) using a thermocouple probe, which was located near the die exit. It was very difficult to accurately measure the melt temperature because the extrudate diameters were very small (around 2.5-3 mm). The temperatures of the extrudates were measured at the die exit of the two rheometers and found to be around 83-85 °C for all the shear rates. In general, one would expect to observe a larger increase in melt temperature due to shear heating resulting from the flow of the material from the barrel to the die, but this was not found to be the case. This may be due to the fact that the effect of heat conduction through the die wall became dominant, this leading to a reduction of melt temperature. Recent evidence by Sombatsompop and Wood [13] has indicated that the effect of heat conduction on changes in melt temperature (usually causing a reduction of melt temperature) became more pronounced than that of shear heating (usually causing a increase in melt temperature) in the case where the die diameter was less than 2 mm [7,13]. Therefore, the increase in melt temperature in this work (with the die of 1.5 mm diameter) became less dependent on the shear rate. In this work, if the change in extrudate temperatures caused the variation in the results, one would expect to observe a decrease in the apparent shear stress (or viscosity) at 85 °C test

temperature, when comparing to flow curves at the test temperature of 80 °C. Figure 3 shows flow curves at test temperature of 85 °C generated using the two rheometers. The results were found to be very similar, within the experimental error, to those at 80 °C test temperature. This indicated that the change in melt temperature was not the major cause of the variations in the results obtained. This view is in good agreement with Wood et al who indicated that the effect of temperature change on the flow properties in a capillary rheometer was relatively small [4]. It should also be noted that it was very difficult to generate the flow curves at a controlled temperature due to the fact that melt temperature will change continuously during testing [14].

Characteristics of the compounds

These involve the molecular weight of the polymer and carbon black dispersion in the compound. The type of the rubber and mastication procedures used in this work were the same as those used in the previous investigations [1]. Therefore, the characteristics of the material were known and controllable. In addition, the compounds used to load into the Extrusion Rheometer and the High Shear Viscometer were obtained from the same batch of mixing. As a consequence, it was reasonable to believe that the variations in the results from the two rheometers were not caused by the characteristics of the materials used.

Errors in pressure measurement

With respect to pressure measurement in the Extrusion Rheometer, the pressure transducer was calibrated before being used [1,4]. However, in order to ensure that the pressure transducer gave accurate and reproducible results, a number of pressure measurements were taken at two different shear rates (100 and 200 s⁻¹) as a function of time. For a given shear rate, the pressure measurements were being recorded as the piston was travelling along the barrel length. The time period of ten seconds was used and time interval between each measurement was approximately 2 seconds. The results of pressure profiles as a function of time are shown in Figure 4. It can be seen that the pressure values during the test were stable within the experimental error of $\pm 5\%$ for both shear rates, this indicating that the measurements of melt pressure were reproducible and the discrepancies in the results were not caused by the pressure measurement.

Change in density of the polymer

In the case of High Shear Viscometer, the determination of volumetric flow rate (Q) requires a density value of the compound which was, in this work, measured using a Melt Flow Index Tester. The density of the rubber compounds is expected to change due to the effect of pressure applied to the system and the change in melt temperature [15]. The latter one was already mentioned to be very small and regarded to be negligible. If the melt density changed during the test, one would expect to obtain a change in output of the extrudate. If this was the case, the results generated from the High Shear Viscometer should be offset from those

obtained using the Extrusion Rheometers for a given condition [4]. However, this phenomenon was not seen here. Consequently, the change in melt density during the test was not the reason for the difference in the results.

The authors considered that the cause of obtaining the different results from two different styles of rheometer may probably be some differences in flow patterns occurring in the barrels of the two machines. This statement was drawn based on the fact that, for a polymer melt flowing along a tube, there is, at the entrance region, a loss in driving pressure (pressure drop). The pressure loss is partly converted into viscous dissipation and acceleration due to the converging flow before entering the capillary die and due to consequent velocity profile rearrangement [2]. In other words, the pressure drop is influenced by the arrangement of the flow patterns at the die entrance. Different flow patterns occurring will affect efficiencies in transferring or displacing the material from the barrel to the die, and this therefore affects pressure drop [16]. Early work by Sombatsompop and Wood has found that overall flow patterns were influenced by the design of the apparatus such as barrel/die system [12,17]. In relation to this present work, flat-tip piston was used in the Extrusion Rheometer whereas a ball bearing (having a dome shape) was used in the High Shear Viscometer, to displace the material. The author strongly felt that this factor (difference in piston design) may have led to the changes in the flow patterns in these two rheometers. This speculation was therefore proven by designing the tip of the piston in the Extrusion Rheometer to be the dome-shape (see Figure 5) and then the measurements of the

rheological properties of the compounds were carried out using the same rheometer (capillary rheometer) with the use of the flat-tip and dome-tip pistons, the results being shown in Figure 6. For comparison purposes, flow curves with the same conditions as used in Figure 6, were generated using the two rheometers and the results are shown in Figure 7. It can be seen that the flow curves generated by two different designs of piston tip in Figure 6 were different although the same machine and material were used, but the results gave similar values to those appeared in Figure 7. This implied that the rheological properties of the rubber compound were influenced by the flow patterns, occurring in the rheometer, which are in turn affected by the design of the rheometer [1,4,17]. However, looking at more details, it can still be seen that the results of flow properties obtained by using the dome-tip piston (represented as the High Shear Viscometer) were greater for any shear rate. Therefore, it can be concluded here that the flow properties of polymer melts being measured were strongly affected by the design of rheometers and the variations in the results from the two rheometers used in this work were caused by the flow patterns occurring in the rheometers. However, beyond the scope of this paper, the relationship between the flow patterns and the rheological properties of polymer melts for various designs of a rheometer should be sought and would be a stronger evidence to verify the conclusion that was drawn in this work.

Conclusion

It can be concluded that the rubber compounds with and without carbon black exhibited a pseudoplastic non-Newtonian behaviour. The apparent shear stress of

the compounds increased with increasing carbon black content. The rheological properties of the rubber compounds determined by using two different designs of rheometer for a given test condition were found to be different. The discrepancies due to the design of the rheometers were observed to be larger than that due to the effect of material characteristics. The variations of the rheological results obtained using two different designs of rheometers were thought to be caused by differences in flow patterns occurring in the rheometers.

Acknowledgements

The authors would like to thank Thailand Research Fund (TRF) for financial support throughout this work (Funding Code: PDF/48/2541).

References

1. Sombatsompop N, Tan MC & Wood AK - *Polym. Eng. Sci.* -37(2), 270, 1997.
2. Han CD - *Rheology in Polymer Processing* - Academic Press, New York, 1976.
3. Lee W & George HH - *Polym. Eng. Sci.* - 18 (1), 146, 1976.
4. Wood AK, Read AG & Lovegrove JGA - *Plast. Rubb. Proc. Appl.* -12 (1),15, 1989.
5. Fenner RT - *Principles of Polymer Processing* - Macmillan Press, London,1979.
6. Rudin A & Schreiber HP - *J. Polym. Sci.* - 44 (1), 261, 1960.
7. Patel MK - *PhD Thesis* - University of Manchester & UMIST, UK, 1989.
8. Horsfall F & Sambrook RW - The Davenport Extrusion Rheometer - *RAPRA Bulletin*, August, 217, 1972.

9. Wood AK, El-Rafey E, Yue M, Sims GLA & Healey G - Processing Stability of Polyethylene - *J. Appli. Polym. Sci.: Appli. Polym. Symp.*, 55, 117, 1994.
10. Sombatsompop N & Wood AK - *ASME Fluid Measurements & Instrumentation* - FED-Vol. 239 (4), 447, 1996.
11. Cogswell FN - *Polymer Melt Rheology* - George Godwin, London 1981.
12. Sombatsompop N, Wood AK & Godfrey IS - *SPE ANTEC Tech. Papers* - 43 (1), 392, 1997.
13. Sombatsompop N & Wood AK - *SPE ANTEC Tech. Papers* - 44(1), 482, 1998.
14. Sombatsompop N, Wood AK & Yue MZ - *ASME Fluid Measurements & Instrumentation* - FED-Vol. 239 (4), 371, 1996.
15. Sombatsompop N, Liolios K, Mohd Jamel MH & Wood AK - *Polym. Polym. Comp.* - 5 (4), 259, 1997.
16. Sombatsompop N & Intawong N - *Materials Research Innovations* - In press.
17. Sombatsompop N & Wood AK - *Polym. Eng. Sci.* - 37 (2), 281, 1997.

Carbon black content (pph)	Average Differences of the results between two rheometers (%)	Comparative carbon black content (pph)	Average Differences of the results (%)
At 0	30-35	At 0 and 10	10-12
At 10	30-35	At 10 and 30	10-15
At 30	25-30	At 30 and 50	10-15
At 50	25-30	-	-

Table 1: Variations of the rheological results influenced by rheometer design and carbon black concentration

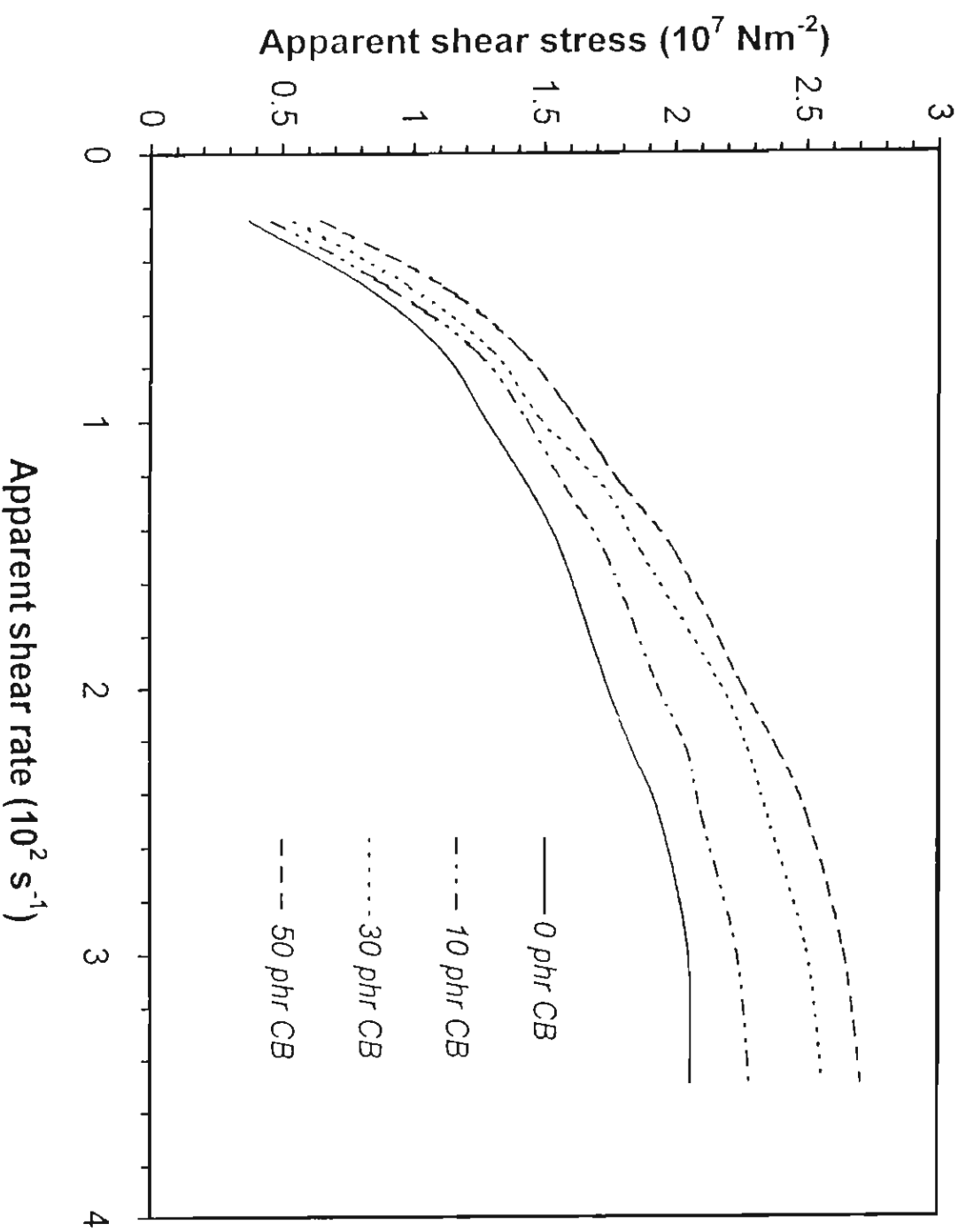


Figure 1: Plots of apparent shear stress against apparent shear rate of unvulcanised rubber compounds at 80 °C using the Capillary Rheometer

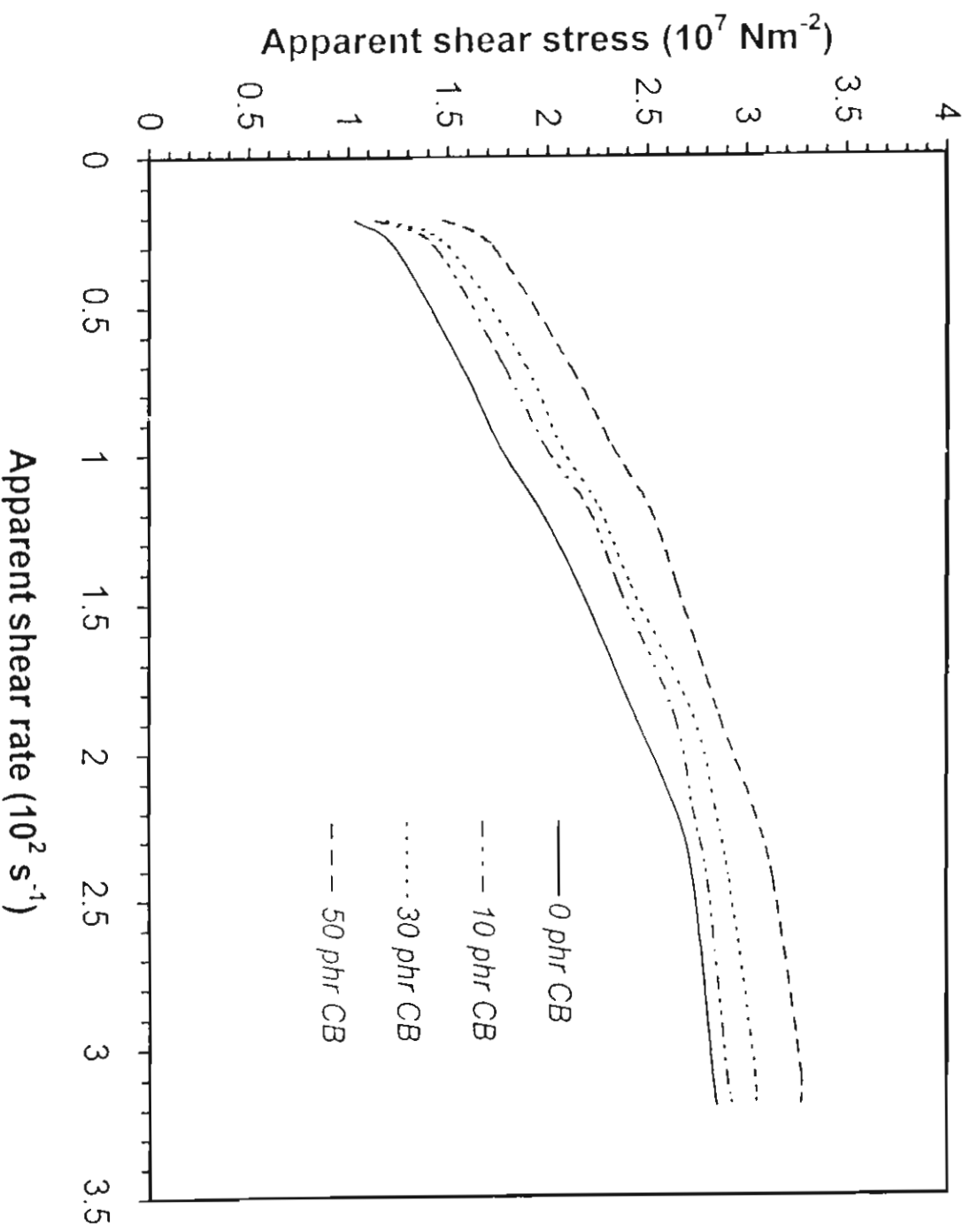


Figure 2: Plots of apparent shear stress against apparent shear rate of unvulcanised rubber compounds at 80 °C using the High Shear Viscometer

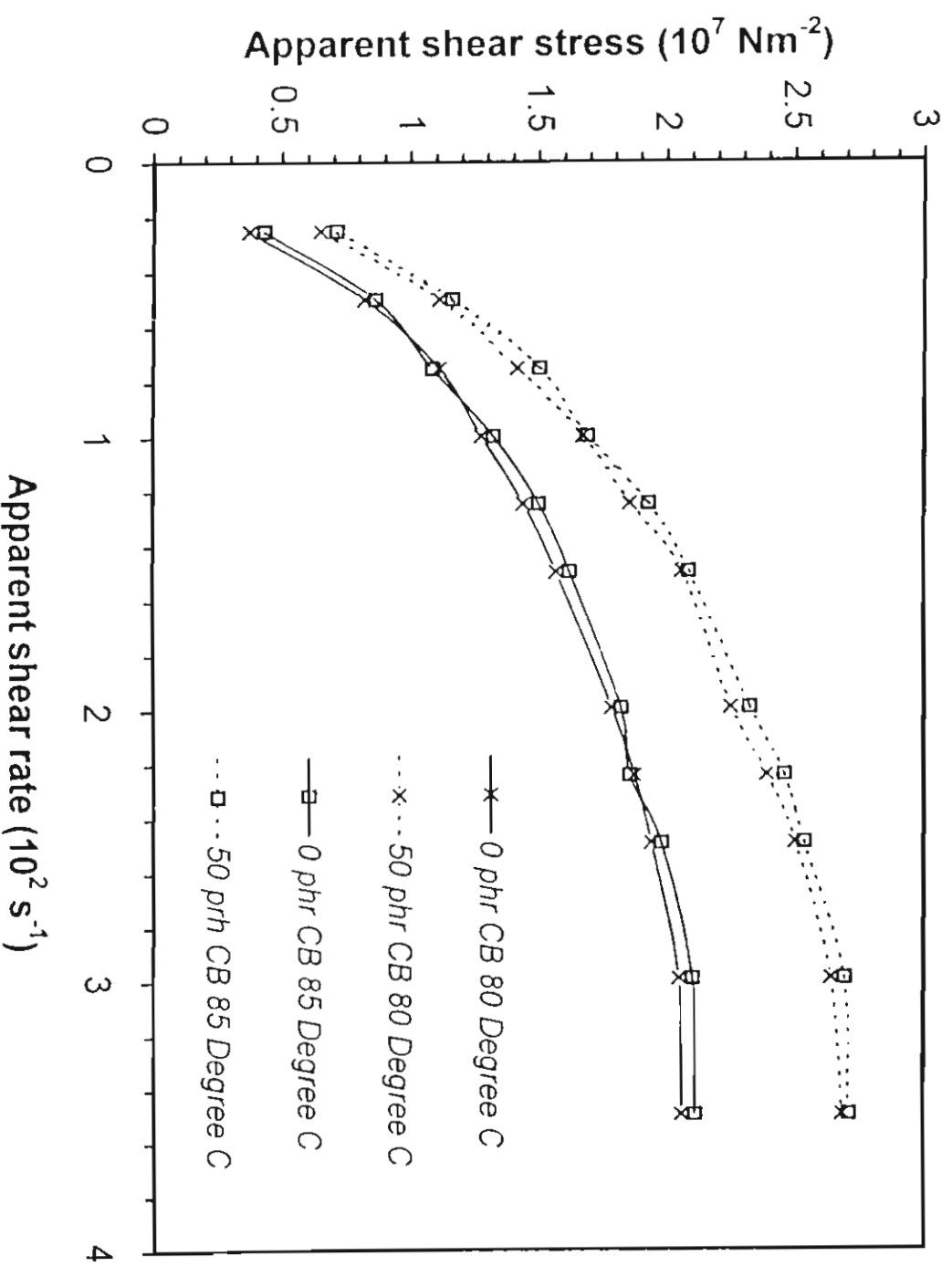


Figure 3: Plots of apparent shear stress against apparent shear rate of unvulcanised rubber compounds at 80 °C and 85 °C using Capillary Rheometer (solid lines) and High Shear Viscometer (dashed lines)

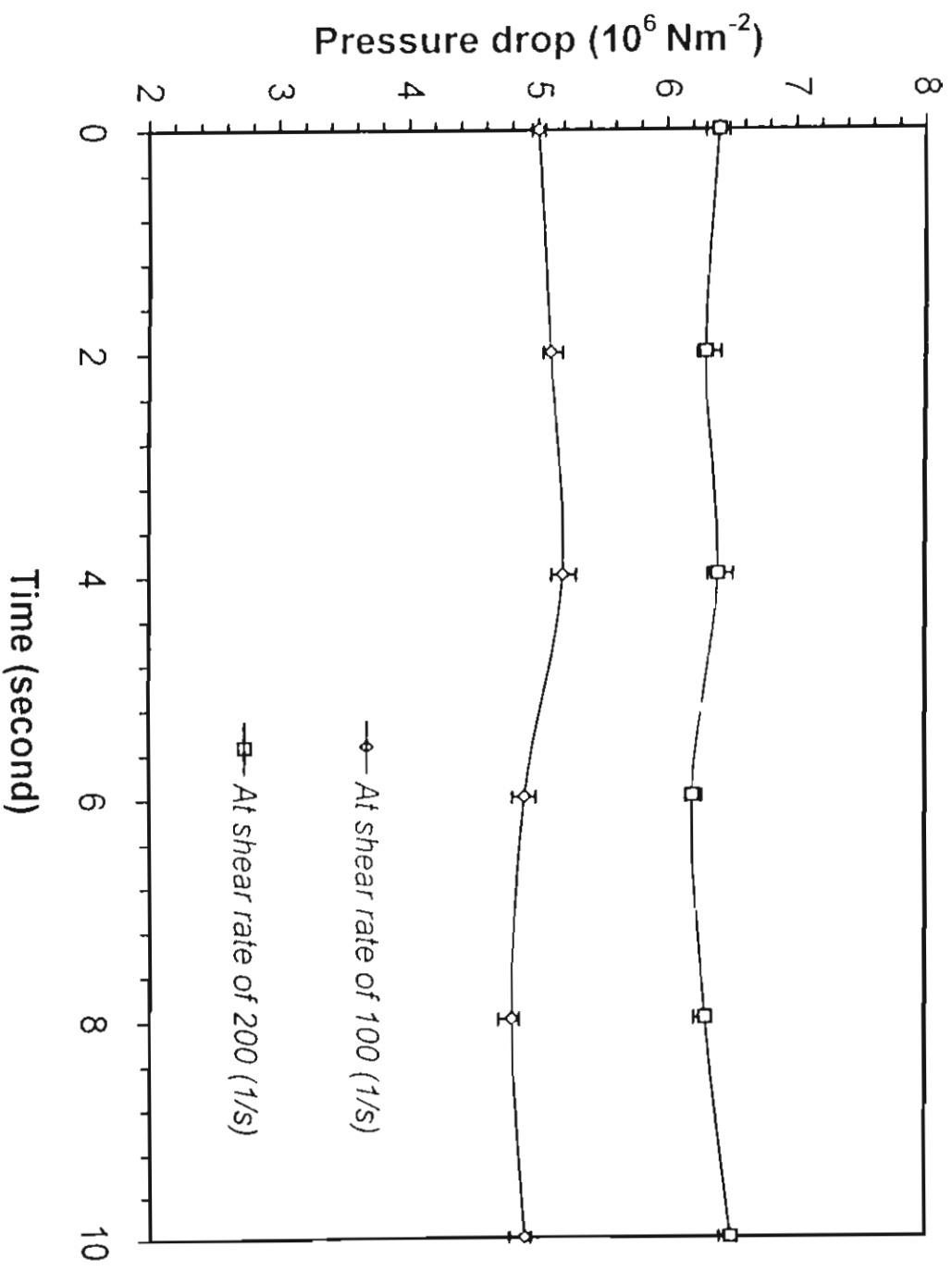


Figure 4: Plots of pressure profiles & time of unfill rubber compounds using the Extrusion Rheometer at 80 °C

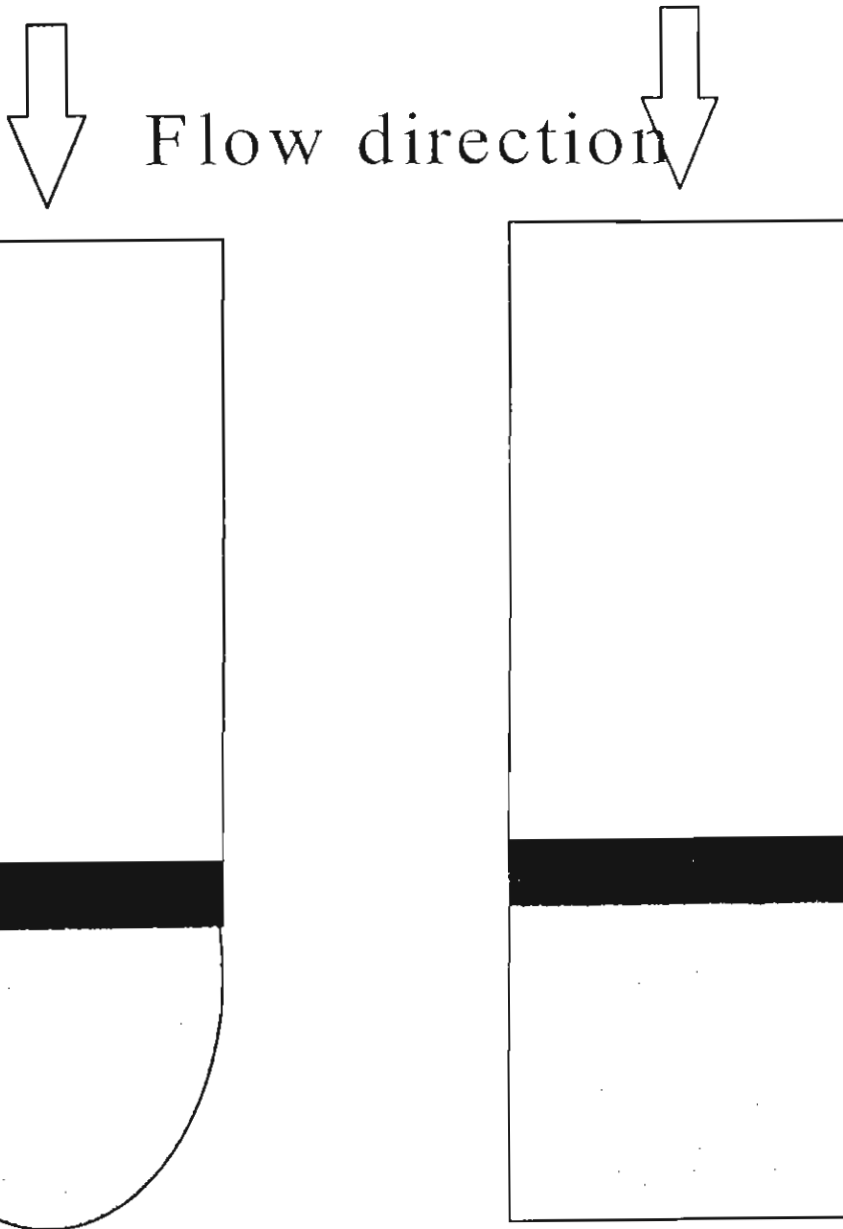


Figure 5: Schematics of piston designs

(Left: Dome-tip piston and Right: Flat-tip piston)

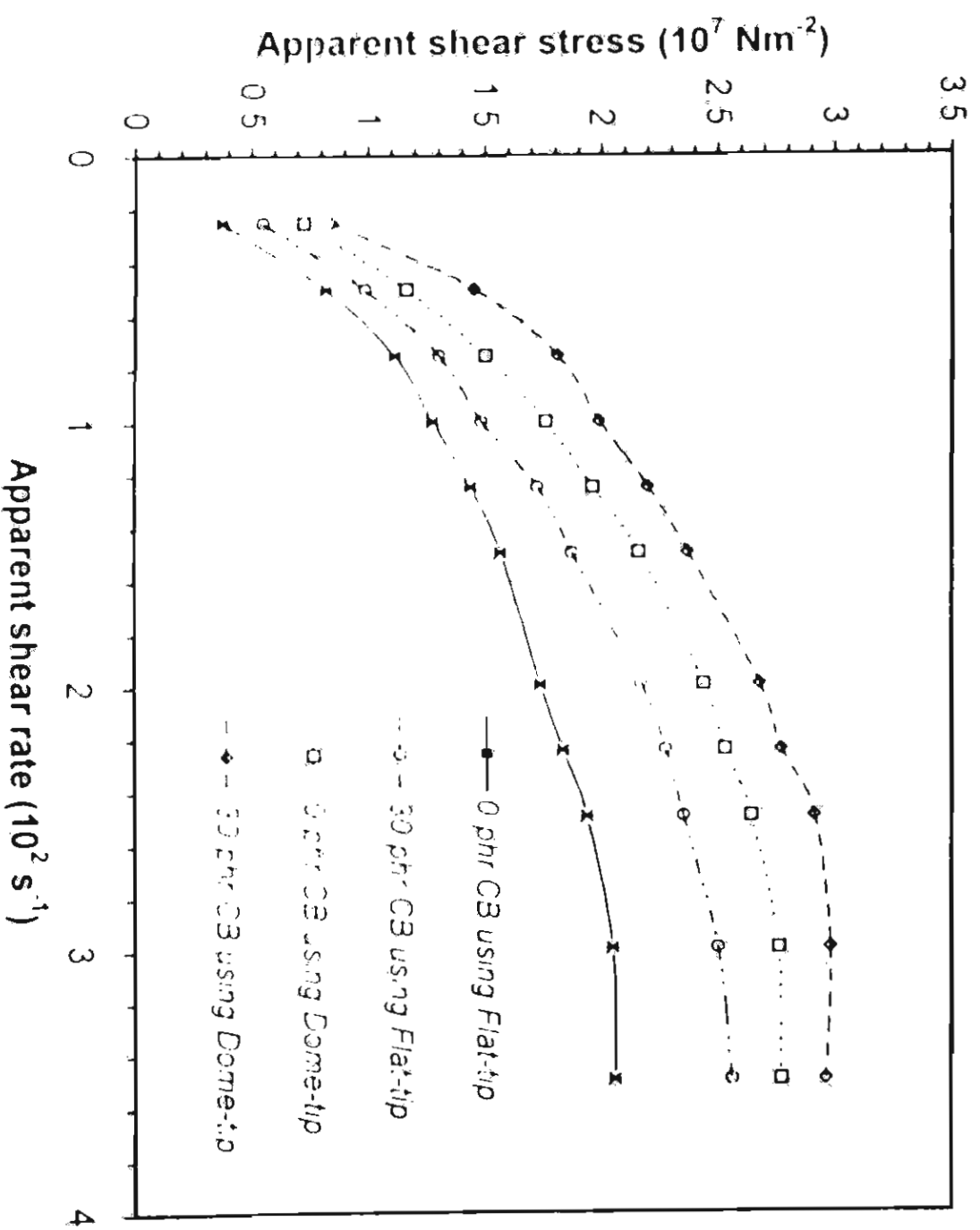


Figure 6: Plots of apparent shear stress against apparent shear rate of unvulcanised rubber compounds at 80 °C using the Capillary Rheometer having different piston-tip designs

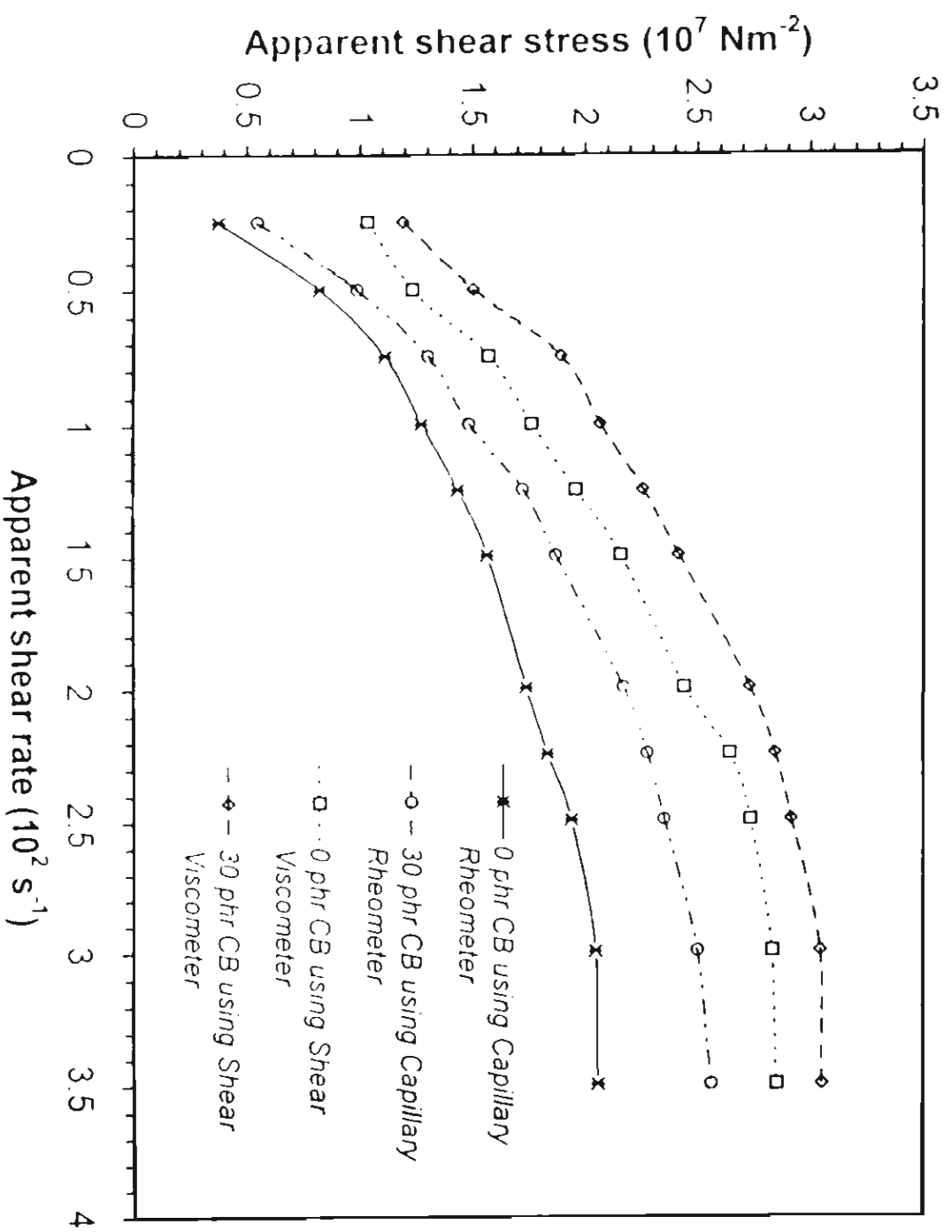


Figure 7: Plots of apparent shear stress against apparent shear rate of unvulcanised rubber compounds at 80°C using the Capillary Rheometer and the High Shear Viscometer

FLOW PROPERTIES OF MOLTEN POLYMERS IN MOBILE BARREL CAPILLARY RHEOMETER

N-T Intawong & N Sombatsompop

Division of Materials Technology, School of Energy and Materials
King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT)
Bangmod, Bangkok 10140, THAILAND

INTRODUCTION

A variety of rheological sensing devices for the measurements of the flow properties of polymer melts have been developed in the patent and research literature, each with its advantages and disadvantages [1]. The flow properties of polymer melts using various designs of off-line rheometers were investigated using the same die [2-3]. It was found that the flow characteristics of a range of polymer melts obtained were different, the results varying with the style of rheometer used. It was suggested that the design of the apparatus and the flow patterns occurring in the barrel of the rheometer had a significant effect on the measured flow properties. This statement was deduced based on the thoughts that different flow patterns occurring would result in different efficiencies in transferring or displacing the material from the barrel to the die of rheometer, and hence affecting the pressure drop being measured [4]. This view was also correlated to the results obtained by Liang [5] who suggested that the relationships between the entrance pressure loss & the rheological characteristics of a polymer melt were very much affected by the die geometry & rheometer used. Sombatsompop & Wood [4] investigated the flow properties, with respect to the designs of the piston tips, including a flat-tip and a dome-tip. The results obtained from the use of two piston-tips within the same rheometer were found to be different. The investigation of flow patterns of polymer melts in the barrels of a capillary rheometer and an injection moulding machine suggested that the nature of the flow developing in the barrels of these two machines was very similar, but not the same, and influenced the rheological properties of the melts being detected [6]. In this work, we propose another design of a capillary rheometer in order to investigate the effect of the mode of operation on the rheological properties of the polymer melt.

EXPERIMENTAL

In this work, a new capillary rheometer was designed and constructed so that it can operate by moving either the piston or the barrel. The rheological properties of a low-density polyethylene (LDPE) melt were investigated using the proposed capillary rheometer. The resulting data was used to calculate apparent wall shear stress, wall shear rate, and apparent viscosity, the details of the calculations being found elsewhere [3]. The test temperature used was 190°C. The dies had L/D of 13, 23, 31, 40 and 49.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 1 shows a comparison of flow curves for the LDPE melt between moving piston and moving barrel systems. Generally, it was found that the LDPE melt exhibited a pseudoplastic non-Newtonian behaviour as one would expect [1]. However, the flow properties seemed to be dependent on the mode of operations (moving piston & moving barrel systems) and the size of dies used. It can be observed that, for a given die size the variations in the results due to the mode of operation were large, the variations being greater than the limit of the experimental errors ($\pm 3.5\%$). This could be a result of the flow occurring in the two systems. Recent evidence [2,4-5] have indicated that the flow properties of polymer melts are dependent on the design of the apparatus used. One way to find out the cause of the discrepancies is to investigate the flow patterns of the polymer melt for these two operation systems. For this purpose, a coloured tracer technique [7] was selected and used to investigate the flow patterns in the barrel. Figure 2 shows a comparison of the flow patterns of natural rubber in the barrel between moving piston and moving barrel systems for a given shear rate (87s^{-1}) and piston

(or barrel) displacement (about half barrel length), using die L/R of 40 at 160°C. At this shear rate, the shear stress for moving barrel system was $8.04 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, whereas that for the other system was $9.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$, the difference being greater than the experimental errors. Although the general flow patterns in these two systems were similar in nature, but the actual flow rates at a given radial position of the two systems were different.

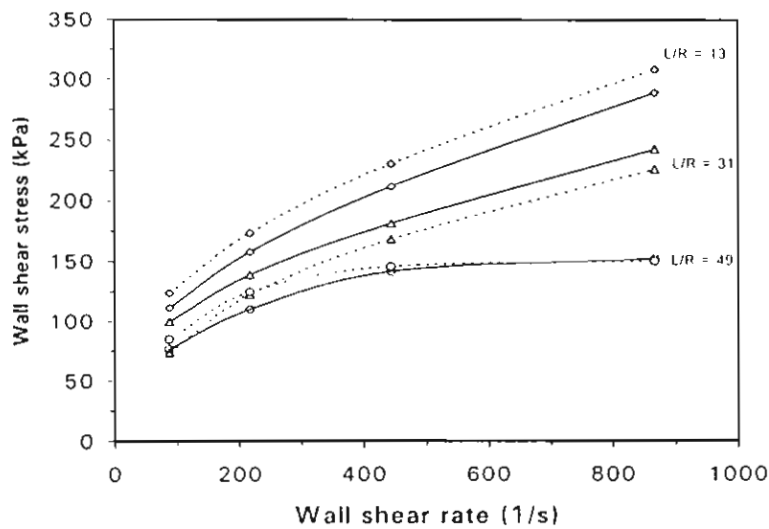


Fig. 1: Flow curves for LDPE melt by moving piston (solid) and moving barrel (dashed) at various L/R.

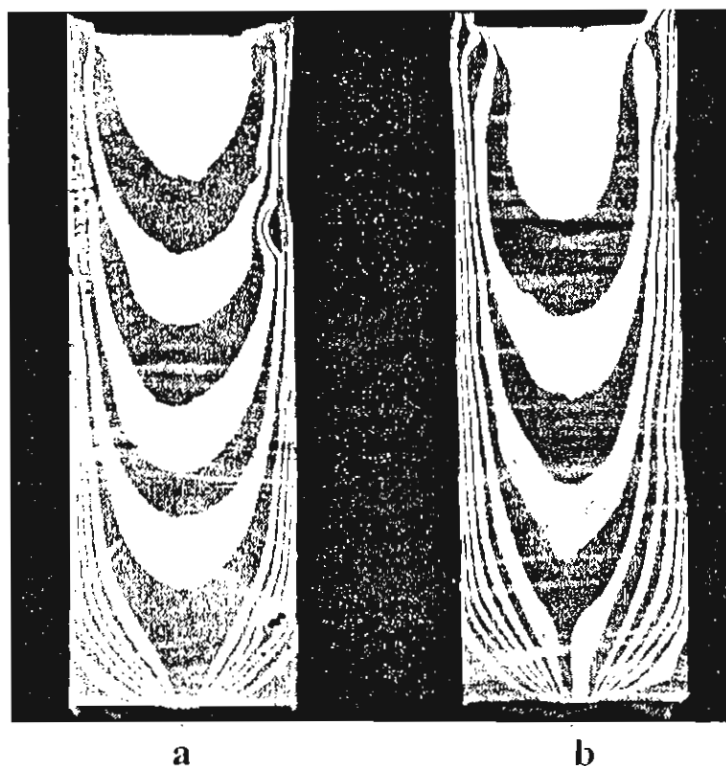


Fig.2 Flow patterns of natural rubber in the barrel of the capillary rheometer by moving piston (a) and moving barrel (b).

Table 1 The N values for moving piston and barrel systems

Shear rate (s^{-1})	N values	
	Mobile piston	Mobile barrel
87	8.9	13.9
216	7.7	11.6
433	15.4	13.5
866	25.9	18.7

The N values for shear stress corrections are listed in Table 1. Ideally, the results of the entrance corrections (N values) obtained from the moving barrel capillary rheometer would be expected to be independent of mode of rheometer operation. However, this was not found to be the case, the N values for a given shear rate from the two operation modes being different. The explanations for this were the same as those for differences in the flow properties as mentioned earlier.

CONCLUSION

The flow properties and entrance corrections of the LDPE melt were dependent on the mode of operation of the capillary rheometer, the discrepancies in the results being associated with the flow occurring in the barrel of the capillary rheometer.

ACKNOWLEDGEMENTS

Sincere thanks are to the Thailand Research Fund (TRF) for financial support.

REFERENCES

1. Dealy JM *SPE ANTEC* (1991) 37: 2296.
2. Wood AK, Read AGG & Lovegrove JGA *Plast Rubb Process Appli* (1989) 12: 15.
3. Sombatsompop N & Wood AK *ASME Fluid Measur Instrum* (1996) 239: 447
4. Sombatsompop N & Wood AK *Sci Asia* (1999) in press.
5. Liang JZ *Plast Rubb Compos Process Appli* (1996) 25: 495.
6. Sombatsompop N, Wood AK & Godfrey I *SPE ANTEC* (1997), 43: 388.
7. Sombatsompop N, Tan MC & Wood AK *Polym Eng Sci* (1997) 37: 270.
8. Sombatsompop N & Wood AK *Polym Eng Sci* (1997) 37: 281.
9. Leblanc JL *Plast Rubb Compos Process Appli* (1994) 21: 81.

เครื่องมือความดันแบบใหม่เชิงประยุกต์ สำหรับพอลิเมอร์หลอมเหลว ในเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์

นเรศ อินดิวงค์

นริศ อินดิวงค์

สังกัดสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตภาคพายัพ จังหวัดเชียงใหม่

ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภาพ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.)
บางมด 10140 กรุงเทพมหานคร

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่โดยให้ชื่อเรียก
ว่า เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง (pin-spring pressure sensor) เพื่อการวัดความดันของ
พอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์ (capillary rheometer) โดยประสิทธิภาพของ
เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่นี้พิจารณาจากการเปรียบเทียบผลการวัดที่ได้จากเครื่องมือวัดความ
ดันมาตรฐานแบบไดอะแฟรม (diaphragm pressure transducer) ในงานวิจัยครั้งนี้พบว่า เครื่อง
มือวัดความดันแบบเข็มสปริงเป็นเครื่องมือวัดที่มีโครงสร้างการออกแบบและการใช้งานค่อนข้างง่าย
สามารถปรับช่วงการวัดได้ ราคาถูก แข็งแรง และมีประสิทธิภาพการตรวจวัดความดันสูง

A Novel Pressure Sensor for Polymer Melts in Capillary Rheometers

N-T. Intawong

N-S. Intawong

Division of Industrial Engineering

Faculty of Engineering, Ratchamunkla Institute of Technology

Payap Campus Chaingmai

N. Sombatsompop

Division of Materials Technology,

School of Energy and Materials

King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT)

Bangmod, 10140, Bangkok

Abstract

This article introduces a novel type of pressure sensing device, so-called "Pin-Spring pressure sensor" for measuring the pressure of a polymer melt in capillary rheometers. The reliability and efficiency of the sensor are followed by considering its resulting measurements which are compared to those obtained by a standard type of pressure sensor (a diaphragm pressure transducer). It is found that the Pin-Spring sensor is simple and easy in use, versatile, low in cost and gives reliable and accurate results.

บทนำ

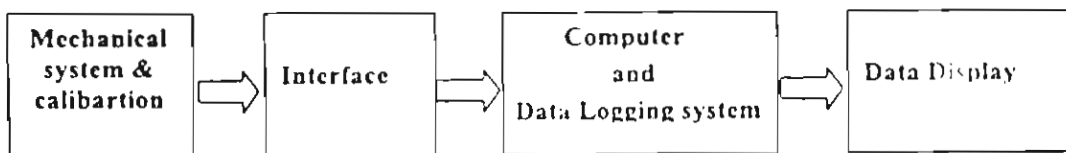
ในปัจจุบันอุตสาหกรรมพลาสติกหรือพอลิเมอร์ได้มีการขยายตัวอย่างรวดเร็วและมีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์มากขึ้น เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคที่มีระดับความพอใจที่ต่างกัน ดังนั้น สิ่งที่จะนำมาซึ่งความสามารถในการแข่งขันกันในเชิงเศรษฐศาสตร์คือ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่มีคุณภาพย่อมมาจากการใช้เทคโนโลยีและกระบวนการผลิตที่เหมาะสมบนพื้นฐานของความเข้าใจในพฤติกรรมของพอลิเมอร์ระหว่างทำการผลิต ในกระบวนการผลิตมีตัวแปรที่เป็น

องค์ประกอบสำคัญ คือ ความดัน อุณหภูมิ และอัตราการไหล ซึ่งตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กันอย่างมากและต้องการการวัดค่าที่ถูกต้อง เพราะทั้งสามองค์ประกอบจะเป็นตัวแปรสำคัญในการควบคุมคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะความดันจะมีผลต่อกระบวนการผลิตโดยตรงเช่น ในการผลิตแบบอัดรีด (extrusion) ความดันมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติทางอีลาสติกของพอลิเมอร์ คุณสมบัติดังกล่าวคือ die swell sharkskin และ melt fracture[1-2] สำหรับกระบวนการผลิตแบบฉีด (injection moulding) ความดันมีผลต่อการหดตัว (shrinkages) การบิดงอ (warpages) ของผลิตภัณฑ์ และความเค้นภายใน (internal stresses)[3] อีกตัวอย่างหนึ่งคือ ในการวัดคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์โดยใช้เครื่องมือวัดที่เรียกว่า กาบลารีโอมิเตอร์ หลักการของเครื่องมือวัดนี้คือ การวัดความดันตก (pressure drop) ที่อัตราการไหลต่างๆ[4] จะเห็นได้ว่าความดันมีความสำคัญอย่างมากในการที่จะได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและคุณสมบัติทางกลที่ดี ดังนั้นการวัดความดันจึงเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญอย่างมากไม่น้อยไปกว่าอุณหภูมิหรืออัตราการไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดความดันในระบบของไหลที่มีความหนืดสูงเช่น ของไหลประเภทพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์วัดความดันที่ต่างไปจากอุปกรณ์วัดความดันในระบบของเหลวอื่นๆ ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้วัดความดันที่ดีจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง คุณสมบัติที่ดีและเป็นที่ต้องการของเครื่องมือวัดความดันคือ มีความเที่ยงตรงในการวัดสูง สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความดันสูง มีความแข็งแรงทนทานต่อสภาวะการใช้งานได้ดี และราคาถูก[4] ซึ่งในความเป็นจริงเครื่องมือวัดที่ใช้โดยทั่วไปไม่อาจเป็นไปตามความต้องการที่กล่าวมานี้อย่างครบถ้วนได้ เครื่องมือวัดความดันที่นิยมใช้แพร่หลายมากที่สุดในการวัดความดันของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์คือ เครื่องมือวัดความดันแบบไดอะแฟรม (diaphragm pressure gauge) เครื่องมือวัดนี้มีความไวต่อการวัดความดันสูงแต่มีราคาแพง มีโครงสร้างซับซ้อนและยุ่งยากในการการซ่อมแซมเมื่อชำรุดเสียหาย ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน เพราะผลจากอุณหภูมิจะทำให้ประสิทธิภาพของการวัดลดลง[5-6]

วัตถุประสงค์งานวิจัยฉบับนี้คือ การออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ (novel pressure sensor) โดยคำนึงถึงความง่ายต่อการสร้างและใช้งาน เครื่องมือวัดความดันที่จัดสร้างขึ้นนี้ให้ค่าการวัดที่แม่นยำและเชื่อถือได้ รวมถึงประสิทธิภาพการใช้งานที่หลากหลาย (versatility) ทนทานต่อสภาวะการใช้งานที่อุณหภูมิสูง และค่าการวัดที่ได้จากเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่นี้ไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิ งานวิจัยฉบับนี้ยังได้เสนอการประมวลผลระบบการเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง (high-speed data logging system) รวมไปถึงการแสดงผลการวัดด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์และวงจรที่ออกแบบและสร้างขึ้นเอง

การออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่

เอกสารฉบับนี้ได้นำเสนอผลการวิจัยซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกเป็นการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดความดันรวมถึงการสอบเทียบ (calibration) ส่วนที่สองเป็นการออกแบบและจัดสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อการเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูงและการประมวลผล และส่วนสุดท้ายเป็นผลการทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ตามลำดับวิธีการออกแบบ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลำดับการออกแบบเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง

ส่วนที่ 1

การออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดความดันรวมทั้งการสอบเทียบ

เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงมีส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมด 10 ส่วนตามลำดับหมายเลขในรูปที่ 2 โดยแต่ละส่วนจะมีความมุ่งหมายของการออกแบบและใช้งานดังต่อไปนี้

ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง

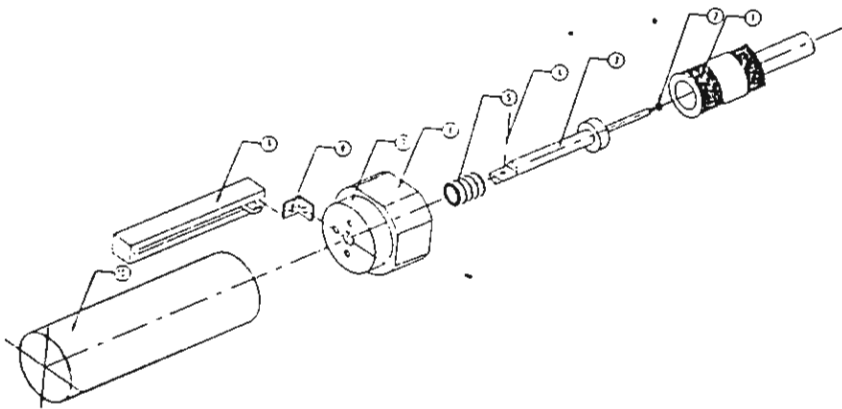
1. ครอบปกป้องเข็มวัดความดันและสปริง มีความมุ่งหมายเพื่อให้เป็นตัวยึดชุดวัดความดันให้ติดกับห้องลอมเหลวทรงกระบอก (barrel) ของเครื่องมือวัดความหนืดคาปิลารีโอมิเตอร์ของพอลิเมอร์ลอมเหลว และทำหน้าที่เป็นตัวประกอบเข็มวัดความดันและสปริง
2. แหวนยาง (O-ring) มีความมุ่งหมายเพื่อป้องกันการรั่วของพอลิเมอร์ลอมเหลวจากห้องลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องมือวัดความหนืดพอลิเมอร์ลอมเหลวมายังส่วนกลางของครอบปกป้องเข็มวัดความดันและสปริง

3. **เข็มวัดความดัน** มีความมุ่งหมายเพื่อเป็นตัวส่งถ่ายแรงดันจากพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องวัดความหนืด ไปยังตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน ซึ่งผลของการเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดันจะทำให้เกิดการเลื่อนของตัวต้านทาน และทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปตามแรงดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เกิดขึ้น
4. **สลัก** มีความมุ่งหมายเพื่อเป็นตัวยึดระหว่างส่วนท้ายก้านของเข็มวัดความดันกับตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน
5. **สปริง** มีความมุ่งหมายเพื่อทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนในการต้านทานการเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดันภายใต้ความดันที่เกิดในบริเวณปลายของเข็มวัดความดันและเพิ่มความสามารถรับแรงจากพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มาดันบริเวณส่วนปลายของเข็มวัดได้มากขึ้น เนื่องจากความเป็นอิลาสติกของสปริง ซึ่งสปริงดังกล่าวนี้ยังทำหน้าที่ในการเลื่อนเข็มวัดความดันเคลื่อนที่กลับเมื่อความดันลดลง
6. **ฝาปิด** มีความมุ่งหมายเพื่อทำหน้าที่เป็นฝาปิดและยึดกระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง เพื่อให้ทั้งเข็มวัดความดันและสปริงอยู่ภายในกระบอก นอกจากนี้ ยังทำหน้าที่เป็นฐานรองแผ่นฉนวนความร้อน
7. **แผ่นฉนวนความร้อน** ฉนวนความร้อนนี้ทำจากเบอร์กาไรท์โดยมีความมุ่งหมายเพื่อทำหน้าที่เป็นป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องวัดความหนืดพอลิเมอร์หลอมเหลวที่แพร่มาตามชิ้นส่วนต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ ยังทำหน้าที่เป็นฐานยึดตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนและฝาครอบตัวต้านทาน
8. **ฉากยึดตัวต้านทาน** มีความมุ่งหมายเพื่อให้เป็นตัวยึดตัวต้านทานกับแผ่นฉนวนความร้อน
9. **ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน** มีความมุ่งหมายเพื่อใช้เปลี่ยนค่าความต้านทานให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดัน เพื่อให้ได้ผลของความแตกต่างของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะนำไปสอบเทียบเป็นค่าความดันจริงต่อไป
10. **ฝาครอบตัวต้านทาน** มีความมุ่งหมายเพื่อเป็นตัวครอบชุดวัดความต้านทาน และป้องกันการถูกกระแทกและฝุ่นละอองภายนอก

รายละเอียดการสร้างเครื่องมือวัดความดัน

จากรูปที่ 2 เป็นการแสดงลักษณะทั่วไปภายนอกของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง ส่วนปลายด้านหนึ่งเป็นกระบอกประคองที่เข็มวัดความดัน ซึ่งถูกสวมเข้าไปภายในเครื่องวัดความหนืดคัลลารีโอมิเตอร์ ที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนกลางของกระบอกประคองเข็มจะทำเป็นเกลียวนอกขนาด

M25×15 เพื่อที่ปลายเกลียวด้านหน้าสามารถประกอบเข้ากับห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ ส่วนปลายเกลียวอีกข้างจะประกอบเข้ากับฝาปิดซึ่งเป็นชิ้นส่วนถัดมา ในส่วนท้ายของฝาปิดจะใช้เป็นฐานยึดแผ่นฉนวนความร้อนที่ทำจากเบอร์กาไรท์ ซึ่งฉนวนความร้อนดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ กระบอกประกอบเข็มวัดความดัน สปริงที่สวมอยู่ภายในกระบอกประกอบเข็มและฝาปิด ไปสู่ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนซึ่งต่อเป็นชิ้นส่วนถัดมา ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนถูกครอบด้วยฝาครอบตัวต้านทาน โดยฝาครอบตัวต้านทานถูกเจาะรูบริเวณปลายสำหรับต่อสายสัญญาณจากตัวต้านทานไปยังชุดวงจรเปลี่ยนสัญญาณจาก อนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล และการไดอินเตอร์เฟสซึ่งมีระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่ของตัวต้านทาน ดังจะได้อธิบายในส่วนของการออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป



รูปที่ 2 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง

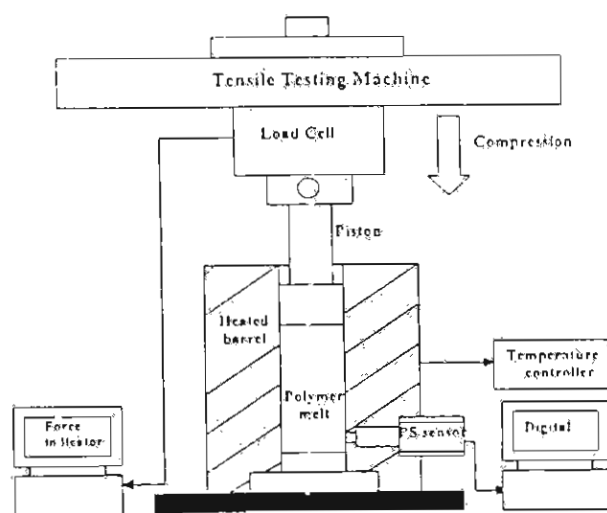
หลักการทำงาน

เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงที่ใช้กับพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีความหนืดสูงนี้ อาศัยหลักการทำงานของเครื่องตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ตัวความต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน (sliding contact resistor) ซึ่งอาศัยระบบทางกลที่ประกอบด้วย เข็มวัดความดัน แหวนยาง และสปริง ในการประดิษฐ์ครั้งนี้จะเน้นถึงรายละเอียดของระบบทางกลซึ่งมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ เมื่อมีความดันในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ พอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ในห้องหลอมเหลวทำหน้าที่ส่งผ่านความดันไปยังเข็มวัดความดัน โดยมีแหวนยางสวมอยู่ส่วนปลายของเข็มวัดซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหลของพอลิเมอร์ ความดันดังกล่าวทำให้เข็มวัดความดันเคลื่อนที่ ซึ่งการเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดันนี้จะถูกต้านทานโดยสปริงที่สวมอยู่รอบก้านของเข็มวัดความดัน ส่วนท้ายของเข็มวัดความดันจะต่อเข้ากับตัวความต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนโดยใช้สลักเป็นตัวยึด การเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดันจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในตัวความต้านทาน ระบบทางกล

กับตัวความต้านทานจะถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นฉนวนความร้อนที่ทำจากเบอร์กาไรท์ เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากห้องหลอมเหลวแพร่มายังตัวความต้านทาน โดยจะมีการเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง และทำการประมวลผลและแสดงผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะแสดงผลของการวัดสามารถถูกแสดงในรูปของแรงดันไฟฟ้า และค่าความดันจริง

หลักการสอบเทียบค่าความดันจริง

การออกแบบการสอบเทียบค่าความดันจะใช้หลักการพื้นฐานของการสอบเทียบแบบ dead weight tester[5-6] โดยค่าของแรงที่ใช้ได้จาก load cell ในเครื่องทดสอบแรงดึงและพื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ ($5.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) ซึ่งนำมาคำนวณจะได้ค่าความดันจริงและเปรียบเทียบกับค่าที่กับตัวเลขดิจิทัลที่ได้จากเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง ดังรูปที่ 3 อันมีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 3 อุปกรณ์สำหรับการสอบเทียบ (calibration) ของเครื่องมือวัดความดัน

- อุปกรณ์ประกอบสำหรับการสอบเทียบค่าความดันถูกประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง ลูกสูบจะประกอบเข้ากับ load cell ซึ่งจะทำให้ทราบค่าแรงที่กระทำต่อพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในห้องหลอมเหลวทรงกระบอก
- เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงจะทำหน้าที่ตรวจวัดค่าความดันที่เกิดขึ้นในระบบในรูปของแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำการประมวลผลออกมาเป็นตัวเลขดิจิทัล

- ชุดประมาตผลการสอบเทียบและการแสดงผลความดัน เป็นตัวแสดงค่าการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าจากชุดความดันทานออกมาเป็นตัวเลขดิจิทัล (0-256)

การสอบเทียบค่าความดันของเครื่องมือวัดความดันแบบอิเล็กทรอนิกส์ อาศัยหลักการของการเกิดความดันที่แปรผันโดยตรงตามแรงที่กระทำ โดยแรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดที่คงที่ (พื้นที่หน้าตัดของ piston) ดังสมการที่ 1[6]

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

เมื่อ

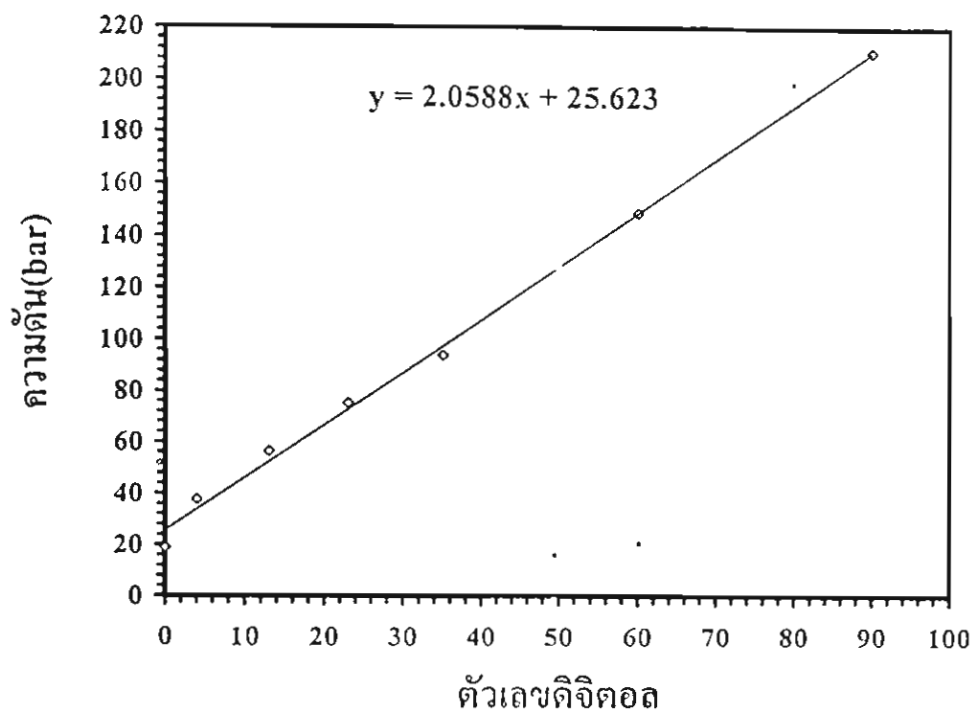
P = ความดัน (N/m²)

F = แรงที่มากกระทำ (N)

A = พื้นที่หน้าตัด (m²)

วิธีการสอบเทียบค่าความดันจริง

1. ติดตั้งอุปกรณ์สอบเทียบสำหรับการสอบเทียบค่าความดันเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง
2. ให้ความร้อนกับอุปกรณ์สอบเทียบ จนกระทั่งอุณหภูมิของอุปกรณ์คงที่
3. บรรจุของฟลูอิเดอร์ (ในที่นี้ใช้ฟลูออรีนชนิดความหนาแน่นต่ำ) ลงในห้องหลอมเหลวทรงกระบอก และทิ้งไว้ประมาณ 10 นาที เพื่อให้ฟลูออรีนหลอมจนหมด
4. จากนั้นเลื่อนลูกสูบเพื่ออัดฟลูออรีนในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกจนได้แรงอัดคงที่ แล้วจึงหยุด แรงอัดที่ได้จะถูกแปลงเป็นค่าความดันโดยใช้สมการที่ 1 และค่าตัวเลขดิจิทัล ณ ความดันดังกล่าวนี้ ดังนั้น ค่าความดัน (P) จากการอัดฟลูออรีนหลอมเหลว 3 ครั้งจะได้ค่าตัวเลขดิจิทัลหนึ่งค่า
5. ทำซ้ำข้อ 3 และ 4 โดยใช้แรงกดต่าง ๆ และบันทึกตัวเลขดิจิทัล ณ แรงกดต่างๆ
6. นำข้อมูลที่ได้นำมาสร้างกราฟสอบเทียบค่าความดันโดยให้แกน y มีค่าเป็นความดัน P และแกน x เป็นค่าตัวเลขดิจิทัล ซึ่งจะได้กราฟสอบเทียบตามรูปที่ 4
7. จากกราฟสอบเทียบ จะได้สมการเส้นตรงที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันและตัวเลขดิจิทัล เพื่อนำไปเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อแปลงค่าความดันจริง ตามรายละเอียดการออกแบบทางอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 4 กราฟการสอบเทียบของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง

ส่วนที่ 2

การออกแบบและจัดสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ลำดับขั้นตอนการเก็บประมวลข้อมูลและแสดงข้อมูลของการวัดความดัน โดยสามารถอธิบายการออกแบบในส่วนของโปรแกรมได้ดังนี้คือ ในส่วนของการรับสัญญาณเข้าใช้ความต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนที่มีค่าความต้านทาน 10 กิโลโอห์ม ชนิดบี ทำหน้าที่แบ่งแรงดันเพื่อให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอนาล็อกโดยใช้ไอซีเบอร์ ADC0804 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเข้าอนาล็อกเป็นสัญญาณออกดิจิทัล 8 บิตซึ่งคอมพิวเตอร์จะอ่านข้อมูลที่ได้เข้าทางบัสข้อมูล (data bus) โดยผ่านชุดอินเตอร์เฟสและวงจรเปลี่ยนสัญญาณภายในวงจรใช้ไอซีเบอร์ 8255 ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมการติดต่อระหว่างชุดวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลกับบัสข้อมูลของคอมพิวเตอร์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้เข้าไปประมวลผล ในส่วนของชุดเก็บข้อมูลประมวลผลและชุดแสดงผลโดยหน่วยประมวลผลกลางของคอมพิวเตอร์หรือที่เรียกว่า หน่วยควบคุมการประมวลผลกลาง (CPU) ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลที่รับเข้ามาตามชุดคำสั่งของโปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยใช้ภาษาซี เพื่อคำนวณและสอบเทียบข้อมูลให้ได้ผล

เป็นค่าความดันจริงซึ่งให้หน่วยวัดเป็นบาร์ และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาจริง แล้วเก็บข้อมูลโดยใช้ชุดเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากับเวลาแสดงอยู่ในรูปแบบของเทกสไฟล์ (text file) และแสดงค่าความดันเป็นตัวเลขบนจอภาพของคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของกราฟฟิกส์ (graphics)

ในส่วนของการสอบเทียบค่าของแรงดันไฟฟ้ากับค่าความดันจริงมีรายละเอียดดังต่อไปนี้คือ ค่าความต้านทานสูงสุดเท่ากับ 10 กิโลโอห์ม ย่านแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงทางด้านสัญญาณอนาลอก คือ 0 ถึง 5 โวลต์ ซึ่งตรงกับสัญญาณดิจิตอล ตั้งแต่ 0 ถึง 256 ดังนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณดิจิตอล 1 ค่า เช่น จาก 0 ถึง 1 หรือ จาก 1 ไป 2 เป็นต้น คือ

$$\begin{aligned} &= \frac{5,000mV}{256} \\ &= 19.53125mV \end{aligned} \quad (2)$$

สำหรับ ค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณดิจิตอล 1 ค่า คือ

$$\begin{aligned} &= \frac{10,000\Omega}{256} \\ &= 39.0625\Omega \end{aligned} \quad (3)$$

จากการสอบเทียบทางปฏิบัติ เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงที่ประดิษฐ์นี้ให้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันจริงกับการเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอล ดังนี้

$$\text{ความดันจริง} = (2.0588 \times \text{สัญญาณดิจิตอล}) + 25.623 \quad (4)$$

$$\text{สัญญาณดิจิตอล} = (\text{ความดันจริง} - 25.623) / 2.0588 \quad (5)$$

ในกรณีของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับการเปลี่ยนสัญญาณดิจิตอลให้สมการความสัมพันธ์ ดังนี้

จากสมการที่ (1)

$$\text{แรงดันไฟฟ้า} = \text{สัญญาณดิจิตอล} \times 0.01953125 \quad (6)$$

หรือ

$$\text{สัญญาณดิจิตอล} = \text{แรงดันไฟฟ้า} / 0.01953125 \quad (7)$$

จากสมการที่ (5) และ (7) สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันจริงกับแรงดันไฟฟ้า ได้ดังนี้

$$\text{ความดันจริง} = 2.0588 \times (\text{แรงดันไฟฟ้า} / 0.01953125) + 25.623 \quad (8)$$

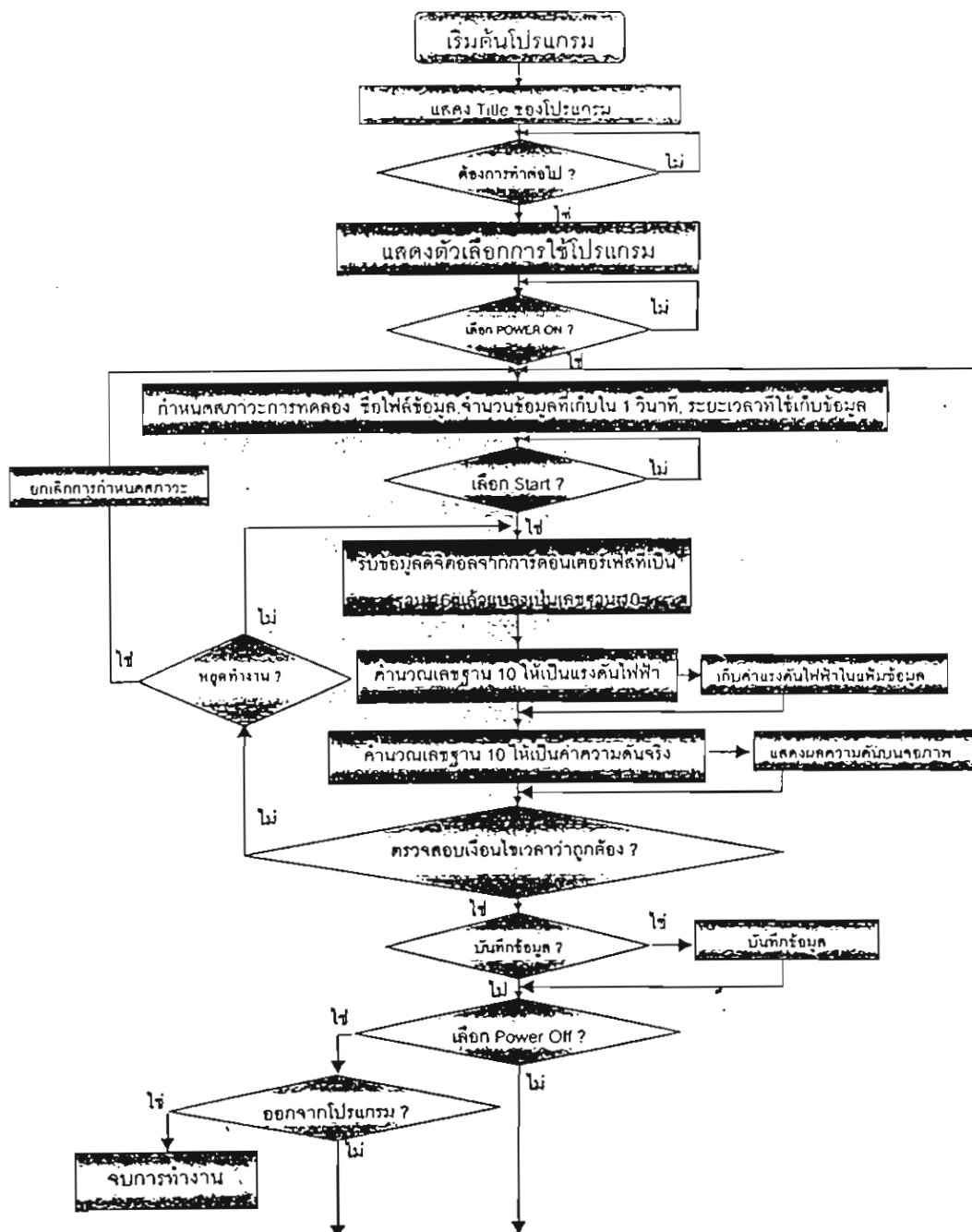
$$\text{ความดันจริง} = (105.43616 \times \text{แรงดันไฟฟ้า}) + 25.623 \quad (9)$$

สมการที่ (9) เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันจริงกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นความสัมพันธ์แบบเส้นตรง

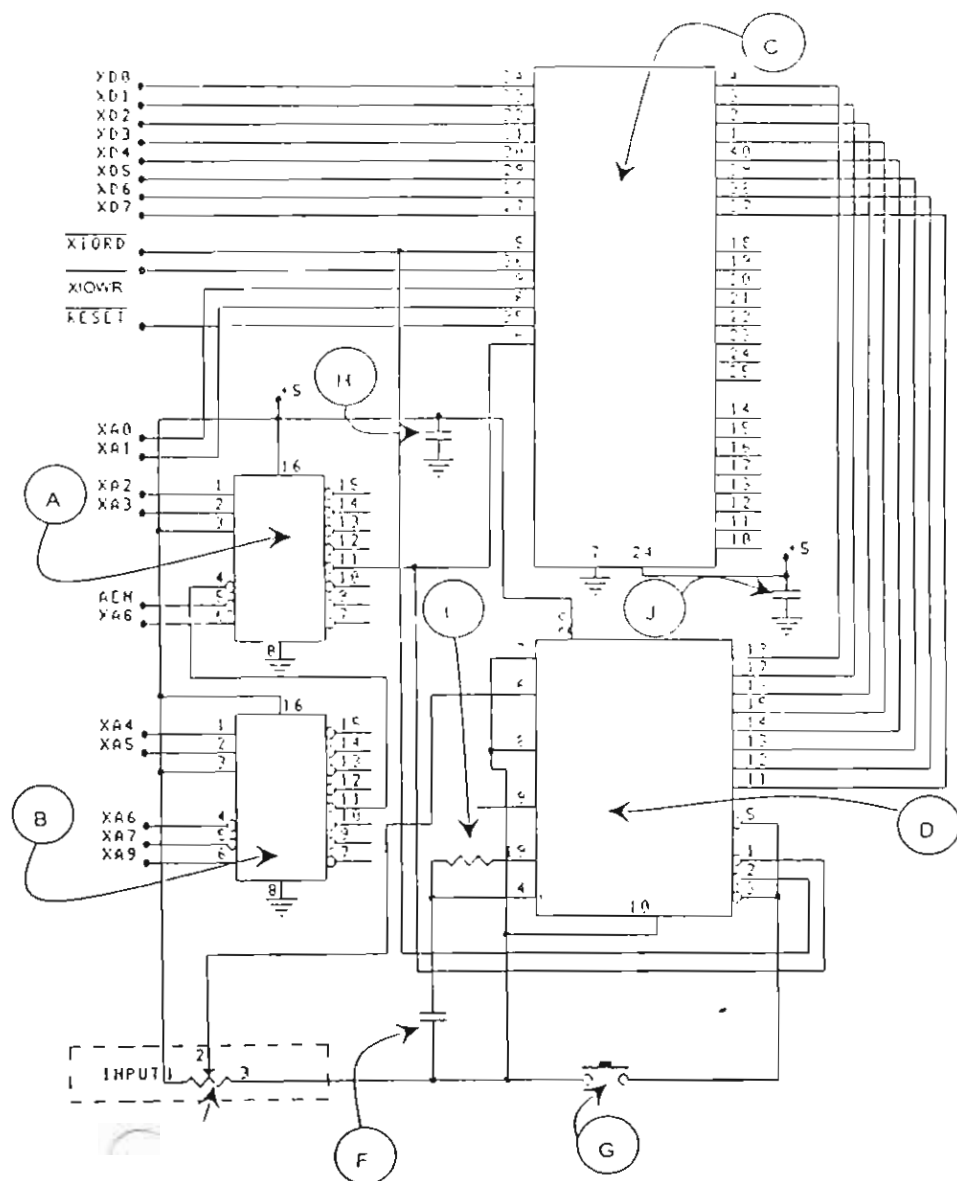
จากแผนภูมิในส่วนแลงในรูปที่ 5 เป็นลำดับขั้นตอนของการคำนวณ เก็บและประมวลข้อมูล เริ่มจากการกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องอันได้แก่ จำนวนข้อมูลที่ต้องการเก็บใน 1 วินาที เวลาที่ใช้เก็บข้อมูล ชื่อของข้อมูลที่ต้องการนำข้อมูลไปจัดเก็บ เมื่อเริ่มต้นโปรแกรมจะเริ่มรับสัญญาณดิจิตอล (เป็นเลขฐาน 16) ที่ได้จากการแปลงสัญญาณอนาล็อกผ่านชุดอินเตอร์เฟส และเริ่มต้นตรวจสอบเงื่อนไขของเวลาในการเก็บข้อมูลไปพร้อมๆ กัน สัญญาณดิจิตอล (เลขฐาน 16) จะถูกคำนวณเปลี่ยนค่าตัวเลขให้เป็นเลขฐาน 10 เพื่อทำการคำนวณตามลำดับ ดังนี้

1. นำค่าเลขฐาน 10 ที่ได้ไปคำนวณเปลี่ยนให้เป็นค่าของแรงดันไฟฟ้า ทำการจัดเก็บค่าของแรงดันไฟฟ้าของข้อมูลที่กำหนดไว้ข้างต้น ตามจำนวนข้อมูลใน 1 วินาที
2. นำค่าของแรงดันไฟฟ้าใน ข้อ (1) ไปคำนวณเปลี่ยนเป็นค่าความดันจริงโดยใช้สมการ (8) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความดันจริง
3. นำค่าความดันจริงที่ได้จากการคำนวณไปแสดงผลเป็นตัวเลขบนจอภาพ
4. เมื่อเสร็จสิ้นจากการคำนวณ โปรแกรมจะตรวจสอบเงื่อนไขของเวลา ถ้าได้ตรงตามเงื่อนไข โปรแกรมจะหยุดรับข้อมูล แต่ถ้ายังไม่เป็นตามเงื่อนไขโปรแกรมก็จะวนกลับไปรับข้อมูลใหม่จนกว่าเงื่อนไขจะเป็นจริงจึงหยุด แล้วเริ่มต้นการกำหนดค่าใหม่ต่อไป

ตามรูปที่ 6 คือ วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลและการ์ดอินเตอร์เฟส ทำหน้าที่หลักคือรับสัญญาณดิจิตอลที่ถูกแปลงจากอนาล็อกแล้วเข้าไปให้ CPU ประมวลผลโดยวงจรได้รวมชุดแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอลกับวงจรอินเตอร์เฟสเข้าด้วยกันในลักษณะของการทำให้สามารถเชื่อมต่อกับสล็อต I/O ของคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้การทำงานของวงจรอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 5 ลำดับและขั้นตอนการประมวลผลการทดสอบการวัดแรงดันโดยเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง



รูปที่ 6 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลและการอินเตอร์เฟส

ลักษณะทั่วไปของการ์ด

- ตำแหน่งการ์ด (address card) 300H ถึง 303H
- ตำแหน่ง port รับและส่งข้อมูล 300H port A ของ IC 8255
- ขนาดและรูปแบบของการรับข้อมูลแบบขนานขนาด 8 บิต
- สายสัญญาณที่ใช้
- XD0 ถึง XD7 เป็นชุดสายข้อมูลทำหน้าที่เป็นทางผ่านข้อมูลดิจิตอลที่ถูกแปลงจากอนาล็อกแล้วเข้าไปให้ CPU ประมวลผล
- XIORD เป็นสายสัญญาณที่ CPU ใช้กำหนดการอ่านข้อมูล
- XIOWR เป็นสายสัญญาณที่ CPU ใช้กำหนดการเขียนข้อมูล
- RESET เป็นสายสัญญาณการรีเซตระบบ
- XA0 ถึง XA9 เป็นชุดสายสัญญาณที่ทำหน้าที่อ้างตำแหน่งของการ์ด
- AEN (Address Enable) เป็นสายสัญญาณควบคุมการอ้างตำแหน่ง

การทำงานของวงจร

IC (A) และ IC (B) เป็น IC เบอร์ 74LS138 ทำหน้าที่ถอดรหัสตำแหน่งของการ์ด เพื่อให้ได้สัญญาณเอกทึฟ 0 (LOW) ไปควบคุมการทำงานของ IC (C) ให้ทำงานเฉพาะตำแหน่ง 300H-303H โดยมีสายสัญญาณเข้าที่ IC (B) XA4 XA5 XA6 XA7 และ XA9 และที่ IC (A) XA2 XA3 XA8 และ AEN จากตำแหน่งที่ 300H-303H ในเลขฐานสองคือ 1100000000-1100000011 ดังนั้นเพื่อให้ได้สัญญาณออกที่ขา 11 ของ IC (A) เป็น 0 (LOW) และ IC (C) ทำงานที่ตำแหน่ง 300H-303H XA8 และ XA9 จะต้องเป็น 1 (HIGH) และ XA2 XA3 XA4 XA5 XA6 XA7 AEN ต้องเป็น 0 (LOW) ตามคุณสมบัติของ IC 74LS138

IC (C) คือ IC เบอร์ 8255 ทำหน้าที่รับสัญญาณดิจิตอลที่ถูกเปลี่ยนจากอนาล็อกเข้าไปทาง port A คือ PA0-PA7 ผ่าน XD0-XD7 ให้ CPU ประมวลผลจะทำงานเมื่อ ขา 6 เอกทึฟ 0 (LOW) ที่ตำแหน่ง 300H-303H และ IORD เอกทึฟ 0 (LOW) IOWR เอกทึฟ 0 (LOW)

IC (D) คือ IC เบอร์ ADC0804 ต่อกับตัวต้านทาน (I) ค่า 10 กิโลโอห์ม คาปาซิเตอร์ (F) ค่า 150 pf สวิตช์ (G) และเป็นชุดวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล โดยสัญญาณเข้าที่เป็นอนาล็อกได้จากผลของการเปลี่ยนแปลงแรงระดับดันไฟฟ้าจากตัวต้านปรับค่าได้แบบเลื่อน (E) ค่า 10 กิโลโอห์มที่ต่อในวงจรเข้าขา 6 ของ IC (D) ส่วนของสัญญาณออกจะเป็นสัญญาณดิจิตอลออกที่ขา 11 - 18 มีขนาด 8 บิตและเชื่อมต่อกับ IC (C) ที่ Port PA0-PA7 ในการเริ่มต้นการรับข้อมูลกดสวิตช์

(G) คาปาซิเตอร์ (H) และ (J) ค่า $0.1 \mu\text{F}$ ต่อระหว่างแรงดัน 5V กับกราวด์เพื่อทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเช่นขณะเปิดเครื่อง

ส่วนที่ 3

การตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องมือวัดแบบเข็มสปริง

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ของไหลชนิดความหนืดสูงคือ พอลิเมอร์เอทิลีนหลอมเหลว ประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงจะถูกตรวจสอบโดยทำการวัดค่าความดันในเครื่องมือทดสอบทางพอลิเมอร์ ในที่นี้ใช้เครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์ วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดความดันแบบเข็มสปริงที่จัดสร้างขึ้น ได้ทำการตรวจวัดความดันภายในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์แทนการใช้เครื่องมือวัดความดันแบบสากลทั่วไปแบบชนิดไดอะแฟรม ซึ่งจะประกอบเข้ากับตอนท้ายของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์ที่ถูกออกแบบและจัดสร้างขึ้นเองในงานวิจัยครั้งนี้ด้วยโดยห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์จะถูกออกแบบให้สามารถประกอบเข้ากับเครื่องทดสอบแรงดึง ทั้งนี้ เพื่ออาศัยระบบการขับเคลื่อนของเครื่องทดสอบแรงดึงเป็นตัวขับเคลื่อนแท่งลูกสูบ เพื่ออัดพอลิเมอร์หลอมเหลวในห้องหลอมเหลวทรงกระบอก หลักการทดสอบหาคุณสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ การหาค่าความดันตก ณ อัตราเฉือน (shear rate, γ) ซึ่งค่าความดันตกสามารถนำมาคำนวณหาค่าความเค้นเฉือน (shear stress, τ) ได้ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนจะแสดงถึงค่าความหนืด (viscosity, η) ของพอลิเมอร์ โดยปกติ ในการทดสอบคุณสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์จะใช้สมการ 10 ถึง 12[4]

$$\tau = \frac{RP}{2L} \quad (10)$$

$$\gamma = \left[\frac{(3n+1)}{4n} \right] \left[\frac{4Q}{\pi R^3} \right] \quad (11)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (12)$$

เมื่อ R = รัศมีของ Die (m)
 P = ความดัน (N/m^2)
 L = ความยาว Die (m)
 Q = อัตราการไหล (m^3/s)

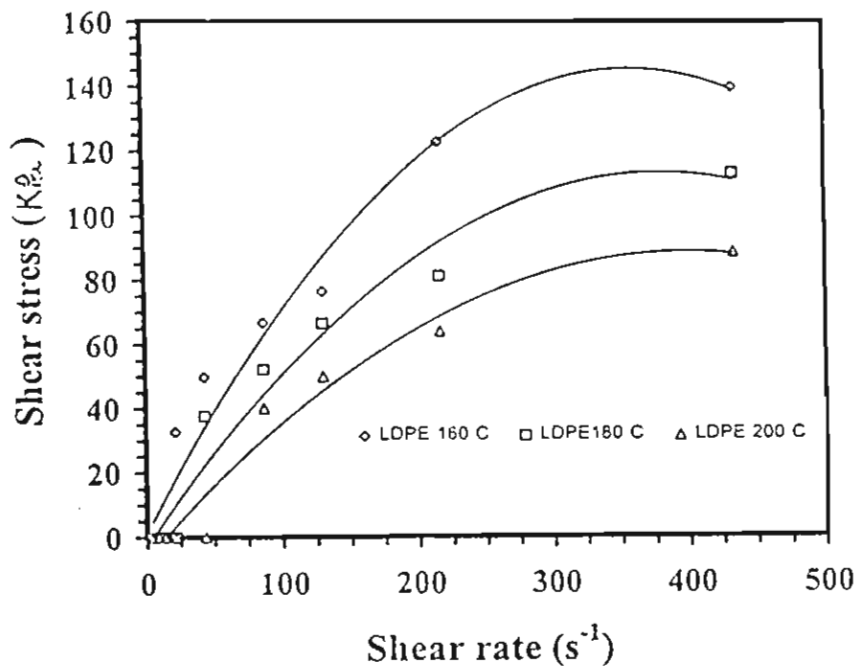
ในงานวิจัยฉบับนี้ พอลิเมอร์หลอมเหลวที่ใช้คือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (low-density polyethylene, LDPE) และอุณหภูมิที่ใช้ตั้งแต่ 160°C ถึง 200°C เครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์ที่ใช้กับเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่นี้ ถูกออกแบบและจัดสร้างขึ้นซึ่งเป็นอุปกรณ์การทดสอบชุดเดียวกันกับอุปกรณ์ที่ใช้ในสอบเทียบของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง ดังรูปที่ 3 เครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์ที่จัดสร้างขึ้นมานี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกที่ใช้คือ 26 มม. และ 1500 มม. ตามลำดับ และใช้ลูกสูบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวเท่ากับ 25 มม. และ 1800 มม. ตามลำดับ ขนาดของแบบพิมพ์ที่ใช้แสดงอยู่ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D) มีค่าเท่ากับ 20

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ นอกจากจะทำการตรวจสอบคุณสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวแล้ว ยังทำการศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ที่ถูกออกแบบและจัดสร้างขึ้น แนวทางหนึ่งของการตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่นี้คือ การเปรียบเทียบผลการวัดความดัน (ในรูปของความเค้นเฉือน) โดยใช้เครื่องมือวัดแบบใหม่กับเครื่องมือวัดความดันแบบมาตรฐานทั่วไป โดยใช้เครื่องมือวัดความดันแบบไดอะแฟรม ซึ่งติดตั้งอยู่กับเครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์แบบมาตรฐานทั่วไป ในงานนี้เครื่องคาปิลารี่ที่ใช้ทดสอบเปรียบเทียบคือ Rosand Precision Capillary Rheometer ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกที่ใช้คือ 12 มม. และใช้ลูกสูบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 11 มม. ขนาดของ die มีค่า L/D เท่ากับ 16 อุณหภูมิและอัตราเฉือนที่ใช้เหมือนกันกับในการดำเนินการทดสอบข้างต้น

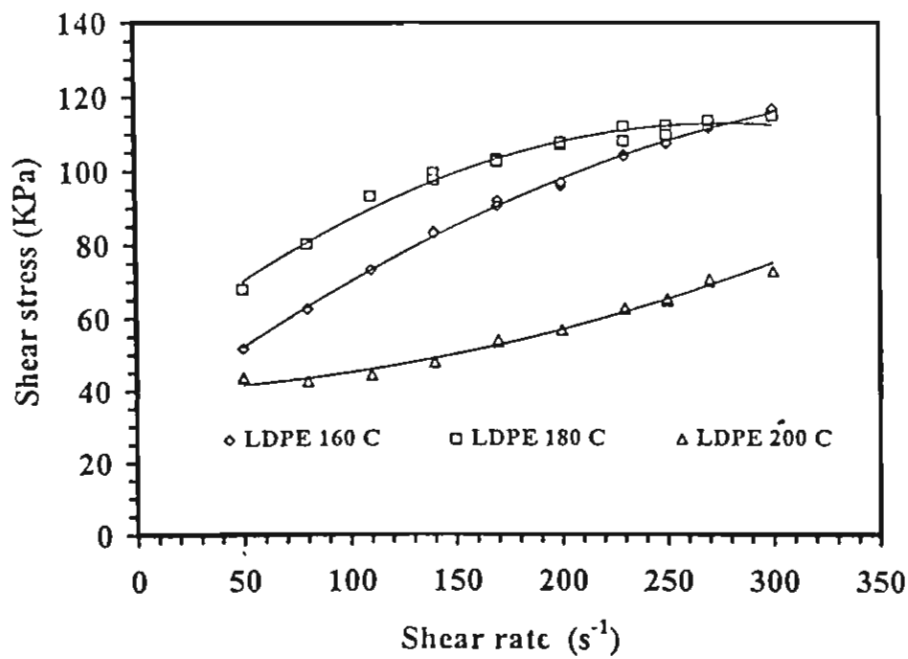
ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ผลการทดสอบคุณสมบัติทางการไหลของพอลิเอทิลีนโดยใช้เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ และแบบมาตรฐานสากล แสดงในรูปที่ 7 ถึง 10 ซึ่งสามารถสรุปข้อมูลสำคัญได้ดังนี้

1. รูปกราฟที่ 7 และ 8 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนของ LDPE ที่อุณหภูมิต่างๆ โดยใช้เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่และแบบมาตรฐานสากล จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเป็นคุณสมบัติทางการไหลที่ได้รับจากการใช้เครื่องมือวัดความดันทั้งสองไม่เป็นไปตามกฎของนิวตันกล่าวคือ ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนไม่คงที่ ซึ่งจัดเป็นของไหลประเภท pseudoplastic non-newtonian fluids คือพฤติกรรมการไหลที่อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราเฉือนน้อยกว่า 1 ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวนี้ เป็นไปตามที่คาดไว้ [4,7]



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate โดยการใช้เครื่องมือวัดความดันแบบไดอะแฟรม

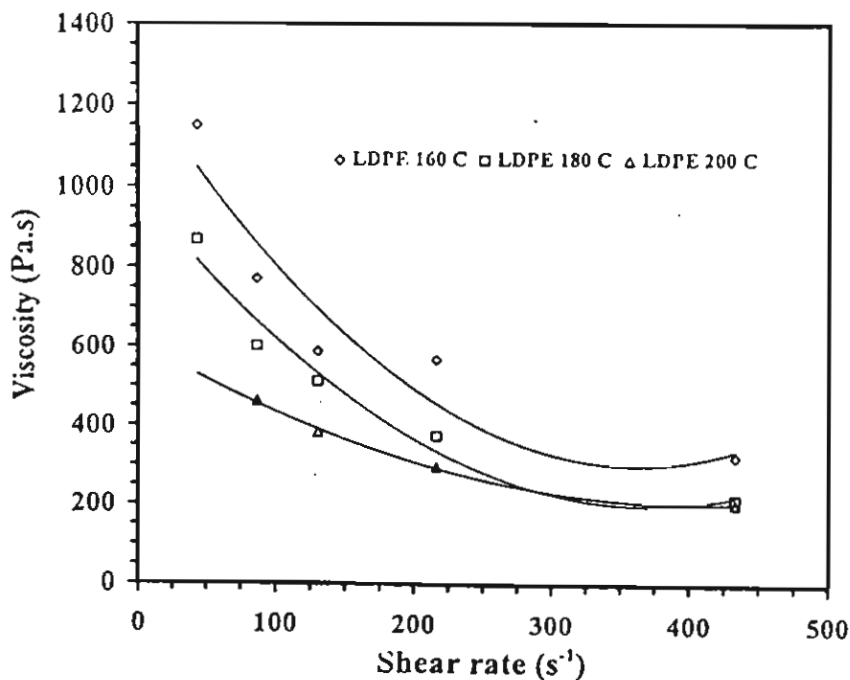


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate โดยการใช้เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง

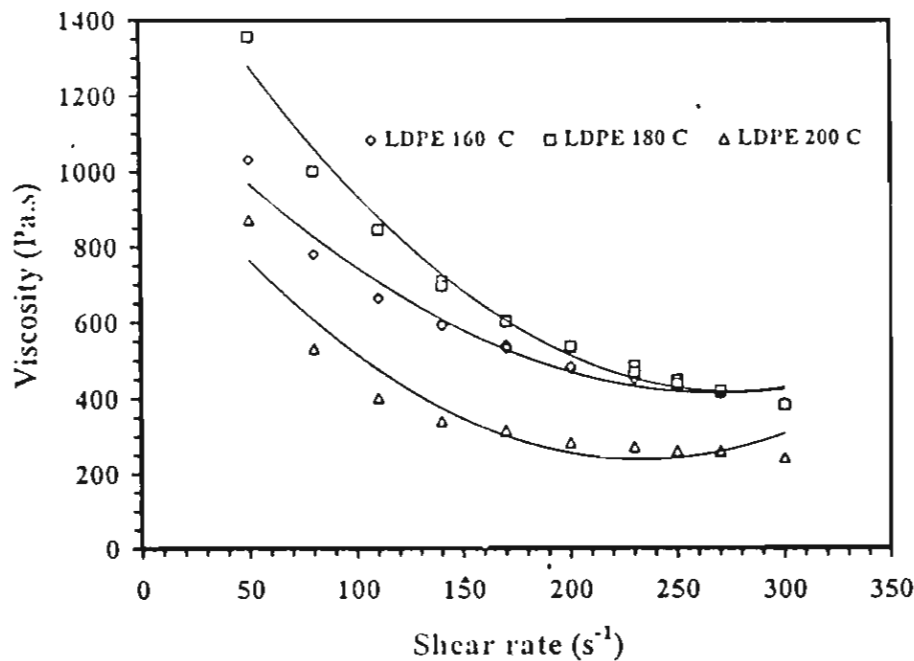
2. รูปกราฟที่ 9 และ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนและความหนืดของ LDPE ที่อุณหภูมิต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้นความหนืดจะลดลง ซึ่งพฤติกรรมการไหลนี้เป็นพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์และผลรวมก็ใช้การมาแล้ว ดังนั้น เราสามารถกล่าวได้ว่า เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงมีประสิทธิภาพที่จะใช้เป็นเครื่องมือวัดความดัน ในการศึกษาคุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์ได้
3. จากผลการทดลองในรูปที่ 7 ถึง 10 จะเห็นได้ว่าหากพิจารณาผลกระทดสอบที่สถานะ (อุณหภูมิและอัตราเฉือน) เดียวกัน ลักษณะของกราฟมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าความเค้นเฉือนและความหนืดที่ได้จากการวัดจากทั้งสองเครื่องไม่เท่ากัน โดยความแตกต่างของผลการทดสอบจากเครื่องมือวัดทั้งสองมีค่าประมาณ 10–15% ในช่วงอัตราเฉือนต่ำๆ แต่ผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกันมาก ในช่วงอัตราเฉือนสูงๆ (ความแตกต่างอยู่ในช่วงข้อผิดพลาดจากการทดลองที่ยอมรับได้ในทางปฏิบัติ คือประมาณ 4%) คณะวิจัยให้ความสนใจและมีความพอใจต่อผลการวัดในช่วงอัตราเฉือนสูง เพราะมีประโยชน์โดยตรงในภาคปฏิบัติของกระบวนการทางพอลิเมอร์มากกว่าผลการทดสอบในช่วงอัตราเฉือนต่ำ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกทั้งสองของเครื่องต่างกัน [7,8] ซึ่งมีผลต่อผลการทดสอบ เป็นที่ทราบกันดีว่าคุณสมบัติของพอลิเมอร์ในกระบวนการผลิต และคุณสมบัติของชิ้นงานหลังการผลิตขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลของพอลิเมอร์ ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวนี้มีผลกระทบโดยตรงจากการออกแบบเครื่องมือทดสอบและเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิต [8] จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [7–9] ทำให้ทราบว่าค่าที่ได้จากการวัดคุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวด้วยเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์ชนิด (ขนาดและประเภท) ต่างๆ ได้ค่าการวัดที่ไม่เท่ากัน แต่จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟการไหล (flow curves) ในทิศทางเดียวกัน
4. คณะผู้ออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดความดันได้ข้อสังเกตว่า ค่าความดันที่วัดได้ของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง สามารถทำได้ที่จะวัดความดันตั้งแต่ 25 bar ขึ้นไป ทั้งนี้เป็นผล เกี่ยวข้องกับค่าคงที่ (k) ของสปริง กล่าวคือ สปริงที่ใช้ต้องการแรงภายนอกมากกว่าอย่างน้อย 25 bar ที่จะสามารถดันให้สปริงเกิดการยุบตัว อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดนี้มิได้มีผลกระทบต่อการวัดความดันของพอลิเมอร์ในเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์ใน

งานวิจัยครั้งนี้ เพราะในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ และการทดสอบคุณสมบัติของพอลิเมอร์โดยทั่วไป ระดับความดันที่เกิดขึ้นสูงกว่า 25 bar ขึ้นไป

5. ระบบการวัดของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง เป็นระบบที่เข้าถึงพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยตรง ด้วยชุดกลไกการส่งถ่ายแรงและแปลงเป็นความดันที่เป็นกลไกสมดุลแรงพื้นฐานอย่างง่ายซึ่งไม่ซับซ้อน และที่กล่าวว่าเป็นเครื่องมือวัดที่เข้าถึงพฤติกรรมการไหลของพอลิเมอร์นั้นสามารถอธิบายได้คือ เนื่องจากชุดกลไกที่รับแรงจากพอลิเมอร์หลอมเหลวในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกสัมผัสกับพอลิเมอร์โดยตรง เมื่อเคลื่อนลูกสูบอัดพอลิเมอร์ให้ไหลลงสู่ die ความดันจะแสดงโดยเครื่องมือวัด (แบบเข็มสปริง) ทันที แต่จะแสดงค่าในเวลาต่อมา (ประมาณ 2 วินาทีหลังการอัดของลูกสูบ) กรณีนี้ มิได้แสดงว่าเครื่องมือวัดความดันไม่ไวต่อการตรวจวัด แต่เป็นเพราะพฤติกรรมการอัดได้ (compressibility) ของพอลิเมอร์[10] กล่าวคือ ในช่วงแรกจะยังไม่เกิดความดันเนื่องจากยังไม่มีแรงมากกระทำที่ปลายเข็มวัดความดัน เนื่องจากว่าพอลิเมอร์ยังไม่อัดตัว จากนั้นเมื่อพอลิเมอร์เกิดการอัดตัวจึงเกิดความดันและการไหล อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อเกิดการไหลขึ้นแล้ว การตรวจวัดความดันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการอัดของลูกสูบจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องและทันที



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่าง viscosity และ shear rate โดยการใช้เครื่องมือวัดความดันแบบไดอะแฟรม



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่าง viscosity และ shear rate โดยการใช้เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง

ข้อเสนอแนะทั่วไปของคณะผู้ออกแบบและวิจัยของเครื่องมือ วัดความดันแบบเข็มสปริง

1. เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง สามารถใช้วัดความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวภายใต้ สภาวะอุณหภูมิสูงได้ดี โดยที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์เสริมชดเชยการเปลี่ยนแปลงค่าความดัน (shift in pressure) อันเนื่องมาจากอุณหภูมิ เหมือนกับเครื่องมือวัดความดันแบบไดอะแฟรมซึ่งต้องใช้ตัวปรับค่าหรือชดเชยค่าความดันจากผลของอุณหภูมิ [5-6] อุปกรณ์ดังกล่าวคือ dummy gauges หรือ temperature compensation gauges เหตุผลที่เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่นี้ไม่ต้องการอุปกรณ์เพื่อชดเชยค่าความดันที่เปลี่ยนไปเนื่องจากอุณหภูมิคือ มีการติดตั้งระบบฉนวนความร้อนระหว่างระบบของไหล (barrel) และชุดความต้านทานแบบปรับค่าได้ซึ่งเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดความดัน ระบบฉนวนความร้อนดังกล่าวทำจากวัสดุเบอร์การไรท์ ตามที่แสดงในรูปที่ 2
2. ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง ถูกออกแบบให้สามารถถอดประกอบได้ง่ายและไม่ยุ่งยาก เพราะมีโครงสร้างภายในไม่ซับซ้อน

3. ช่วงการวัดระดับความดัน (measuring pressure range) สามารถปรับเปลี่ยนภายในเครื่องมือวัดเดียวกัน โดยการปรับช่วงการวัดดังกล่าวนี้ สามารถทำได้ง่ายโดยการปรับเปลี่ยนสปริงให้มีค่า k คงที่ที่แตกต่างกัน กัน คุณสมบัติดังกล่าวนี้ ไม่สามารถทำได้ในเครื่องมือวัดความดันชนิดอื่นๆ
4. วัสดุที่ใช้ทำเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง เป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศและมีราคาถูก ทำให้ต้นทุนในการผลิตต่ำ (ต้นทุนในการผลิตเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงต่อหน่วยประมาณ 3,000 บาท) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความดันชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ จะเห็นว่ามีราคาต่ำกว่ามากตัวอย่างเช่น เครื่องมือวัดความดันแบบไดอะแฟรม มีราคาต่อหน่วยโดยประมาณคือ 110,000 บาท
5. เนื่องจากโครงสร้างโดยทั่วไปของเครื่องมือวัดแบบใหม่เป็นแบบเชิงกล (mechanical system) ดังนั้น เครื่องมือวัดชนิดนี้มีความแข็งแรงสูง (robust)
6. การเก็บบันทึกข้อมูลค่าความดันเป็นระบบเก็บข้อมูลด้วยความเร็วสูงทำให้ได้ค่าความดันที่ละเอียดภายในระยะเวลาอันสั้นทำให้ได้ผลการทดลองที่มีความผิดพลาดน้อยมาก ค่าความผิดพลาดของผลการวัดที่ได้จากการใช้เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่นี้พบว่าน้อยมาก ประมาณ 4% ซึ่งสามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติ

เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงที่สร้างขึ้นนี้เป็นเครื่องต้นแบบ ซึ่งยังต้องการการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการวัดความดันให้ดีขึ้นเช่น การพัฒนาการใช้วัสดุในการจัดสร้างให้เหมาะสมมากขึ้น (โดยคำนึงถึงขนาด น้ำหนัก และราคาของเครื่องมือวัดฯ) การเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจวัดให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น และการพัฒนาเครื่องมือวัดชนิดนี้ให้สามารถใช้ได้กับระบบของไหลอื่นๆ (เช่น ของไหลความหนืดต่ำ) ที่ต้องการการตรวจวัดความดัน

บทสรุป

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวไปแล้วสามารถสรุปได้ว่า เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงสามารถวัดความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องคาบิลารีโอมิเตอร์ได้ ซึ่งสรุปจากการเปรียบเทียบผลการทดสอบกับการใช้เครื่องมือวัดความดันมาตรฐานแบบไดอะแฟรม นอกจากนี้ เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงยังถูกพบว่า เป็นเครื่องมือที่มีโครงสร้างการออกแบบและการใช้งานค่อนข้างง่าย สามารถปรับช่วงการวัดได้ง่าย ราคาถูก แข็งแรง และมีประสิทธิภาพในการตรวจวัดสูง

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำหรับการให้ทุนสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัยในโครงการวิจัยหลังปริญญาเอก (PDF 48/2541) และขอขอบพระคุณ บริษัท ไทยพลาสติกและเคมีภัณฑ์ จำกัด ในการให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ (Rosand Precision Capillary Rheometer)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sombatsompop N. and Wood A.K. "**An Examination of Melt Fracture in Molten Polymers**" Polymer-Plastics Technology and Engineering, 37 (3), 317-331, 1998.
- [2] Christodoulou K.J., Wood A.K. and Sombatsompop N. "**Novel Techniques for Measurement of Die Swell of Polymer Melts**" SPE ANTEC Technical Papers, 44 (1), 915-919, 1998.
- [3] Morton-Jones D.H. "**Polymer Processing**" Chapman and Hall, London, 1993.
- [4] Sombatsompop N., Tan M.C. and Wood A.K. "**Flow Analysis of Natural Rubber in a Capillary Rheometer: Part 1. Rheological Behaviour and Flow Visualisation in the Barrel**" Polymer Engineering and Science, 37 (2), 270-280, 1997.
- [5] Holman J.P. "**Experimental Methods for Engineers**" McGraw-Hill, Inc., New York, 1996.
- [6] Bird J.O. "**Science for Engineering**" Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, 1995.
- [7] Sombatsompop N. and Wood A.K. "**Flow Visualisation and Tapered Die Entrance Velocity Profiles of Psuedoplastic non-Newtonian Fluids in Capillary Rheometers**" ASME Fluid Measurements and Instrumentation FED-Vol. 239 (4), 447-452, 1996.

- [8] Sombatsompop N and Wood A.K. "Error Sources in Rheological Measurements of Carbon Black Filled Rubber Compounds" Journal of the Science Society of Thailand (submitted).
- [10] Leblanc J.L. "Discrepancies in Testing Rubber Compounds with Different Commercial capillary Rheometers" *Plastics, Rubbers & Composites Processing and Applications*, 21 (2), 81, 1994.
- [11] Sombatsompop N and Wood A.K. "Comments on Some Assumptions Made for the Determination of Polymer Melt Flow Properties" *Journal of Scientific Research of Chulalongkorn University*, 23 (2), 101-107, 1998.



คำขอรับสิทธิบัตร



การประดิษฐ์



การออกแบบผลิตภัณฑ์

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตรนี้

ขอรับสิทธิบัตรตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522

แก้ไขเพิ่มเติมพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535

สำหรับเจ้าหน้าที่

วันรับคำขอ 25 S.H. 2541

เลขที่คำขอ

วันยื่นคำขอ 25 S.H. 2541

047983

สัญญาบัตรเจ้าพนักงานการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ

วันประกาศโฆษณา

เลขที่ประกาศโฆษณา

วันออกสิทธิบัตร

เลขที่สิทธิบัตร

ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่

1. ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์
เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงสำหรับการวัดความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลว
ในเครื่องฉีดพลาสติก

1.1 แบบผลิตภัณฑ์
ผลิตภัณฑ์
ประเภทผลิตภัณฑ์

2. ผู้ขอรับสิทธิบัตร และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
91 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ
กรุงเทพฯ 10140

2.1 สัญชาติ ไทย
2.2 โทรศัพท์ 470-9664-5, 470-9672-3
2.3 โทรพิมพ์ -
2.4 โทรสาร 428 - 3374

3. สิทธิบัตรในการขอรับสิทธิบัตร

☐ ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ ☒ ผู้รับโอนสิทธิ ☐ ผู้รับสิทธิโดยเหตุผลอื่น

4. ตัวแทน (ถ้ามี) อยู่ (เลขที่ ถนน จังหวัด รหัสไปรษณีย์)

4.1 ตัวแทนเลขที่
4.2 โทรศัพท์
4.3 โทรพิมพ์
4.4 โทรสาร

5. ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)

ตั้งเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์

6. การยื่นคำขออนุญาตราชอาณาจักร

วันยื่นคำขอ	เลขที่คำขอ	ประเทศ	สัญญาบัตรเจ้าพนักงานการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	สถานะคำขอ
3.1				
3.2				
3.3				
3.4				

6.5 ☐ ผู้ขอรับสิทธิบัตรขอสิทธิให้ถือว่าได้ยื่นคำขอในนี้ในวันที่ได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตรในต่างประเทศเป็นครั้งแรก โดย
☐ ได้ยื่นเอกสารหลักฐานพร้อมคำขอ ☐ ขอยื่นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอนี้

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่อำจะบรรยายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์

โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ

7.1 เลขทะเบียนฝากเก็บ

7.2 วันที่ฝากเก็บ

7.3 สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ

8 การแสดงการประดิษฐ์ ผู้ขอรับสิทธิบัตรได้แสดงการประดิษฐ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด

วันแสดง

วันเปิดแสดง

ผู้จัด

9 ผู้ขอรับสิทธิบัตรขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตรนี้หลังจาก

วันที่

เดือน

พ.ศ.

☐

ผู้ขอรับสิทธิบัตรขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข

ในการประกาศโฆษณา

10 คำขอรับสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม

ผู้ขอรับสิทธิบัตรขอให้ถือว่าคำขอรับสิทธิบัตรนี้ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตรเดิม

วันที่

วันยื่น

เพราะคำขอรับสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยว

ข้องกับคำขอเดิม เพราะ

☐

คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง

☐

ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ

11 ผู้ขอรับสิทธิบัตรขอขึ้นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันยื่นคำขอนี้ และจะจัดยื่นคำขอรับสิทธิบัตรนี้ที่จัดทำเป็นภาษาไทย

ภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอขึ้นเป็นภาษา

☐ อังกฤษ ☐ ฝรั่งเศส ☐ เยอรมัน ☐ ญี่ปุ่น ☐ อื่น ๆ

2. คำขอรับสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย

ก. แบบพิมพ์คำขอ 3 หน้า

ข. รายละเอียดการประดิษฐ์

หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์ 12 หน้า

ค. ข้อถ้อยสิทธิ 1 หน้า

ง. รูปเขียน 6 รูป 6 หน้า

จ. ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์

☐ รูปเขียน รูป หน้า☐ ภาพถ่าย รูป หน้า

ฉ. บทสรุปการประดิษฐ์ 1 หน้า

13. เอกสารประกอบคำขอ

☐ เอกสารหลักฐานแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร☐ หนังสือรับรองการแสดงการประดิษฐ์☐ หนังสือมอบอำนาจ☐ เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ☐ เอกสารขอรับวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็น
วันยื่นคำขอในประเทศไทย☐ เอกสารอื่น ๆ

14. ลายมือชื่อผู้ขอรับสิทธิบัตร

นายกฤษณพงศ์ กีรติกร

อธิการบดี

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่มีอาจะบรรยายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้

โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

ผู้ประดิษฐ์/ออกแบบผลิตภัณฑ์ และที่อยู่ (เลขที่ ถนน ประเทศ)

1. นายณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ
79/49 หมู่ที่ 4 แขวงคันนายาว เขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร 10230
2. นายนเรศ อินทะวงศ์
64/1 หมู่ที่ 10 ตำบลชะมูน อำเภอสว่าง จังหวัดเชียงใหม่ 50140
3. นายนริศ อินทะวงศ์
64/1 หมู่ที่ 10 ตำบลชะมูน อำเภอสว่าง จังหวัดเชียงใหม่ 50140

หนังสือสัญญาโอนสิทธิขอรับสิทธิบัตร

เขียนที่ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
เลขที่ 91 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด
เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

วันที่ 22 ธันวาคม 2541

สัญญาระหว่างผู้โอน คือ

1. นายณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ อยู่บ้านเลขที่ 79/49 หมู่ 4
แขวงคันนายาว เขตคันนายาว กรุงเทพมหานคร 10230
2. นายนเรศ อินต๊ะวงศ์ อยู่บ้านเลขที่ 64/1 หมู่ 10 ต.ชะมวง อ.สารภี
จ.เชียงใหม่ 50140
3. นายนริศ อินต๊ะวงศ์ อยู่บ้านเลขที่ 64/1 หมู่ 10 ต.ชะมวง อ.สารภี
จ.เชียงใหม่ 50140

และผู้รับโอน คือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดย นายกฤษฎพงษ์ กิรติกร
ตำแหน่ง อธิการบดี ตั้งอยู่เลขที่ 91 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร
10140

โดยสัญญานี้ ผู้โอนซึ่งเป็นผู้ประดิษฐ์ เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงสำหรับการวัด
ความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องคาปิลารี่โรมิเตอร์ ขอโอนสิทธิในการประดิษฐ์ดัง
กล่าว ซึ่งรวมถึงสิทธิขอรับสิทธิบัตรและสิทธิอื่นที่เกี่ยวข้องให้แก่ผู้รับโอน โดยผู้โอนจะได้รับค่าตอบแทน
ตามระเบียบของมหาวิทยาลัยจากผู้รับโอน

.../เพื่อเป็น

เพื่อเป็นพยานหลักฐานแห่งการนี้ ผู้โอนและผู้รับโอนได้ลงลายมือชื่อไว้ข้างล่างนี้

(ลงชื่อ) ผู้โอน
(นายณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ)

(ลงชื่อ) ผู้โอน
(นายนเรศ อินต๊ะวงศ์)

(ลงชื่อ) ผู้โอน
(นายนริศ อินต๊ะวงศ์)

(ลงชื่อ) ผู้รับโอน
(นายกฤษณพงศ์ กิริติกร)

(ลงชื่อ) พยาน
(นายสมพร น้อยยาน)

(ลงชื่อ) พยาน
(นายวิโรจน์ กระแส मुख)

รายละเอียดการประดิษฐ์

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง

สำหรับการวัดความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์

5 1. ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

ก. ลักษณะทั่วไป (รูปที่ 1 แนบมา)

ลักษณะทั่วไปของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง คือ ส่วนที่เป็นกระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง ซึ่งจะถูกใส่เข้าไปภายในเครื่องวัดความหนืดคาปิลลารีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometers) ของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยส่วนปลายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.0 มิลลิเมตร

10 ภายในเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.0 มิลลิเมตร ยาว 35.0 มิลลิเมตร เพื่อเป็นกระบอกประคองให้กับเข็มวัดความดันซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.95 มิลลิเมตร ซึ่งส่วนปลายของเข็มวัดความดันจะใส่แหวนยางทนความร้อน (O-Ring) เพื่อกันการรั่วของพอลิเมอร์หลอมเหลว และสวมอยู่ภายในรู 5.0 มิลลิเมตร ของกระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง บริเวณส่วนกลางของกระบอกประคองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 25.0 มิลลิเมตร ทำเกลียวนอก M 25 x 1.5

15 มิลลิเมตร เพื่อยึดกับเครื่องวัดความหนืดพอลิเมอร์ ภายในเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.0 มิลลิเมตร ยาว 30.0 มิลลิเมตร เพื่อให้ประคองก้านของเข็มวัดความดันและสปริง และส่วนท้ายของกระบอกทำเกลียวนอกที่มีขนาดเดียวกัน เพื่อประกอบเข้ากับฝาปิด มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยบริเวณมุมมีลักษณะเป็นส่วนโค้งมนตามรัศมีของฝาปิด ฝาปิดนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มิลลิเมตร ภายในเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.2 มิลลิเมตร สำหรับให้ก้านเข็มวัดความดันที่มี

20 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ผ่านได้ ส่วนปลายของฝาปิดทำเกลียวในขนาดประมาณ M 25 x 1.5 มิลลิเมตร เพื่อให้ประกอบเข้ากับกระบอกประคองตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ในส่วนท้ายของฝาปิดจะใช้เป็นฐานยึดฉนวนความร้อนที่ทำจากเบอร์กาไรท์ที่มีความหนา 12.0 มิลลิเมตร ระหว่างฝาปิด (ซึ่งประกอบร่วมกับชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมด) กับ ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน ตัวต้านทานปรับค่าได้นี้ถูกประกอบเข้ากับด้านท้ายของก้านของเข็มวัดความ

25 ดัน โดยใช้สลัก ซึ่งชุดความต้านทานนี้ถูกครอบด้วยฝาครอบซึ่งจะถูกเจาะรูเพื่อต่อสายสัญญาณจากตัวต้านทานไปยังชุดเก็บข้อมูลและประมวลผล อันประกอบด้วย ชุดเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง (High-Speed Data Logging System) คอมพิวเตอร์ และชุดแสดงผลโดยผ่านชุดอินเทอร์เฟซ

ข. ส่วนประกอบ(รูปที่ 2 แนบมา)

เครื่องวัดความดันแบบเข็มสปริง มีส่วนประกอบที่สำคัญทั้งหมด 12 ส่วน โดยมีความมุ่งหมายของการประดิษฐ์ ดังต่อไปนี้

- (1) ครอบบอกระบองเข็มวัดความดันและสปริง มีความมุ่งหมาย เพื่อให้เป็นตัวยึดชุดวัดความดันให้ติดกับห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (Barrel) ของเครื่องวัดความหนืดคาปิลารีรีโอมิเตอร์ของพอลิเมอร์หลอมเหลว และทำหน้าที่เป็นตัวประคองเข็มวัดความดันและสปริง
- (2) แหวนยางทนความร้อน มีความมุ่งหมายเพื่อกันการรั่วของพอลิเมอร์หลอมเหลวจากห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องวัดความหนืดพอลิเมอร์หลอมเหลว มายังส่วนกลางของกระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง
- (3) เข็มวัดความดัน มีความมุ่งหมาย เพื่อเป็นตัวส่งถ่ายแรงดันจากพอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกไปยังตัวด้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน ซึ่งผลของการเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดัน จะทำให้เกิดการเลื่อนของตัวด้านทาน และทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปตามแรงดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่เกิดขึ้น
- (4) สลัก มีความมุ่งหมาย เพื่อเป็นตัวยึดระหว่างส่วนท้ายก้านของเข็มวัดความดันกับตัวด้านทาน
- (5) สปริง มีความมุ่งหมาย เพื่อทำหน้าที่เป็นชิ้นส่วนในการต้านทานการเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดันภายใต้ความดันที่เกิดในบริเวณปลายของเข็มวัดความดัน และเพิ่มความสามารถรับแรงจากพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มาดันบริเวณส่วนปลายของเข็มวัดได้มากขึ้น เนื่องจากความเป็นอีลาสติคของสปริง สปริงดังกล่าวนี้ยังทำหน้าที่ในการเลื่อนเข็มวัดความดันเคลื่อนที่กลับเมื่อความดันลดลง
- (6) ฝาปิด มีความมุ่งหมาย เพื่อทำหน้าที่เป็นฝาปิด และยึดกระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง เพื่อให้ทั้งเข็มวัดความดันและสปริงอยู่ภายในกระบอก นอกจากนี้ ยังทำหน้าที่เป็นฐานรองแผ่นฉนวนความร้อน
- (7) แผ่นฉนวนความร้อน ฉนวนความร้อนนี้ทำจากเบอร์กาไรท์ โดยมีความมุ่งหมาย เพื่อทำหน้าที่เป็นป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องวัดความหนืดพอลิเมอร์หลอมเหลวที่แพร่มาตามชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ ยังทำหน้าที่เป็นฐานยึดตัวด้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน และฝาครอบตัวด้านทาน
- (8) ฉากยึดตัวด้านทาน มีความมุ่งหมาย เพื่อเป็นตัวยึดตัวด้านทานกับแผ่นฉนวนความร้อน

- (9) ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน มีความมุ่งหมาย เพื่อใช้เปลี่ยนค่าความต้านทานให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดัน เพื่อให้ได้ผลของความแตกต่างของระดับแรงดันไฟฟ้าซึ่งจะนำไปสอบเทียบเป็นค่าความดันจริงต่อไป
- (10) ฝาครอบตัวต้านทาน มีความมุ่งหมาย เพื่อเป็นตัวครอบชุดวัดความต้านทาน และป้องกันการถูกกระแทกและฝุ่นละอองภายนอก
- (11) ชุดวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (Analog-to-Digital Converter Circuit) และ การ์ดอินเทอร์เฟซ โดยชุดวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล มีความมุ่งหมาย เพื่อใช้เปลี่ยนสัญญาณอนาลอก ซึ่งเป็นค่าของระดับความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้า ที่จะนำไปสอบเทียบให้เป็นสัญญาณดิจิตอล และ การ์ดอินเทอร์เฟซ มีความมุ่งหมาย เพื่อใช้เป็นชุดวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมการติดต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ กับชุดวงจรอนาลอกทุกดิจิตอล โดยจะรับข้อมูลที่เป็นดิจิตอลไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์
- (12) ชุดการเก็บข้อมูลและแสดงผล มีความมุ่งหมาย เพื่อเก็บข้อมูลที่ได้จากการวัด และแสดงคำสั่งให้คอมพิวเตอร์ทำการประมวลผลข้อมูล เพื่อแสดงค่าความดันจริงที่เกิดขึ้นในระบบ

ค. หลักการทำงาน

เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงที่ใช้กับพอลิเมอร์หลอมเหลวนี้ อาศัยหลักการของการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ตัวความต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน ซึ่งอาศัยระบบทางกลที่ประกอบด้วยเข็มวัดความดัน แหวนยางทนความร้อน และสปริง ในการประดิษฐ์ครั้งนี้ เน้นถึงรายละเอียดของระบบทางกล ซึ่งมีหลักการทำงานดังต่อไปนี้ เมื่อมีความดันในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาปีลารีรีโอมิเตอร์ พอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ในห้องหลอมเหลวทำหน้าที่ส่งผ่านความดันไปยังเข็มวัดความดัน โดยมีแหวนยางทนความร้อนสวมอยู่ส่วนปลายของเข็มวัดซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหล (Leakage) ของพอลิเมอร์ ความดันดังกล่าวทำให้เข็มวัดความดันเคลื่อนที่ ซึ่งการเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดันนี้ถูกต้านทานโดยสปริงที่สวมอยู่รอบก้านของเข็มวัดความดัน ส่วนท้ายของเข็มวัดความดันต่อเข้ากับตัวความต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนโดยใช้สลักเป็นตัวยึด การเคลื่อนที่ของเข็มวัดความดันส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานในตัวความต้านทานแบบเลื่อน และส่งผลให้ค่าแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ระบบทางกลกับตัวความต้านทานถูกแยกออกจากกันด้วยแผ่นฉนวนความร้อนที่ทำจากเบอร์กาไรท์ เพื่อป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากห้องหลอมเหลวแพร่มายังตัวความต้านทาน ในการประดิษฐ์นี้ มีการเก็บข้อมูลโดยใช้เครื่องเก็บข้อมูลแบบความเร็ว

สูง มีการประมวลผลและแสดงผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงผลของการวัดสามารถถูกแสดงในรูปของแรงดันไฟฟ้า และค่าความดันจริง

ง. ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

- 5 จดมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้ คือ การออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ ที่มีระบบการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และสามารถใช้วัดความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องวัดความหนืดคาปิลารรีโอมิเตอร์ของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลที่อุณหภูมิสูงได้ดี ซึ่งเครื่องมือวัดความดันดังกล่าวนี้อาศัยหลักการทำงานของเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ร่วมกับระบบกลไกของเข็มวัดความดัน
- 10 แหวนยางทนความร้อน สปริง และชุดวัดความดันทานปรับค่าได้แบบรางเลื่อน เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่นี้ มีความแข็งแรงคงทน ใช้งบประมาณในการจัดสร้างค่อนข้างน้อย และให้ประสิทธิภาพการวัดความดันสูง เนื่องจากใช้ระบบเก็บข้อมูลและประมวลผลโดยใช้เครื่องเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง และคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ ด้วยระบบป้องกันนำความร้อนระหว่างเครื่องคาปิลารรีโอมิเตอร์และเครื่องมือวัดความดัน ค่าการวัดจะไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิ

15 2. สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

- วิศวกรรมการออกแบบเครื่องมือวัดในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์
- มาตรวิทยา
- วิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือวัด

20 3. ภูมิหลังของศิลปวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

- ในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ หมายถึง กระบวนการแปรรูปวัสดุพอลิเมอร์เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป โดยผ่านขบวนการให้และระบายความร้อนภายใต้ความดันสูง เป็นที่ทราบกันดีในทางปฏิบัติว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวเป็นของไหลที่สามารถอัดภายใต้ความดันได้ (Compressible Fluids) ในกระบวนการผลิตและการทดสอบคุณสมบัติของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยมากกระทำกัน
- 25 ภายใต้ความดันสูง จากงานวิจัยค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์มากมาย ระบุว่า คุณสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งบ่อยครั้งที่แสดงในรูปของค่าความหนืด ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวกำหนดความสามารถของกระบวนการผลิตที่เหมาะสม หากผู้ผลิตกำหนดสภาวะการผลิตที่เหมาะสมได้ ก็จะทำให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ดีตามไปด้วย ค่าความหนืดของพอลิเมอร์โดยมากนิยมวัดโดยใช้เครื่องมือวัดความหนืดที่เรียกว่า รีโอมิเตอร์ (Rheometers) หรือ วิสโคมิเตอร์ (Viscometers) ซึ่งมี
- 30 มากมายหลายลักษณะ แต่แบบที่นิยมใช้กับพอลิเมอร์หลอมเหลวทางวิศวกรรม คือ คาปิลารรีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometers) ระหว่างทำการทดสอบ ความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องมือวัดนี้ ถือว่ามี

ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะความดันที่เกิดขึ้นเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึง
 คุณสมบัติของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่กำลังทดสอบ โดยปกติความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องคาปิลารี่
 โอมิเตอร์ จะมีค่าระหว่าง 10-150 บาร์ ในช่วงอุณหภูมิใช้งานทั่วไปประมาณ 100-300 °C ทั้งนี้ ขึ้น
 อยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ หลักการของเครื่องมือวัดชนิดนี้ คือ การวัดค่าความดันตก (Pressure
 Drop) ในระบบ ณ อัตราการไหลต่างๆ สิ่งที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของเครื่องมือวัดชนิดนี้ คือ การได้
 รับค่าความดันตกในระบบที่ถูกต้องแม่นยำ ดังนั้น เครื่องมือที่ใช้วัดความดันจะต้องได้มาตรฐานที่
 เป็นที่ยอมรับสากล และให้ค่าการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ เครื่องมือวัดความดันที่นิยมใช้กันมากใน
 เครื่องมือวัดความหนืดคาปิลารี่โอมิเตอร์ของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ เครื่องมือวัดความดันแบบ
 ไดอะแฟรมสเตรนเกจ (Strain-Gauge Diaphragm Transducers) ทั้งนี้เพราะสามารถให้ค่าการวัดที่
 แม่นยำ และสามารถใช้วัดในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของความดันอย่างต่อเนื่อง (Dynamic
 Measurement) ได้ค่อนข้างดี หลักการทำงานของเครื่องมือวัดความดันชนิดนี้ อาศัยการวัดการเปลี่ยน
 แปลงความต้านทานที่เกิดขึ้น ในวงจรความต้านทานที่เรียกว่า สเตรนเกจ (Strain Gauge) เครื่องมือ
 วัดชนิดนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่ว่า ไม่สามารถยอมให้สเตรนเกจสัมผัสของไหลที่กำลังวัดได้ ดังนั้น เมื่อ
 สเตรนเกจไม่สัมผัสโดยตรงกับของไหล นั้นหมายความว่า จะต้องมียาระบบทางกลที่จะสามารถส่ง
 ผ่านความดันในระบบของเหลวไปสู่สเตรนเกจ โดยทั่วไปจะใช้ระบบการส่งผ่านความดันโดยอาศัย
 การเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ของแผ่นไดอะแฟรมที่มักจะติดตั้งอยู่กับสเตรน
 เกจ ซึ่งแผ่นไดอะแฟรมนี้ไม่คงทนแข็งแรงมากนัก และหากเกิดการชำรุดเสียหาย นั้นก็หมายถึงว่า
 เครื่องมือวัดความดันชนิดนี้ ไม่สามารถใช้งานได้ เหตุการณ์นี้ พบบ่อยครั้ง เช่น ในกรณีที่ของไหล
 พอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวในขณะที่ยังสัมผัสอยู่กับแผ่นไดอะแฟรม และถูกแยกออกอย่างไม่ระมัด
 ระวัง นอกจากนี้ หากต้องการบันทึกสัญญาณ เครื่องมือวัดชนิดนี้อาจต้องการชุดขยายสัญญาณ เนื่อง
 จากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับจากเครื่องมือวัดมีค่าค่อนข้างต่ำ สำหรับในแง่ของราคาของเครื่องมือ
 วัดชนิดนี้ โดยปกติมีราคาค่อนข้างสูง (ที่ใช้อยู่ทั่วไป มีราคาสำหรับเครื่องขนาดเล็ก ประมาณ
 1,800,000 บาท) เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดชนิดอื่นๆ ในย่านการวัดเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจาก
 ประสิทธิภาพและค่าความแม่นยำในการวัดที่สูง ประกอบกับการใช้เทคโนโลยีขั้นสูง และซับซ้อนใน
 การผลิตเครื่องมือวัดดังกล่าว

โดยทั่วไป เครื่องมือวัดความดันที่ดีควรมีคุณสมบัติ ดังนี้ คือ ให้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ ความ
 เชื่อมั่นสูง ราคาถูก ผลิตและหาซื้อง่าย อายุการใช้งานยาวนาน คงทนแข็งแรง และไวต่อการเปลี่ยนแปลง
 ที่เล็กน้อยของความดัน แต่ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้อง
 กับความดันที่กำลังตรวจวัด (เช่น อุณหภูมิ สารเคมี หรือ/และ ปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น ฯลฯ) ใน
 สหประชาชาติฉบับนี้ แสดงถึงการประดิษฐ์เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่สำหรับการวัดความดันใน

เครื่องมือวัดความหนืดคาปิลารีรีโอมิเตอร์ ที่ให้ค่าความถูกต้องแม่นยำ และมีความเชื่อมั่นสูง ราคาถูก ผลิตและหาซื้อง่าย อายุการใช้งานยาวนาน มีความทนแข็งแรง และไวต่อการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อยของความดัน ซึ่งโดยลักษณะของการออกแบบ สามารถใช้วัดในสถานะที่มีอุณหภูมิสูงได้

5 4. คำอธิบายรูปโดยย่อ

- ◇ รูปที่ 1 แสดงลักษณะทั่วไปภายนอกของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง
- ◇ รูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง ตามลำดับของการประกอบจริง
- ◇ รูปที่ 3 แสดงภาพตัดของส่วนประกอบภายในของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง
- ◇ รูปที่ 4 แสดงลำดับขั้นของการเก็บ ประมวลข้อมูล และแสดงข้อมูลของการวัด
- ◇ รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์และการสอบเทียบระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าความดันจริงของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง
- ◇ รูปที่ 6 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอลและการ์คอินเตอร์เฟส

15 5. การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

ตามรูปที่ 1 เป็นการแสดงลักษณะทั่วไปภายนอกของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง ส่วนปลายเป็นกระบอกประคองที่เข็มวัดความดัน ซึ่งสวมเข้าไปภายในเครื่องมือวัดความหนืดคาปิลารีรีโอมิเตอร์ ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.0 มิลลิเมตร ส่วนกลางของเครื่องมือวัดความดันจะเป็นกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 25.0 มิลลิเมตร ที่ปลายทั้งสองข้างของส่วนกลางของกระบอกประคองเข็มทำเป็นเกลียวนอกขนาด M 25 x 1.5 เพื่อที่ปลายเกลียวด้านหน้าใช้ประกอบเข้ากับห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์ ส่วนปลายเกลียวอีกข้างประกอบเข้ากับฝาปิดซึ่งเป็นชิ้นส่วนถัดมา มีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยบริเวณมุมมีลักษณะเป็นส่วนโค้งมนตามรัศมีของฝาปิด และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มิลลิเมตร ในส่วนท้ายของฝาปิดจะใช้เป็นฐานยึดแผ่นฉนวนความร้อนที่ทำจากเบอร์กาไรท์ ซึ่งฉนวนความร้อนดังกล่าวทำหน้าที่ป้องกันการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องคาปิลารีรีโอมิเตอร์ กระบอกประคองเข็มวัดความดัน สปริงที่สวมอยู่ภายในกระบอกประคองเข็ม และฝาปิด ไปสู่ตัวด้าน

20 ทานปรับค่าได้แบบเลื่อนซึ่งถือเป็นชิ้นส่วนถัดมา ตัวด้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนถูกครอบด้วยฝาครอบตัวด้านทาน โดยฝาครอบตัวด้านทานถูกเจาะรูบริเวณปลายสำหรับต่อสายสัญญาณ จากตัวด้านทานไปยัง ชุดวงจรเปลี่ยนสัญญาณจากอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล (11) ซึ่งมีระดับแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามการเคลื่อนที่ของตัวด้านทาน ซึ่งมีระดับแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 5

30 โวลท์ จะได้สัญญาณออก (Output Signal) ในรูปของสัญญาณดิจิตอล (11) ผ่านชุดอินเตอร์เฟส

และชุดเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในคอมพิวเตอร์ (12) เพื่อนำไปสอบเทียบ เป็นค่าความดันจริง การสอบเทียบความดันทำได้โดยการวัดสัญญาณออกในชุดเก็บข้อมูล ณ ความดันต่าง ๆ ที่ทราบค่าแน่นอนโดยใช้เครื่องมือวัดความดันมาตรฐาน

ตามรูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงตามลำดับของการประกอบจริง ได้แก่ ครอบบอกระเบียงเข็มวัดความดันและสปริง (1) มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก ส่วนปลายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.0 มิลลิเมตร ยาว 25.0 มิลลิเมตร ภายในเจาะรูขนาด 5 มิลลิเมตร ยาว 35 มิลลิเมตร เพื่อเป็นตัวประกอบเข็มวัดความดัน (3) ซึ่งส่วนปลายของเข็มวัดความดัน (3) ใส่แหวนยางทนความร้อน (2) ไว้เพื่อป้องกันการรั่วของพอลิเมอร์หลอมเหลว จากห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องวัดความหนืดพอลิเมอร์หลอมเหลวมายังส่วนกลางของครอบบอกระเบียงเข็มวัดความดันและสปริง (1) ส่วนกลางของครอบบอกระเบียงเข็มวัดความดันและสปริงจะมีขนาดโตขึ้นจากส่วนปลาย คือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.0 มิลลิเมตร ทั้งสองด้านทำเกลียวขนาด M 25 x 1.5 เพื่อให้ส่วนปลายทั้งสองประกอบเข้ากับห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องวัดคาปิลารี่รีโอมิเตอร์และฝาปิด (6) โดยส่วนท้ายประกอบเข้ากับฝาปิด (6) ซึ่งภายในของครอบบอกระเบียงเข็มวัดความดันส่วนกลาง และสปริงถูกเจาะรูเพื่อทำหน้าที่เป็นครอบบอกระเบียงสปริง (5) ที่สวมอยู่รอบก้านของเข็มวัดความดัน (3) และถูกปิดด้วยฝาปิด (6) ซึ่งมีลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยบริเวณมุมมีลักษณะเป็นส่วนโค้งมนตามรัศมีของฝาปิด ส่วนปลายทำเป็นเกลียวในขนาด M 25 x 1.5 เพื่อประกอบเข้ากับครอบบอกระเบียงเข็มวัดความดันและสปริง (1) ที่ทำเป็นเกลียวด้านนอก ส่วนท้ายของฝาปิด (6) เจาะรู 4 รู โดย 2 รูด้านข้างทำเป็นเกลียวในขนาด M5 x 1.25 เจาะไว้สำหรับยึดแผ่นฉนวนกันความร้อนเบอร์กาไรท์ (7) ด้วยน็อต อีก 1 รูด้านข้างทำเป็นเกลียวในขนาด M3 x 1.0 เจาะไว้สำหรับยึดฉากยึดตัวด้านทาน (8) ส่วนรูตรงกลางเจาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.2 มิลลิเมตร เพื่อทำหน้าที่เป็นรูประกอบก้านเข็มวัดความดัน (3) แผ่นฉนวนกันความร้อนเบอร์กาไรท์ (7) ยังทำหน้าที่อีกอย่างหนึ่งคือ เป็นฐานยึดฉากยึดตัวด้านทาน (8) ให้เข้ากับตัวด้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน (9) และแถบเลื่อนในรางเลื่อนของตัวด้านทานจะถูกเจาะรูเพื่อยึดกับก้านของเข็มวัดความดันและสปริง (3) ด้วยสลัก (4) ซึ่งชุดความดันทาน (9) ทั้งหมดจะถูกครอบด้วยฝารอบตัวด้านทาน (10) ดังแสดงในรูปประกอบที่ 1

ตามรูปที่ 3 แสดงภาพตัดของส่วนประกอบภายในที่สำคัญของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริง ได้แก่ ครอบบอกระเบียงเข็มวัดความดันและสปริง (1) ที่ทำจากวัสดุเหล็กเครื่องมือใช้งานที่อุณหภูมิสูง ส่วนปลายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.0 มิลลิเมตร ยาว 25.0 มิลลิเมตร และส่วน

กลางของกระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง (1) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.0 มิลลิเมตร ภายในเจาะรูขนาด 16.0 มิลลิเมตร ยาว 30.0 มิลลิเมตร ซึ่งส่วนกลางนี้ทำหน้าที่ประคองสปริง ทั้งสองด้านของกระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง (1) ทำเกลียวนอกขนาด M 25 x 1.5 เพื่อที่ด้านหน้าจะใช้ประกอบเข้ากับห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ และในส่วนด้านหลังจะประกอบเข้ากับฝาปิด (6) ภายในส่วนปลายเจาะรูขนาด 5.0 มิลลิเมตร ลึกลงไปจากปลายกระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง (1) 35.0 มิลลิเมตร และทำการชุบผิวแข็งและขัดมันเพื่อป้องกันการสึกหรอและยังลดความเสียหายอีกด้วย ภายในรูเจาะขนาด 5.0 มิลลิเมตร ถูกสวมด้วยเข็มวัดความดัน (3) ที่มีขนาด 4.95 มิลลิเมตร และผ่านทำการชุบผิวแข็งและขัดมัน ส่วนปลายของเข็มวัดความดัน(3) มีแหวนยางสวมอยู่เพื่อป้องกันการรั่วไหล (Leakage) ของฟลูอิเดอรัลขณะใช้งานอีกด้วย ถัดจากส่วนปลายเข็มจะเป็นบารับสปริง ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16.0 มิลลิเมตร ยาว 5.0 มิลลิเมตร และก้านของเข็มวัดความดัน (3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 7.9 มิลลิเมตร ยาว 90.0 มิลลิเมตร โดยส่วนท้ายของก้านของเข็มวัดความดัน (3) เจาะรูขนาด 1.0 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการประกอบกับแถบเลื่อนของตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน (9) ด้วยสลัก (4) สำหรับสปริง (5) ที่ใช้เป็นสปริงที่มีพื้นที่หน้าของสปริงเป็นสี่เหลี่ยม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอกเท่ากับ 15.0 มิลลิเมตร ยาว 30.0 มิลลิเมตร ซึ่งจะถูกลบเข้าไปยังก้านของเข็มวัดความดัน (3) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8.0 มิลลิเมตร และถูกประคองด้วยกระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง (1) โดยจะถูกปิดด้วยส่วนปลายด้วยฝาปิด (6) ซึ่งฝาปิดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.0 มิลลิเมตร และมีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม โดยบริเวณมุมมีลักษณะเป็นส่วนโค้งมนตามรัศมีของฝาปิด (5) ภายในเจาะรูขนาด 8.2 มิลลิเมตร สำหรับให้ก้านเข็มวัดความดัน (3) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.9 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ผ่านได้ง่าย ส่วนปลายของฝาปิด (6) ทำเกลียวในขนาดประมาณ M 25 x 1.5 มิลลิเมตร เพื่อให้ประกอบเข้ากับกระบอกประคองเข็มวัดความดัน (1) ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ในส่วนท้ายของฝาปิดจะใช้เป็นฐานยึดแผ่นฉนวนกันความร้อน (7) ที่ทำจากเบอร์กาไรท์ สำหรับตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน (9) ที่ใช้ เป็นตัวต้านทานที่มีความต้านทาน 10 กิโลโอห์ม ชนิดบี ซึ่งถูกยึดอยู่บนแผ่นฉนวนกันความร้อน (7) โดยใช้ฉากยึดตัวต้านทาน (8) และแถบเลื่อนของตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน (9) ซึ่งถูกประกอบเข้ากับด้านท้ายของก้านของเข็มวัดความดัน (3) โดยใช้สลัก (4) ชุดความต้านทานนี้ถูกรอบด้วยฝารอบ (10) ซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมโดยจะถูกยึดกับแผ่นฉนวนกันความร้อนด้วยน็อต เพื่อป้องกันการกระแทกและฝุ่นละอองจากภายนอก

ตามรูปที่ 4 แสดงลำดับขั้นของการเก็บ ประมวลผลข้อมูล และแสดงข้อมูลของการวัดความดัน โดยอธิบายการทำงานของโปรแกรมตามรูป ในส่วนของการรับสัญญาณเข้าใช้ความต้านทานปรับค่า

ได้แบบเลื่อน (8) ที่มีค่าความต้านทาน 10 กิโลโอห์ม ชนิดบี ทำหน้าที่แบ่งแรงดันเพื่อให้ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าที่ต่างกันโดยใช้ไอซีเบอร์ ADC0804 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณเข้าอนาล็อก 1 เป็น 8 บิตสัญญาณออก ซึ่งคอมพิวเตอร์จะอ่านข้อมูลที่เข้าทางบัสข้อมูล (Data Bus) โดยผ่านชุดอินเทอร์เฟสและวงจรเปลี่ยนสัญญาณ (11) ภายในวงจรใช้ไอซีเบอร์ 8255 ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมการติดต่อระหว่างชุดวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (11) กับบัสข้อมูลของคอมพิวเตอร์เพื่อนำข้อมูลที่เข้าไปได้เข้าไปประมวลผล ในส่วนของชุดเก็บข้อมูล ประมวลผล และชุดแสดงผล (12) โดยหน่วยประมวลผลกลางของคอมพิวเตอร์ หรือที่เรียกว่า หน่วยควบคุมการประมวลผลกลาง หรือที่เรียกย่อว่า ซีพียู (CPU) ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลที่รับเข้ามาตามชุดคำสั่งของโปรแกรมที่สร้างขึ้นโดยใช้ภาษาซี เพื่อคำนวณและสอบเทียบข้อมูลให้ได้ผลเป็นค่าความ

10 ดันจริงซึ่งให้หน่วยวัดเป็นบาร์ และค่าของแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาจริง แล้วเก็บข้อมูลโดยใช้ชุดเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง การเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้ากับเวลาแสดงอยู่ในรูปแบบของเทกสไฟล์ (Text File) และแสดงค่าความดันเป็นตัวเลขบนจอภาพ (Monitor) ของคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของกราฟฟิกส์ (Graphics)

15 ในส่วนของการสอบเทียบค่าของแรงดันไฟฟ้ากับค่าความดันจริงมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้ คือ ค่าความต้านทานสูงสุดของตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนเท่ากับ 10 กิโลโอห์ม ย่านแรงดันไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงทางด้านสัญญาณอนาล็อก คือ 0 ถึง 5 โวลต์ ซึ่งตรงกับตัวเลขสัญญาณดิจิทัลตั้งแต่ 0 ถึง 256 ดังนั้น ค่าแรงดันไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณดิจิทัล 1 ช่วงค่า (เช่น จาก 0 ถึง 1 หรือ จาก 1 ไป 2 เป็นต้น) คือ

$$= \frac{5,000mV}{256} \quad (\text{สมการ 1})$$

$$= 19.53125 \text{ mV}$$

สำหรับ ค่าความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงสัญญาณดิจิทัล 1 ช่วงค่า คือ

$$= \frac{10,000\Omega}{256} \quad (\text{สมการ 2})$$

$$= 39.0625 \Omega$$

จากการสอบเทียบทางปฏิบัติเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงที่ประดิษฐ์นี้ กับเครื่องมือวัดความดันมาตรฐาน ให้สมการของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันจริงกับการเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัล ดังนี้

$$\text{ความดันจริง} = (1.2774 \times \text{สัญญาณดิจิทัล}) - 7.4457 \quad (\text{สมการ 3})$$

หรือ

$$\text{สัญญาณดิจิทัล} = (\text{ความดันจริง} + 7.4457)/1.2774 \quad (\text{สมการ 4})$$

ในกรณีของความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้า กับการเปลี่ยนสัญญาณดิจิทัล สามารถให้
สมการความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

5 จากสมการ 1 แรงดันไฟฟ้า = สัญญาณดิจิทัล x 19.53125 (สมการ 5)
หรือ

$$\text{สัญญาณดิจิทัล} = \text{แรงดันไฟฟ้า}/19.53125 \quad (\text{สมการ 6})$$

จากสมการ 4 และ 6 สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันจริงกับแรงดันไฟฟ้า ได้ดังนี้

10 ความดันจริง = 0.0654 (แรงดันไฟฟ้า) - 7.4457 (สมการ 7)

สมการ 7 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันจริงกับแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็น
ความสัมพันธ์แบบเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 5

15 จากแผนภูมิในส่วนแลเงาในรูปที่ 4 เป็นลำดับขั้นตอนของการคำนวณ เก็บและประมวลข้อมูล
เริ่มจากการกำหนดค่าที่เกี่ยวข้องอัน ได้แก่ จำนวนข้อมูลที่ต้องการเก็บใน 1 วินาที, เวลาที่ใช้เก็บ
ข้อมูล, ชื่อของข้อมูลที่ต้องการนำข้อมูลไปจัดเก็บ เมื่อเริ่มต้น โปรแกรมจะเริ่มรับสัญญาณ
ดิจิทัล (เป็นเลขฐาน 16) ที่ได้จากการแปลงสัญญาณอนาล็อกผ่านชุดอินเตอร์เฟส และเริ่มต้น
ตรวจสอบเงื่อนไขของเวลาในการเก็บข้อมูลไปพร้อมๆ กัน สัญญาณดิจิทัล (เลขฐาน 16) จะถูก
20 คำนวณเปลี่ยนค่าตัวเลขให้เป็นเลขฐาน 10 เพื่อทำการคำนวณตามลำดับ ดังนี้

1. นำค่าเลขฐาน 10 ที่ได้ไปคำนวณเปลี่ยนให้เป็นค่าของแรงดันไฟฟ้า
2. ทำการจัดเก็บค่าของแรงดันไฟฟ้าของข้อมูลที่กำหนดไว้ ตามจำนวนข้อมูลใน 1 วินาที
3. นำค่าของแรงดันไฟฟ้าใน ข้อ (1) ไปคำนวณเปลี่ยนเป็นค่าความดันจริงโดยใช้สมการ 7 ที่
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับความดันจริง
- 25 4. นำค่าความดันจริงที่ได้จากการคำนวณไปแสดงผลเป็นตัวเลขบนจอภาพ
5. เมื่อเสร็จสิ้นจากการคำนวณ โปรแกรมจะตรวจสอบเงื่อนไขของเวลา ถ้าได้ตรงตามเงื่อนไข
โปรแกรมจะหยุดรับข้อมูล แต่ถ้ายังไม่เป็นไปตามเงื่อนไขโปรแกรมก็จะวนกลับไปรับข้อมูล
ใหม่ จนกว่าเงื่อนไขจะเป็นจริงจึงหยุด แล้วเริ่มต้นการกำหนดค่าใหม่ต่อไป

30 ตามรูปที่ 6 แสดงวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลและการ์ดอินเตอร์เฟส ทำ
หน้าที่หลักคือ รับสัญญาณดิจิทัลที่ถูกแปลงจากสัญญาณอนาล็อกให้เข้าไปในซีพียู ทำการ

ประมวลผล โดยวงจรได้รวมชุดแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล กับวงจรอินเทอร์เฟซเข้าด้วยกันในลักษณะของการ์ด ทำให้สามารถเชื่อมต่อกับสล็อต I/O ภายในคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้ การทำงานของวงจรสามารถอธิบายได้ ดังนี้

5 ลักษณะทั่วไปของการ์ดอินเทอร์เฟซ

- ◇ ตำแหน่ง การ์ด (Address Card) ตั้งแต่ 300H ถึง 303H
- ◇ ตำแหน่ง Port รับและส่งข้อมูล 300H Port A ของ IC 8255
- ◇ ขนาดและรูปแบบของการการรับข้อมูล แบบขนาน ขนาด 8 บิต

สายสัญญาณที่ใช้

- ◇ XD0 ถึง XD7 เป็นชุดสายข้อมูลทำหน้าที่เป็นทางผ่านข้อมูลดิจิตอลที่ถูกแปลงจากอนาล็อกแล้วเข้าไปให้ ซีพียู ประมวลผล
- ◇ XIORD เป็นสายสัญญาณที่ CPU ใช้กำหนดการอ่านข้อมูล
- ◇ XIOWR เป็นสายสัญญาณที่ CPU ใช้กำหนดการเขียนข้อมูล
- ◇ RESET เป็นสายสัญญาณการรีเซตระบบ
- ◇ XA0 ถึง XA9 เป็นชุดสายสัญญาณที่ทำหน้าที่อ้างตำแหน่งของการ์ด
- ◇ AEN (Address Enable) เป็นสายสัญญาณควบคุมการอ้างตำแหน่ง

การทำงานของวงจร

- ◇ IC (A) และ IC (B) เป็น IC เบอร์ 74LS138 ทำหน้าที่ถอดรหัสตำแหน่งของการ์ด เพื่อให้ได้สัญญาณเอกทึฟ 0 (LOW) ไปควบคุมการทำงานของ IC (C) ให้ทำงานเฉพาะตำแหน่ง 300H - 303H โดยมีสายสัญญาณเข้าที่ IC (B) ได้แก่ XA4 ,XA5 XA6 XA7 และ XA9 และที่ IC (A) ได้แก่ XA2, XA3, XA8, และ AEN จากตำแหน่งที่ 300H - 303H ในเลขฐานสองคือ 1100000000 - 1100000011 ดังนั้น เพื่อให้ได้สัญญาณออกที่ตำแหน่งขาที่ 11 ของ IC (A) เป็น 0 (LOW) และ IC (C) ทำงานที่ตำแหน่ง 300H-303H, XA8 และ XA9 จะต้องเป็น 1 (HIGH) และ XA2, XA3, XA4, XA5, XA6, XA7, AEN ต้องเป็น 0 (LOW) ตามคุณสมบัติของ IC 74LS138

- ◇ IC (C) คือ IC เบอร์ 8255 ทำหน้าที่รับสัญญาณดิจิตอลที่ถูกเปลี่ยนจากอนาล็อกเข้าไปทาง PortA คือ PA0-PA7 ผ่าน XD0-XD7 ให้ CPU ประมวลผล จะทำงานเมื่อ ขา 6 เอกทึฟ 0 (LOW) ที่ตำแหน่ง 300H-303H และ IORD เอกทึฟ 0 (LOW)

- ◇ IC (D) คือ IC เบอร์ ADC0804 ค่อร์่วมกับ ตัวต้านทาน (I) มีค่า 10 กิโลโอห์ม คาปาซิเตอร์ (F) มีค่า 150 pf, สวิตช์ (G) เป็นชุดวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิตอล โดยสัญญาณเข้าที่เป็นอนาล็อกได้จากผลของการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันไฟฟ้า จากตัวต้าน

ปรับค่าได้แบบเลื่อน (E) ค่า 10 กิโลโอห์มที่ต่อในวงจร เข้าตำแหน่งขาที่ 6 ของ IC (D) ส่วนที่สัญญาณออกเป็นสัญญาณดิจิทัลออกที่ตำแหน่งขาที่ 11 – 18 มีขนาด 8 บิต และเชื่อมต่อกับ IC (C) ที่ Port PA0-PA7 ในการเริ่มต้นการรับข้อมูลกดสวิทช์ (G)

- ◇ คาปาซิเตอร์ (H) และ(J) ค่า 0.1 μF ต่อระหว่างแรงดันไฟฟ้า 5V กับกราวด์เพื่อทำหน้าที่ป้องกันอุปกรณ์เสียหาย ในกรณีที่แรงดันไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ขณะเปิดเครื่อง

6. วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

วิธีการประดิษฐ์ที่ดีที่สุดของการประดิษฐ์นี้ เหมือนกับที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น ซึ่งเครื่องมือวัดความดันดังกล่าวนี้ใช้ได้เหมาะสมที่สุดกับเครื่องมือวัดคาปิลารรีโอมิเตอร์ของพอลิเมอร์หลอมเหลวความหนืดสูง

7. การนำการประดิษฐ์ไปใช้ประโยชน์

นอกจากจะสามารถให้ค่าการวัดความดันที่ถูกต้องแม่นยำแล้ว ข้อดีและประโยชน์ของเครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงในการประดิษฐ์นี้ มีมากมาย ดังต่อไปนี้

- ◇ สามารถใช้วัดในระบบที่มีอุณหภูมิสูงได้ โดยไม่ต้องมีการติดตั้งชุดปรับหรือชดเชยค่าความต้านทานที่อาจจะเปลี่ยนแปลงอันเป็นผลมาจากอุณหภูมิ ทั้งนี้เนื่องจาก มีการติดตั้งระบบจนวนความร้อนภายในเครื่องมือวัด
- ◇ สามารถปรับย่านและความละเอียดของการวัดค่าความดันที่ต้องการจะวัดได้ง่ายในเครื่องมือวัดชุดเดียวกัน โดยการเปลี่ยนชนิดและขนาดของสปริงและทำการสอบเทียบกับเครื่องมือวัดความดันมาตรฐานทั่วไป หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่ง ค่าความดันสูงสุดที่ต้องการจะวัดสามารถปรับได้ โดยถูกกำหนดด้วยค่าความสามารถในการแปรรูปของสปริงชนิดต่าง ๆ สปริงสามารถรับแรงหรือความดันที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสปีของสปริง ได้แก่ สีส้ม, สีเหลือง, สีน้ำเงิน, สีแดง, สีเขียว และสีน้ำตาล เรียงลำดับจากช่วงแรงหรือความดันต่ำไปยังช่วงแรงหรือความดันสูง
- ◇ การจัดสร้าง (ผลิต) และการใช้งานของเครื่องมือวัดค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดที่ใช้กันอย่างเดียวกันในปัจจุบัน
- ◇ งบประมาณในการผลิตเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งจะมีผลให้ราคาของเครื่องมือวัดลดต่ำลงด้วย ในกรณีที่มีการผลิตเพื่อการค้า งบประมาณที่ใช้ในการจัดสร้างเครื่องมือวัดที่มีขนาดที่บรรยายในสิทธิบัตรฉบับนี้ ประมาณ 3,000 บาท

- ◇ ลักษณะของเครื่องมือวัดความดันที่ประดิษฐ์นี้ มีชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ออกแบบให้แยกออกจากกันอย่างอิสระ และให้สามารถต่อประกอบหรือถอดปลดชิ้นส่วนแต่ละชิ้นได้ง่าย หากมีชิ้นส่วนใดชำรุดเสียหาย ก็เพียงแก้ไขหรือทดแทนชิ้นส่วนดังกล่าว เครื่องมือวัดก็สามารถใช้งานได้ตามปกติ
- ◇ ชิ้นส่วน และอุปกรณ์ทดแทนต่าง ๆ สามารถหาซื้อและจัดสร้างได้ภายในประเทศ และมีราคาถูก
- ◇ เป็นการส่งเสริมให้สามารถผลิตเครื่องมือวัดความดัน เพื่อการใช้งานและเพื่อการค้าได้เองภายในประเทศ
- ◇ เครื่องมือวัดความดันที่ประดิษฐ์นี้สามารถทำได้หลายขนาดต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่องคาปิลารี่รีโอมิเตอร์
- ◇ มีความแข็งแรงทนมากกว่าเครื่องมือวัดความดันชนิดอื่น ๆ ที่ใช้งานในลักษณะเดียวกัน (คาปิลารี่รีโอมิเตอร์) เช่น เปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดความดันแบบไดอะแฟรมสเตรนเกจ (Strain-Gauge Diaphragm Transducers)

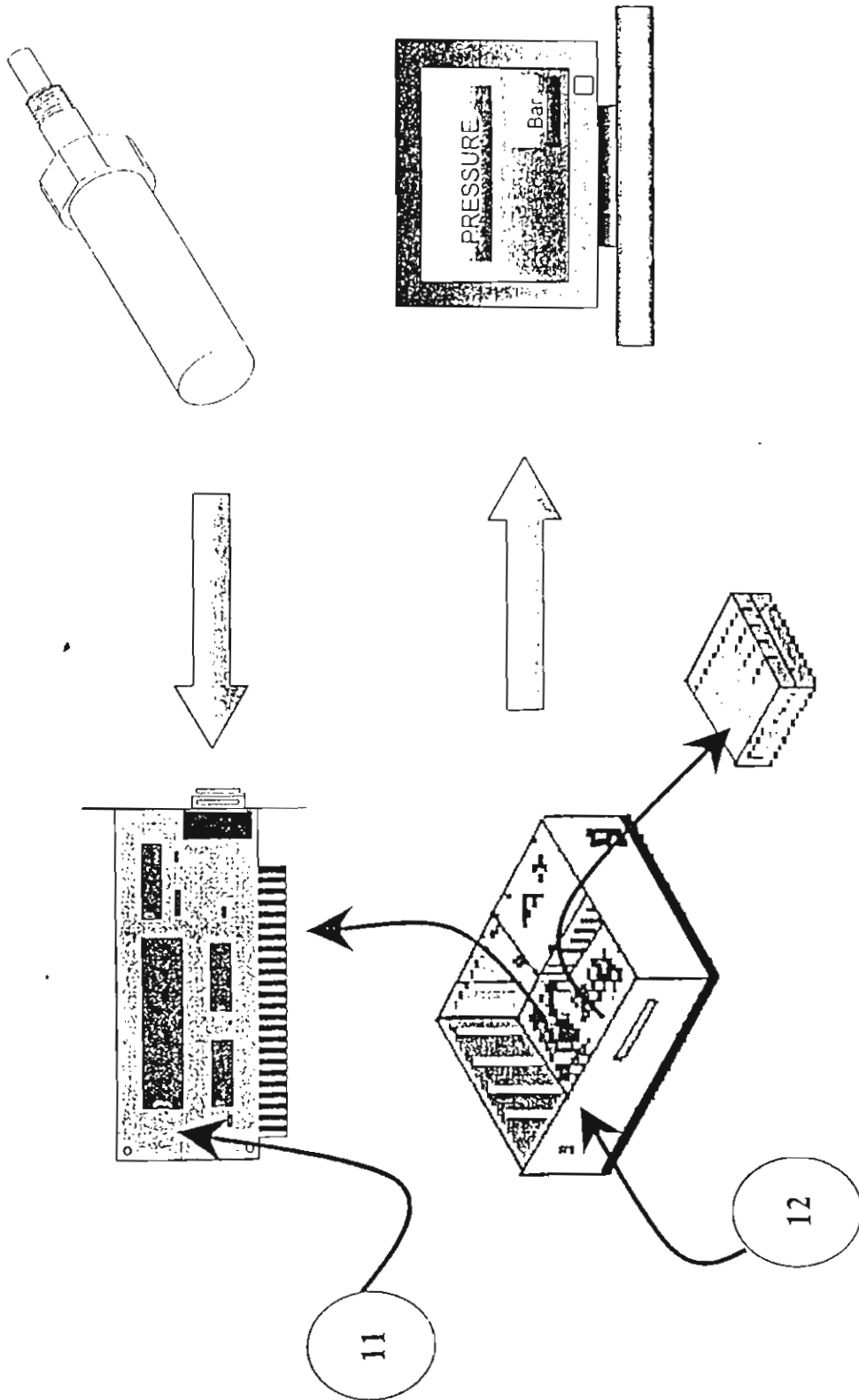
บทสรุปการประดิษฐ์

เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงที่ใช้ในเครื่องคาพิลลารีโอมิเตอร์ของพอลิเมอร์หลอมเหลว มี
ส่วนประกอบ ดังนี้ กระบอกประคองเข็มวัดความดันและสปริง เข็มวัดความดัน แหวนยางทนความ
5 ร้อน สลัก สปริงสี่เหลี่ยม ฝาปิด แผ่นฉนวนกันความร้อน ฉากยึดตัวด้านทาน ตัวด้านทานปรับค่าได้
แบบเลื่อน ฝาครอบตัวด้านทาน ชุดวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล การ์ดอินเตอร์
เฟส และ ชุดการเก็บข้อมูลและแสดงผล

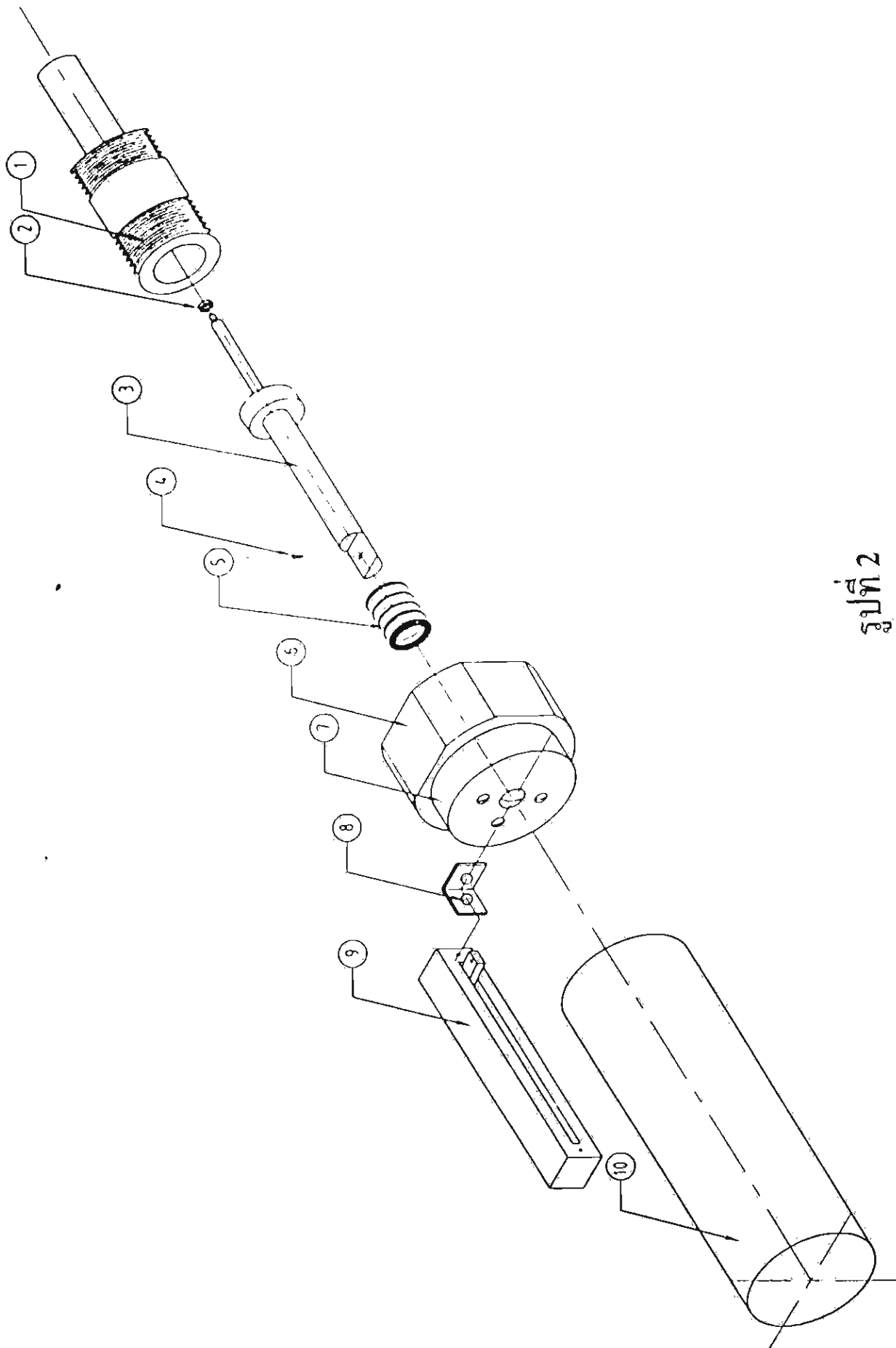
เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงในงานประดิษฐ์นี้ อาศัยหลักการตรวจวัดแรงดันไฟฟ้า โดยผ่าน
10 ตัวด้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน ซึ่งอาศัยระบบทางกลที่มีส่วนประกอบต่าง ๆ ตามที่กล่าวไว้ข้าง
ต้น หลักการทำงานของเครื่องมือวัดนี้ คือ เมื่อมีความดันในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่อง
คาพิลลารีโอมิเตอร์เกิดขึ้น พอลิเมอร์หลอมเหลวที่อยู่ในห้องหลอมเหลวทำหน้าที่ส่งผ่านความดัน
ไปยังเข็มวัดความดันทำให้เข็มวัดความดันเคลื่อนที่ โดยมีแหวนยางทนความร้อนสวมอยู่ส่วนปลาย
ของเข็มวัดซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการรั่วไหล (Leakage) ของพอลิเมอร์ การเคลื่อนที่ของเข็มวัดความ
15 ดันนี้จะถูกด้านทานโดยสปริงที่สวมอยู่รอบก้านของเข็มวัดความดัน ส่วนท้ายของเข็มวัดความดัน
จะต่อเข้ากับตัวความต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อนโดยใช้สลักเป็นตัวยึด การเคลื่อนที่ของเข็มวัด
ความดันและสปริงจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของแถบเลื่อนในตัวด้านทาน และทำให้เกิดการ
เปลี่ยนแปลงความต้านทาน การเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจะถูกแปลงเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่
แปรผันไปตามความดันที่เกิดขึ้น เครื่องมือวัดความดันที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้ถูกสอบเทียบโดยใช้เครื่องมือ
20 วัดแรงดันมาตรฐาน สำหรับการเก็บข้อมูลของการวัด ทำโดยการใช้เครื่องเก็บข้อมูลแบบความเร็ว
สูง และทำการประมวลผลและแสดงผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะแสดงผลของการวัดในรูปของ
แรงดันไฟฟ้า และค่าความดันจริง

ข้ออธิสทธิ

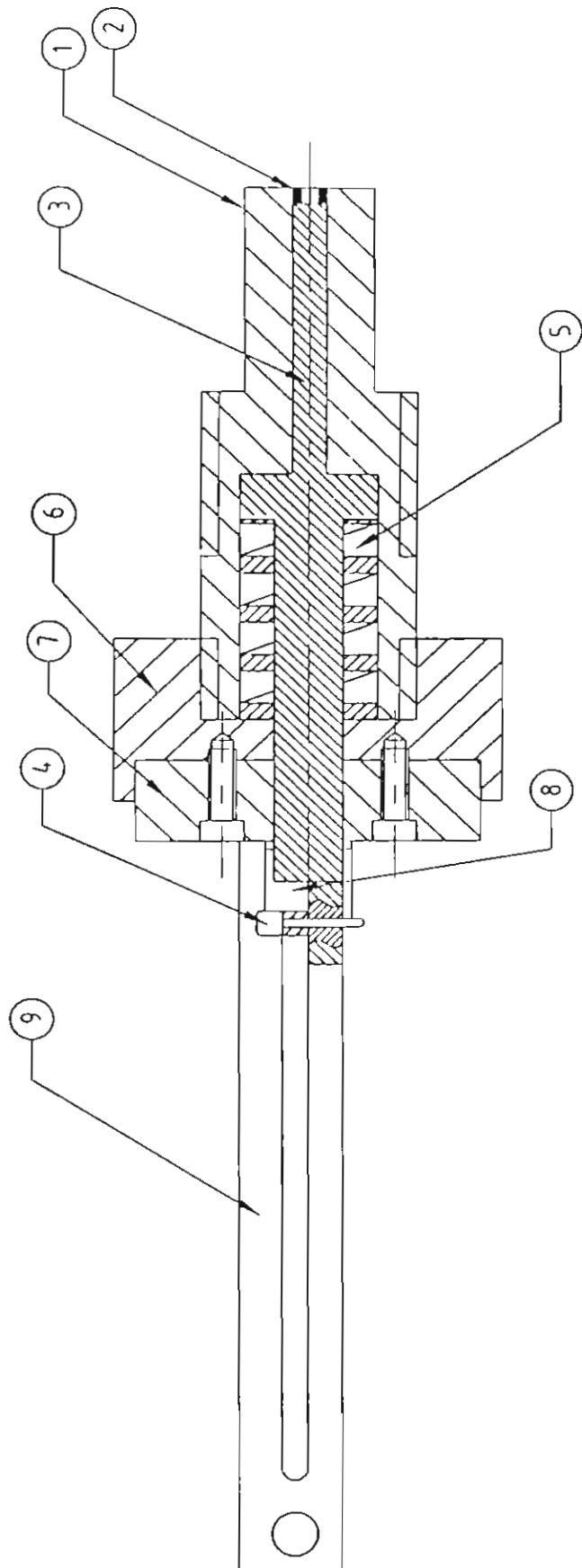
1. เครื่องมือวัดความดันแบบเข็มสปริงสำหรับวัดความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องค
ปีลารี รีโอมิเตอร์ โดยใช้หลักการส่งผ่านแรงจากพอลิเมอร์หลอมเหลว ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่
ของเข็มวัดความดันและสปริง เป็นผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของตัวต้านทานปรับค่าได้แบบเลื่อน
ทำให้แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนไป ตามระยะการเคลื่อนที่แถบเลื่อนในตัวต้านทาน หลังจากนั้น นำ
ไปสอบเทียบเพื่อแสดงผลเป็นค่าความดันจริง
2. ระบบการวัดที่ระบุในข้ออธิสทธิ ข้อ1 วัดความดันที่เกิดขึ้นของพอลิเมอร์หลอมเหลวชนิดความ
หนืดสูง ในเครื่องคปีลารีรีโอมิเตอร์
3. ระบบการวัดที่ระบุในข้ออธิสทธิ ข้อ1 โดยใช้เข็มวัดความดันที่มีแหวนยางทนความร้อนสูงเพื่อ
ป้องกันการรั่วซึมของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะวัดความดัน
4. ระบบการวัดที่ระบุในข้ออธิสทธิ ข้อ1 ใช้สปริงเป็นชิ้นส่วนในการต้านทานการเคลื่อนที่อัน
เนื่องจากแรงที่มากกระทำบริเวณปลายของเข็มวัดความดัน
5. ระบบการวัดที่ระบุในข้ออธิสทธิ ข้อ1 ซึ่งการแสดงค่าความดันโดยใช้การประมวลผลจากแรง
ดันไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ที่สามารถเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง
6. ระบบการวัดที่ระบุในข้ออธิสทธิ ข้อ1 โดยใช้แผ่นฉนวนกันความร้อนที่ทำจากเบอร์กาไรท์
ระหว่างห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคปีลารีรีโอมิเตอร์กับตัวต้านทาน



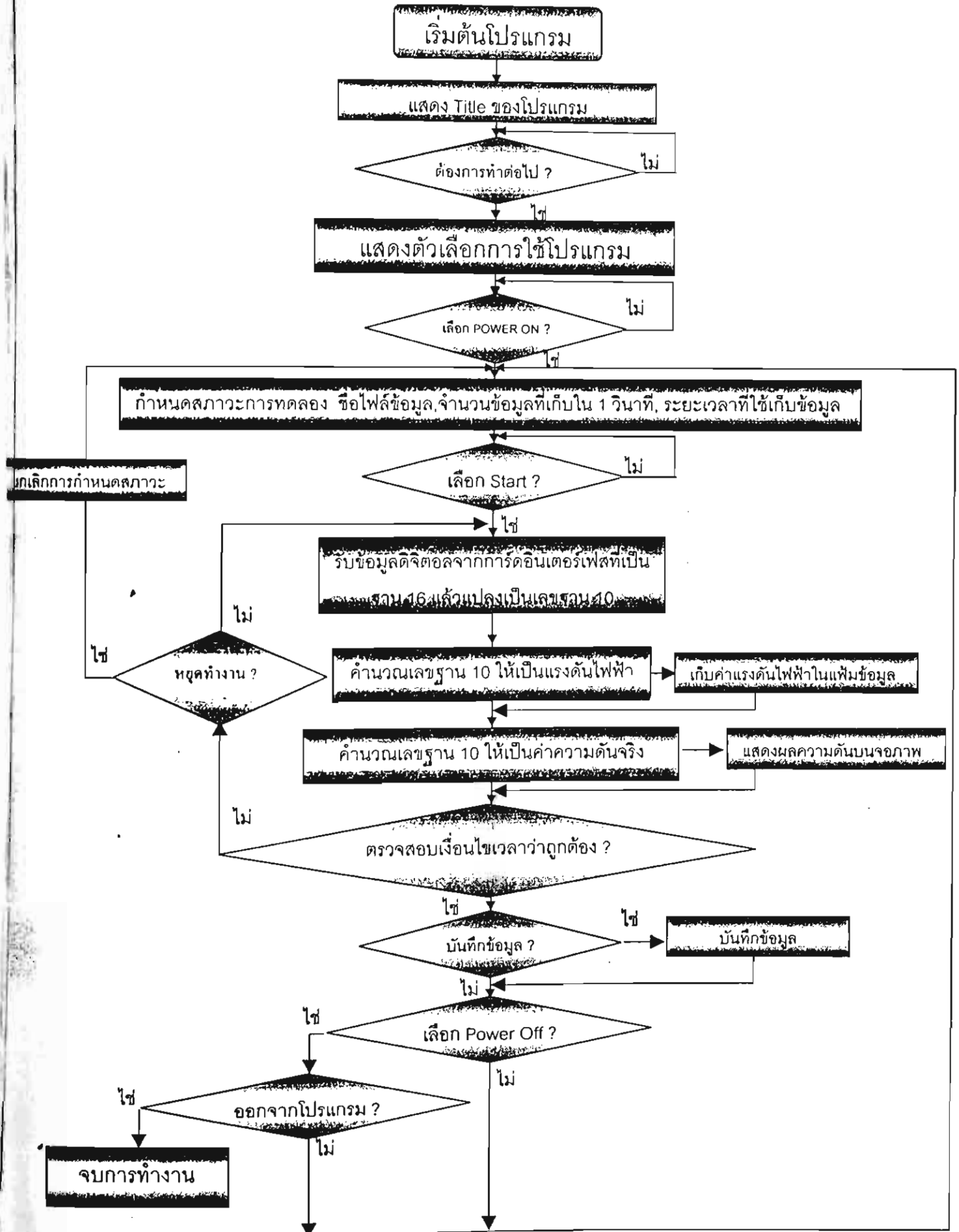
รูปที่ 1

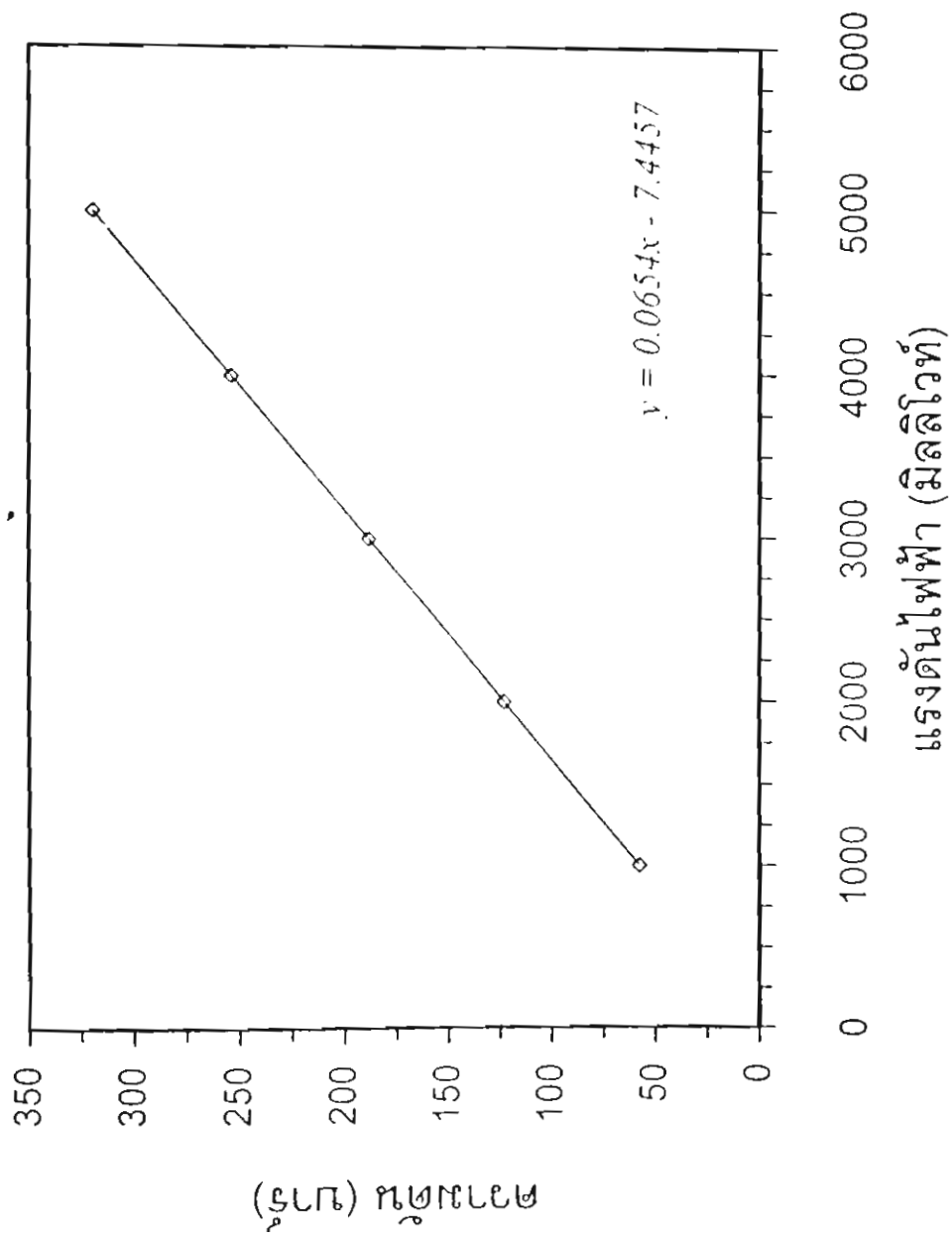


รูปที่ 2

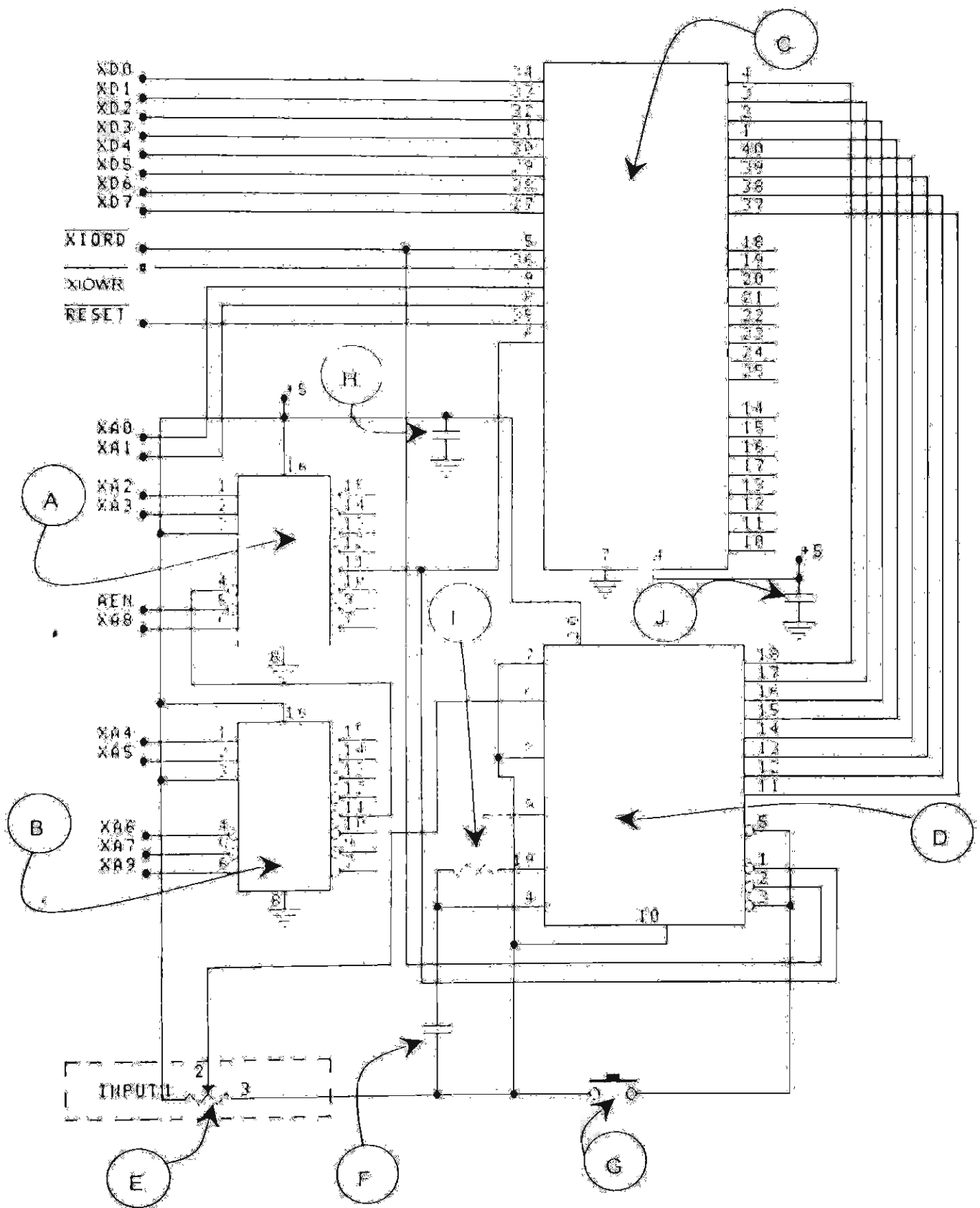


รูปที่ 3



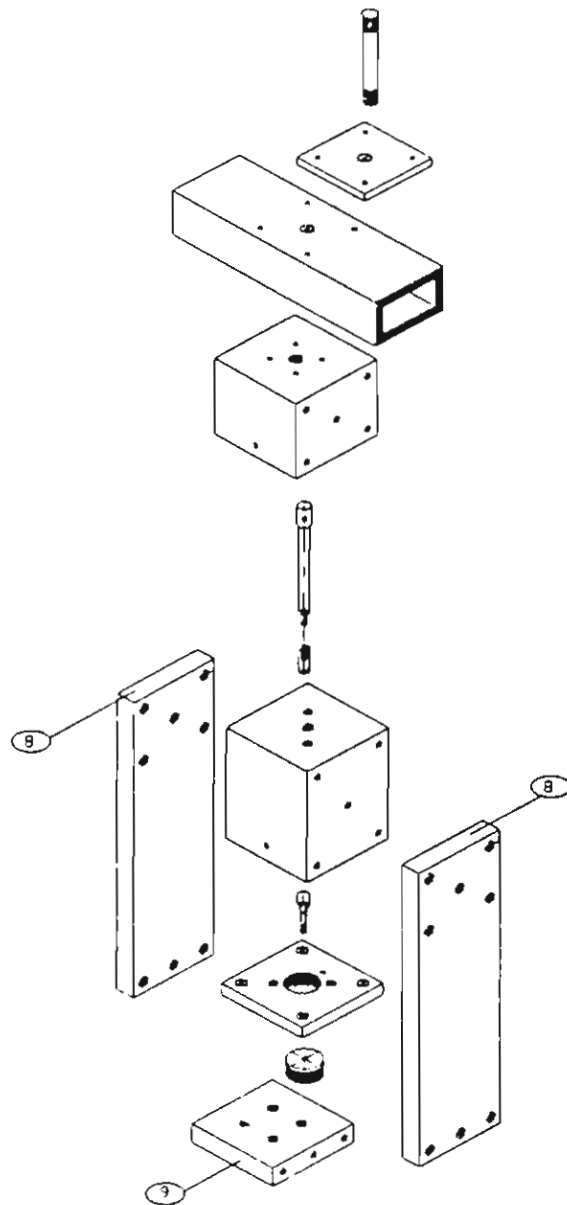
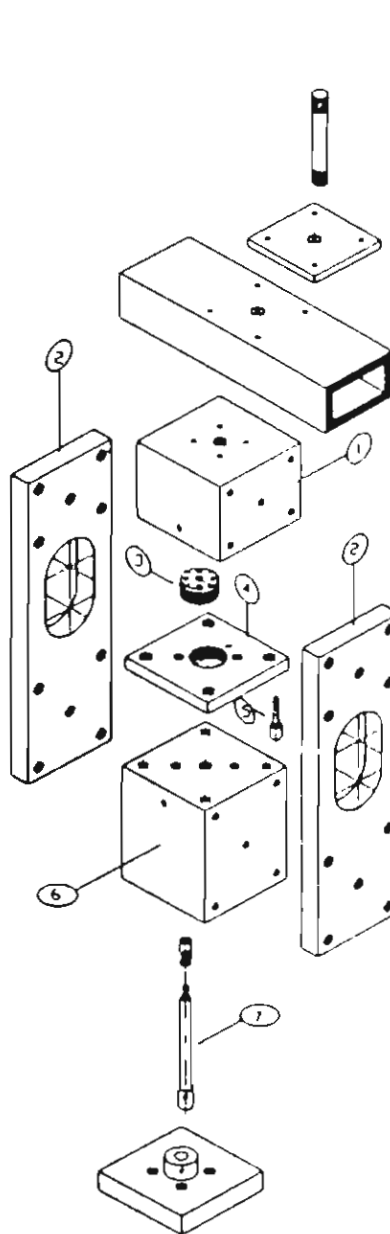


รูปที่ 5



รูปที่ 6

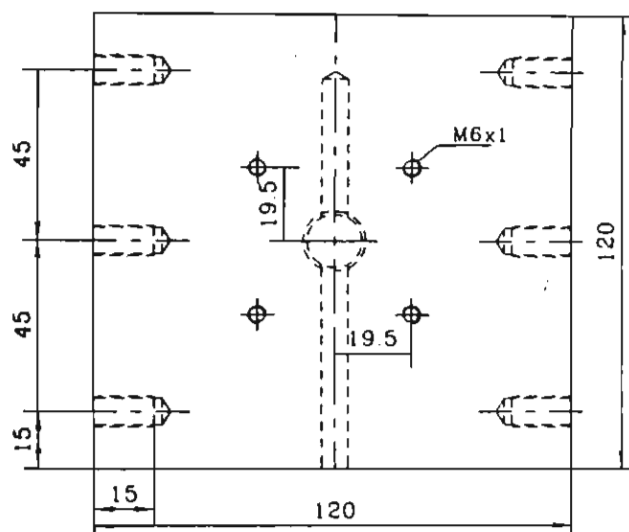
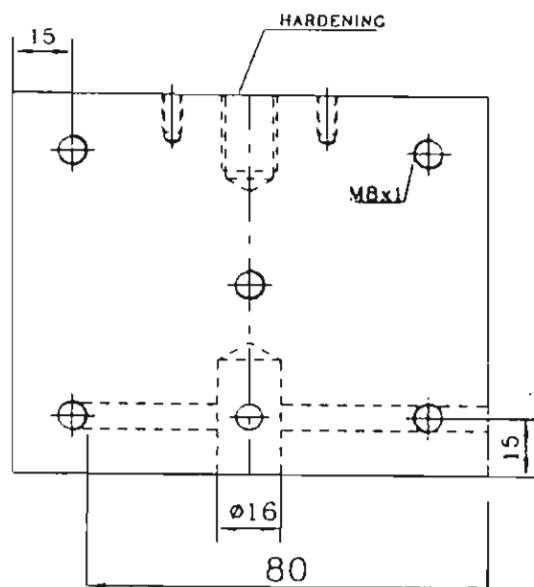
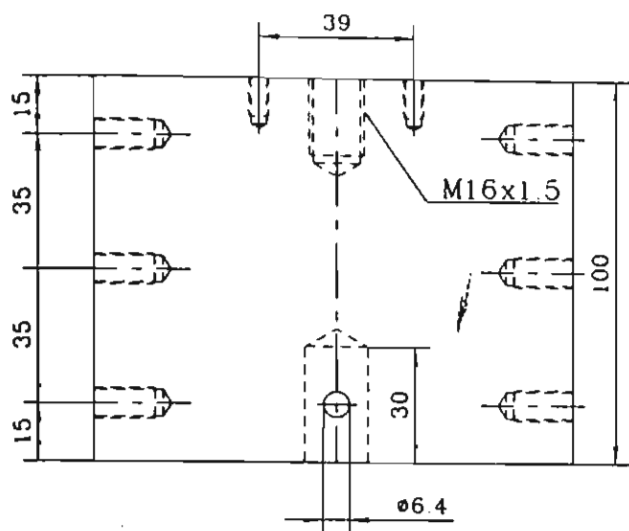
แบบเครื่องคอปิลาร์รีโอมิเตอร์แบบใหม่เชิงประยุกต์



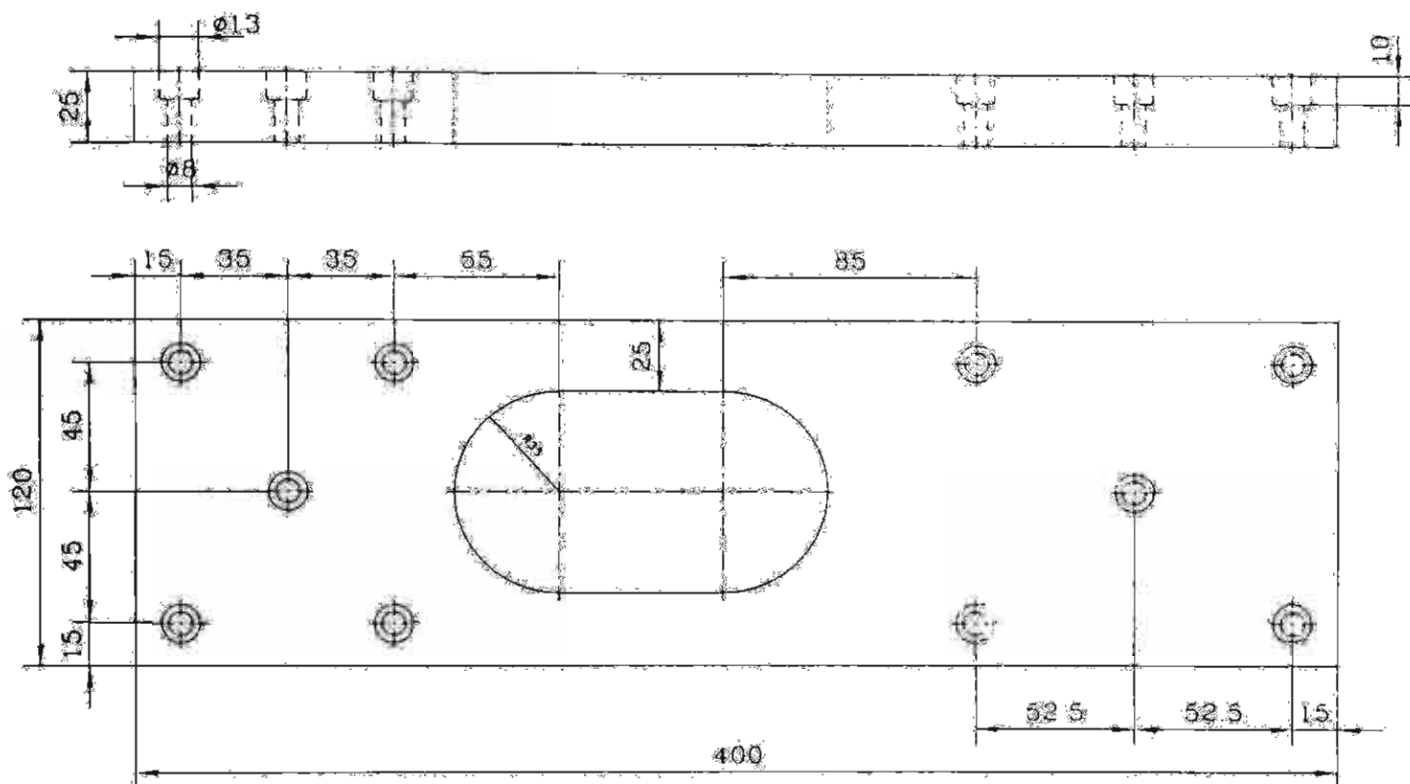
NO.	NAME OF PARTS			MATERIAL	PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140				SCALE	
				MATERIAL	
				NAME OF WORK	
				ASSEMBLY	
DRAWN BY:			DATE	NAME	
N.INTAWONG		DWN.			
N.SOMBATSOMPOP		CHK.			
		APP.			
		STD.			
MODIFICATION		NAME	DATE	ORIGINAL	
				FILE NAME	OF PAGE
				IN EXCHANGE FOR	
				PART NO.	PAGE NO.

10	SPARE PART	ST37	4
9	BOTTOM PLATE	ST37	1
8	SIDE PLATE(2)	ST37	2
7	PISTON	ST37,F-CU	1
6	BARREL	SKD61	1
5	DIE	ST37	1
4	BARREL PLATE	ST37	1
3	CAP	ST37	1
2	SIDE PLATE(1)	ST37	2
1	GAUGE BLOCK	ST37	1
NO.	NAME OF PARTS	MATERIAL	PIECES

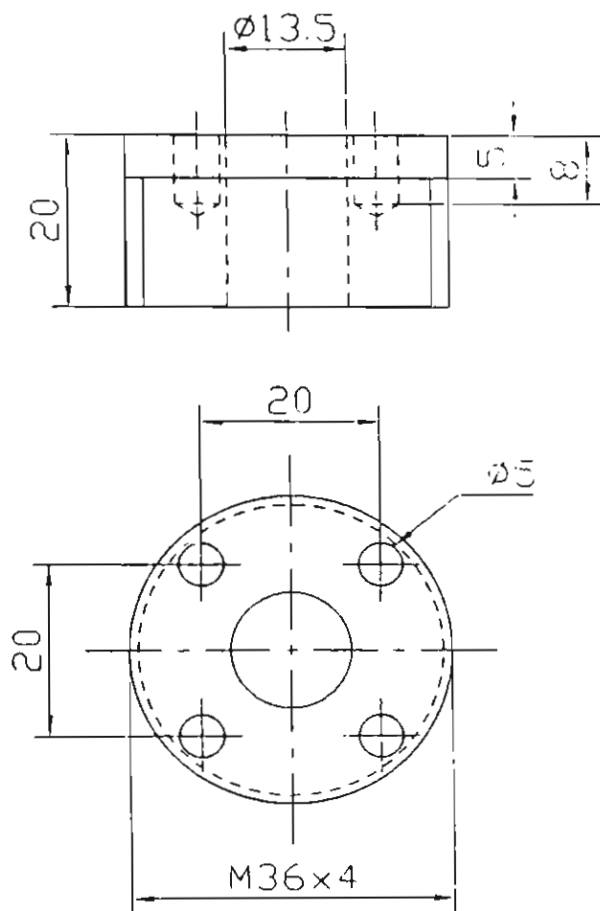
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140				SCALE	
				MATERIAL	
				NAME OF WORK	
DRAWN BY:		DATE	NAME	MATERIAL	
N. INTAWONG		DWN.			
N. SOMBATSOMPOP		CHK.		PART NO.	
		APP.		PAGE NO.	
		STD.		FILE NAME	OF PAGE
MODIFICATION	NAME	DATE	ORIGINAL	IN EXCHANGE FOR	



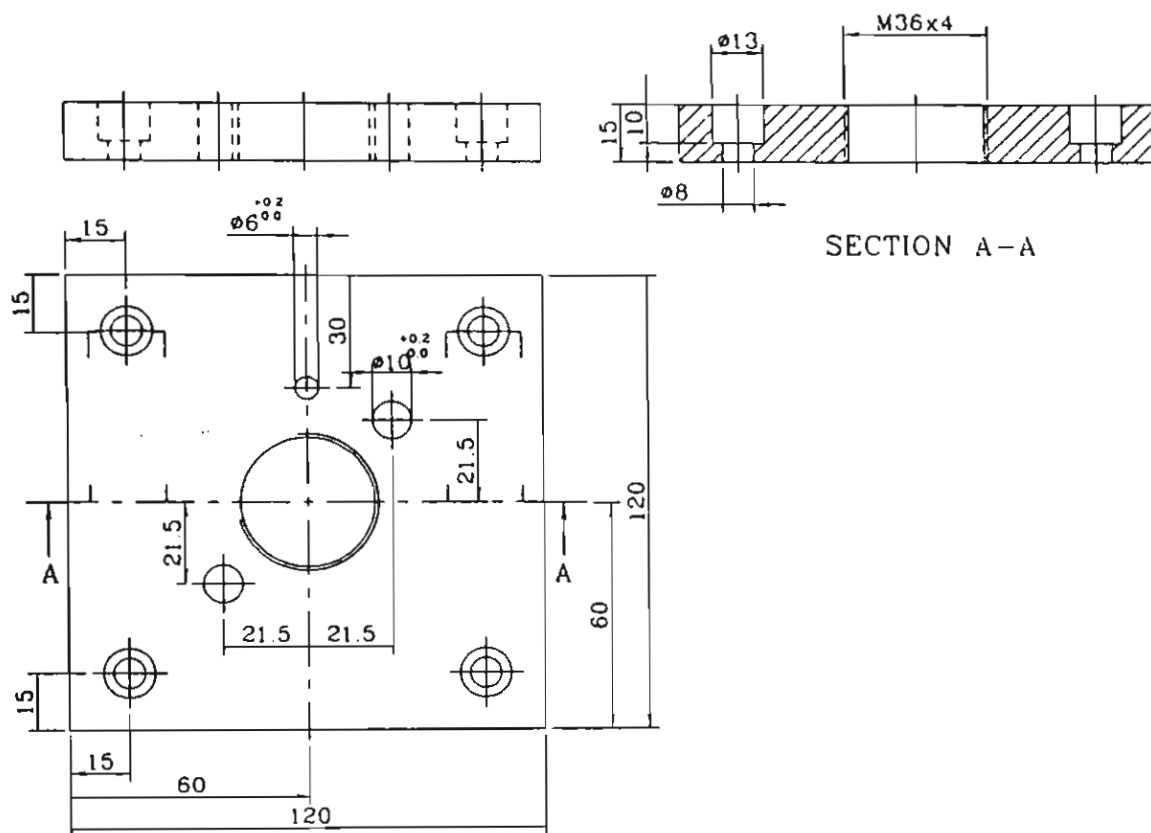
NO.	NAME OF PARTS		MATERIAL		PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140					SCALE
					MATERIAL ST37
					NAME OF WORK
DRAWN BY:					GIDE BLOCK
N.INTAWONG		DWN.	DATE	NAME	
N.SOMBATSOMPOP		CHK.			
		APP.			
		STD.			
MODIFICATION	NAME	DATE	ORIGINAL		IN EXCHANGE FOR
PART NO. 1					PAGE NO
FILE NAME					OF PAGE



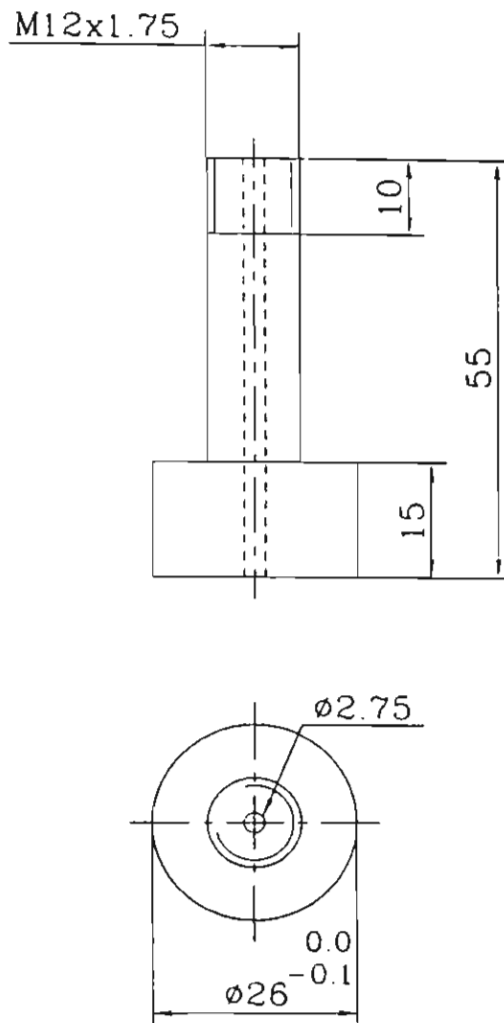
NO.	NAME OF PARTS		MATERIAL	PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATTBURANA BANGKOK 10140			SCALE	
			MATERIAL ST37	
			NAME OF WORK	
			SIDE PLATE (2)	
DRAWN BY		DATE	NAME	
N. INTAWONG		DWN		
N. SOMBATSOMPOP		CHK		
		APP		
		STD		
MODIFICATION	NAME	DATE	ORIGINAL	
			IN EXCHANGE FOR	
			PART NO. 2	PAGE NO.
			FILE NAME	OF PAGE



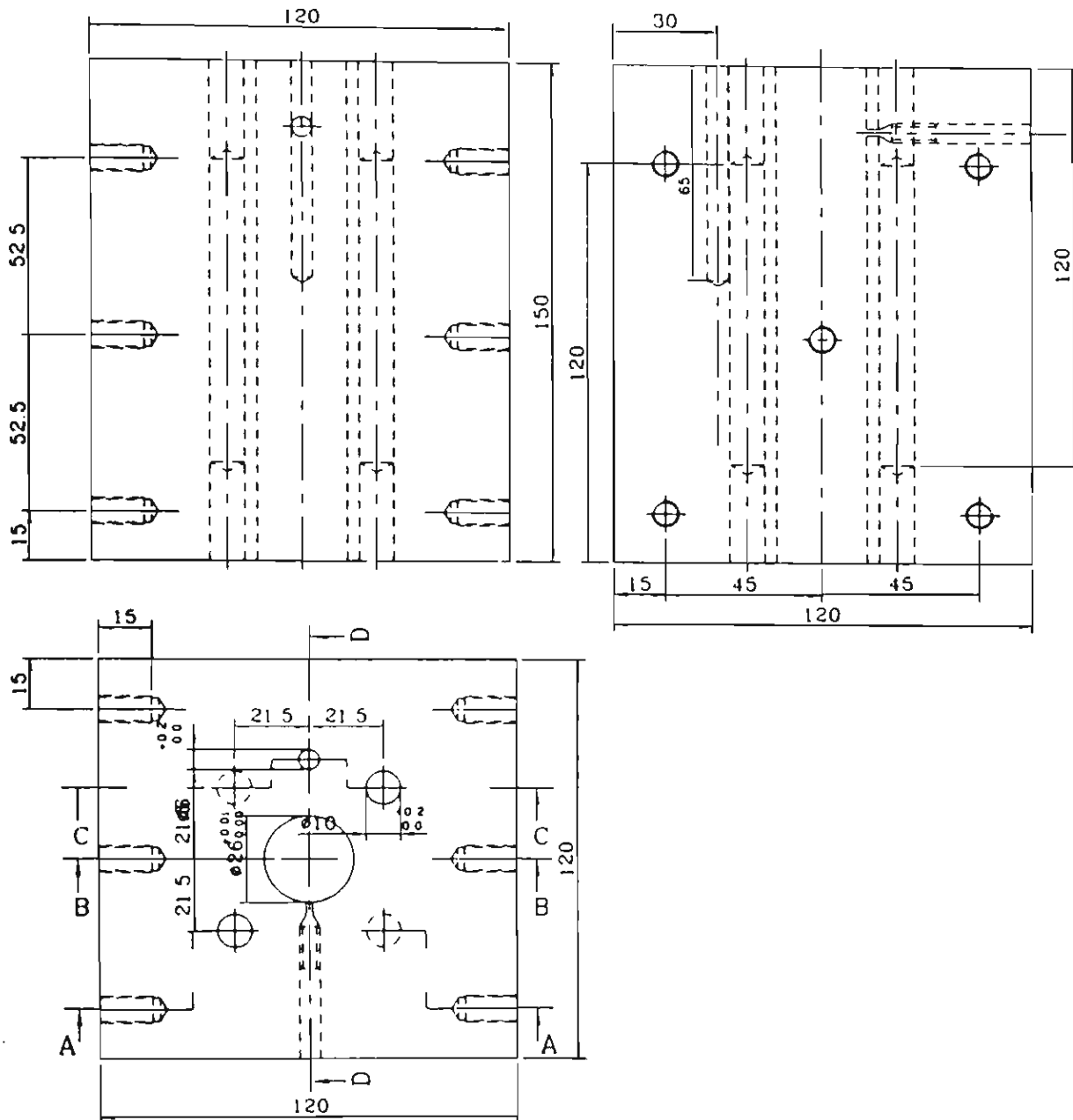
NO.	NAME OF PARTS			MATERIAL	PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140				SCALE MATERIAL ST37	
DRAWN BY: N.INTAWONG N.SOMBATSOMPOP				NAME OF WORK CAP	
DATE NAME				PART NO. 3	
APP. STD.				FILE NAME OF PAGE	
MODIFICATION NAME DATE				ORIGINAL IN EXCHANGE FOR	



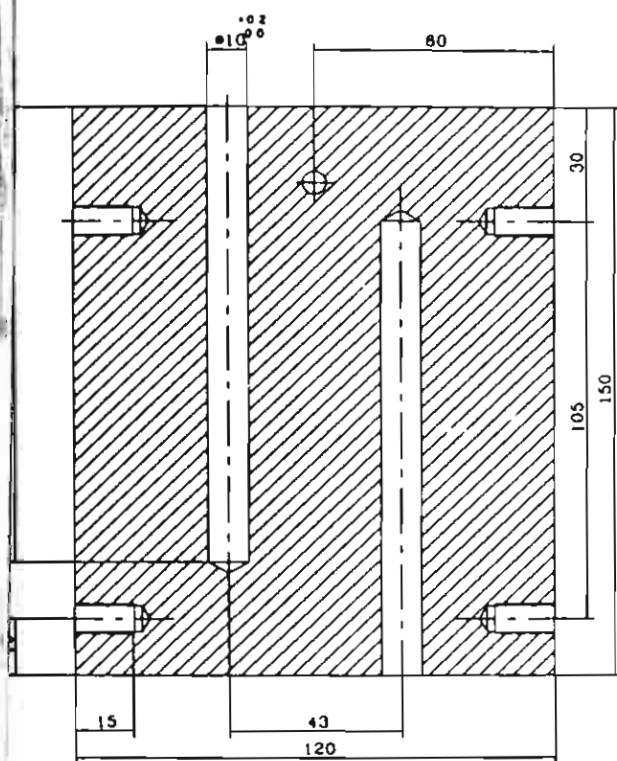
NO.	NAME OF PARTS			MATERIAL	PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140				SCALE	
				MATERIAL ST37	
				NAME OF WORK	
				BARREL PLATE	
DRAWN BY:		DATE	NAME	PART NO. 4	
N.INTAWONG		DWN.		PAGE NO	
N.SOMBATSOMPOP		CHK.		FILE NAME	
		APP.		OF PAGE	
		STD.		IN EXCHANGE FOR	
MODIFICATION	NAME	DATE	ORIGINAL		



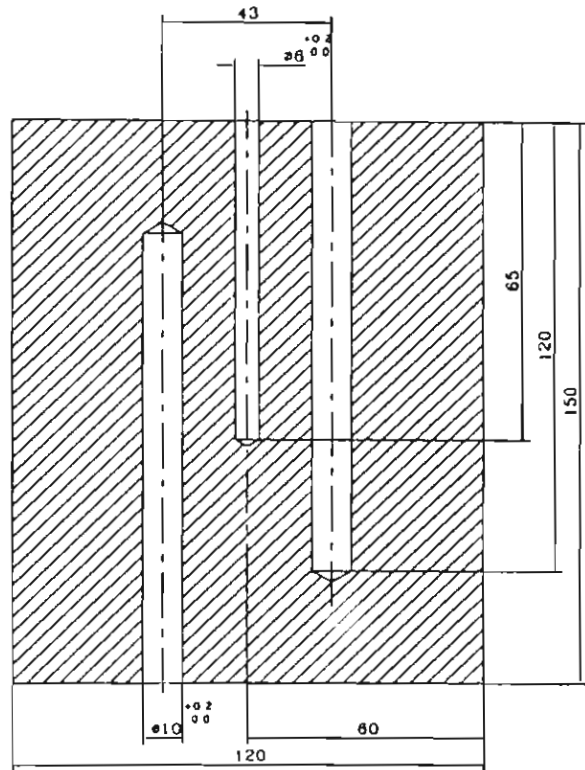
NO.	NAME OF PARTS				MATERIAL	PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140					SCALE MATERIAL ST37	
					NAME OF WORK	
DRAWN BY:			DATE	NAME	DIE	
N.INTAWONG			DWN.		PART NO. 5	
N.SOMBATSOMPOP			CHK.		PAGE NO.	
			APP.		OF PAGE	
			STD.		FILE NAME	
MODIFICATION			NAME	DATE	IN EXCHANGE FOR	
ORIGINAL						



NO.	NAME OF PARTS		MATERIAL		PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140			SCALE		
			MATERIAL SKD61		
			NAME OF WORK		
			BARREL		
DRAWN BY:		DATE	NAME		
N.INTAWONG		DWN.			
N.SOMBATSOMPOP		CHK.			
		APP.			
		STD.			
MODIFICATION	NAME	DATE	ORIGINAL		
			PART NO. 6		PAGE NO
			FILE NAME		OF PAGE
			IN EXCHANGE FOR		

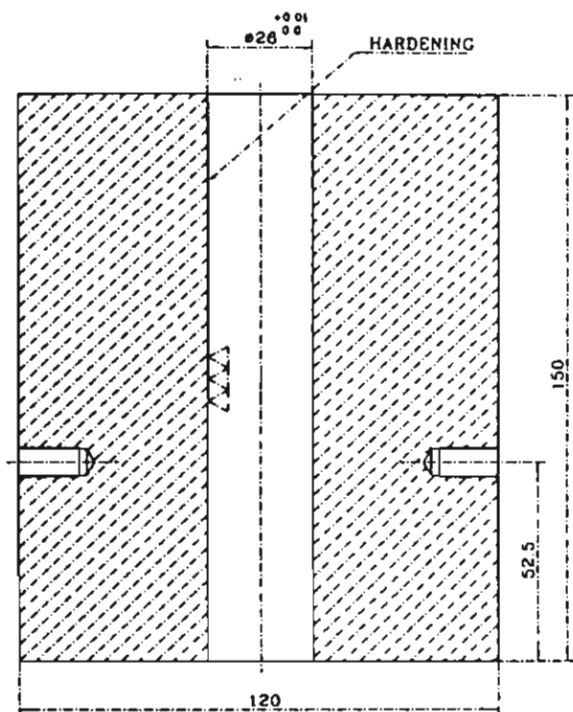


SECTION A-A

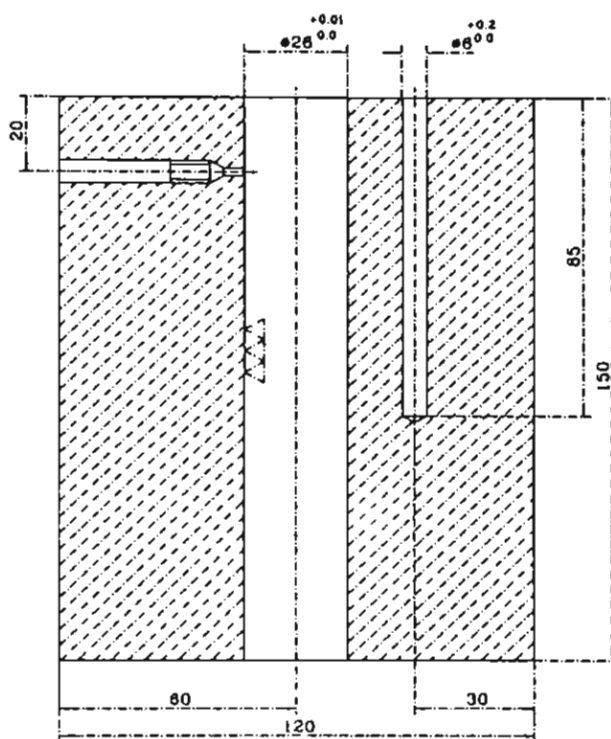


SECTION C-C

NO.	NAME OF PARTS			MATERIAL	PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140				SCALE	
				MATERIAL SKD61	
				NAME OF WORK	
				BARREL	
DRAWN BY:		DATE	NAME	PART NO.	
N.INTAWONG		DWN.		6 (SECTION A-A , C-C)	
N. SOMBATSOMPOP		CHK.		PAGE NO	
		APP.		OF PAGE	
		STD.		FILE NAME	
MODIFICATION		NAME	DATE	IN EXCHANGE FOR	
		ORIGINAL			

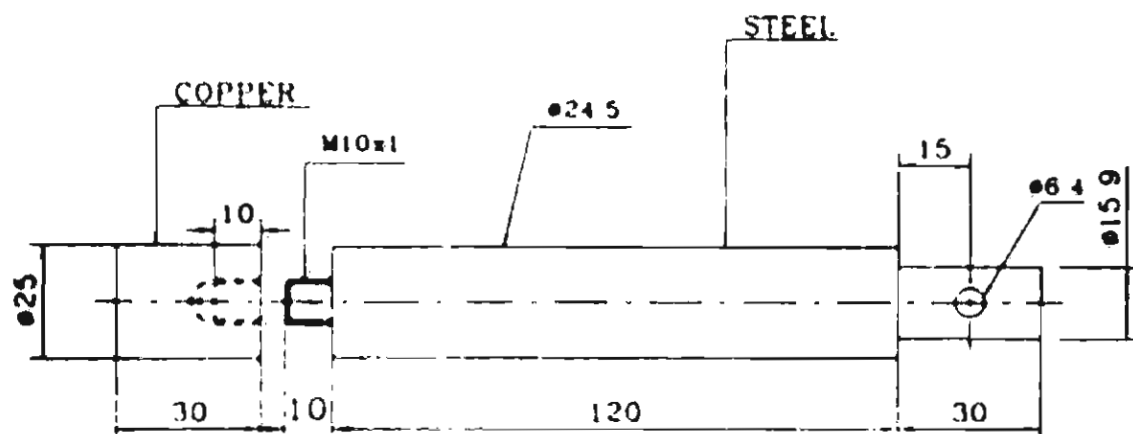


SECTION B-B

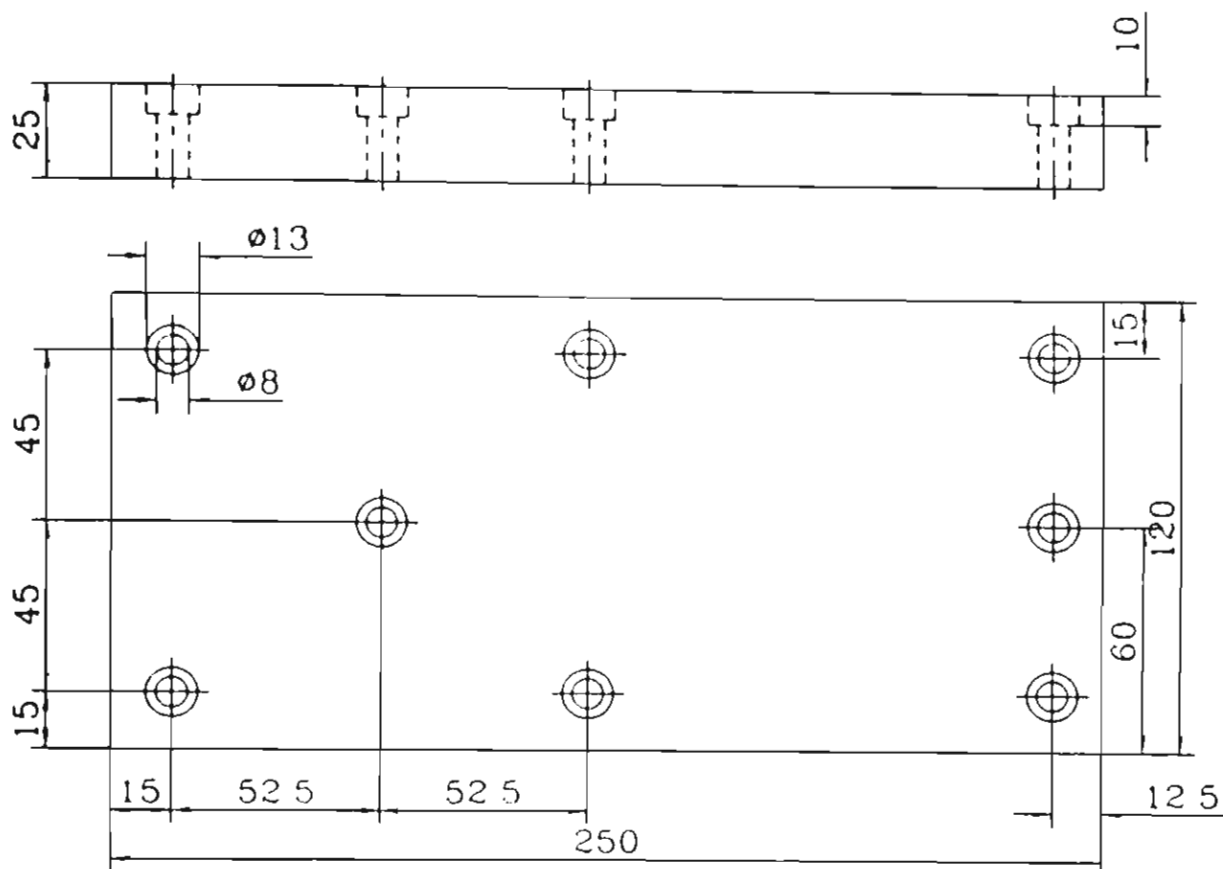


SECTION D-D

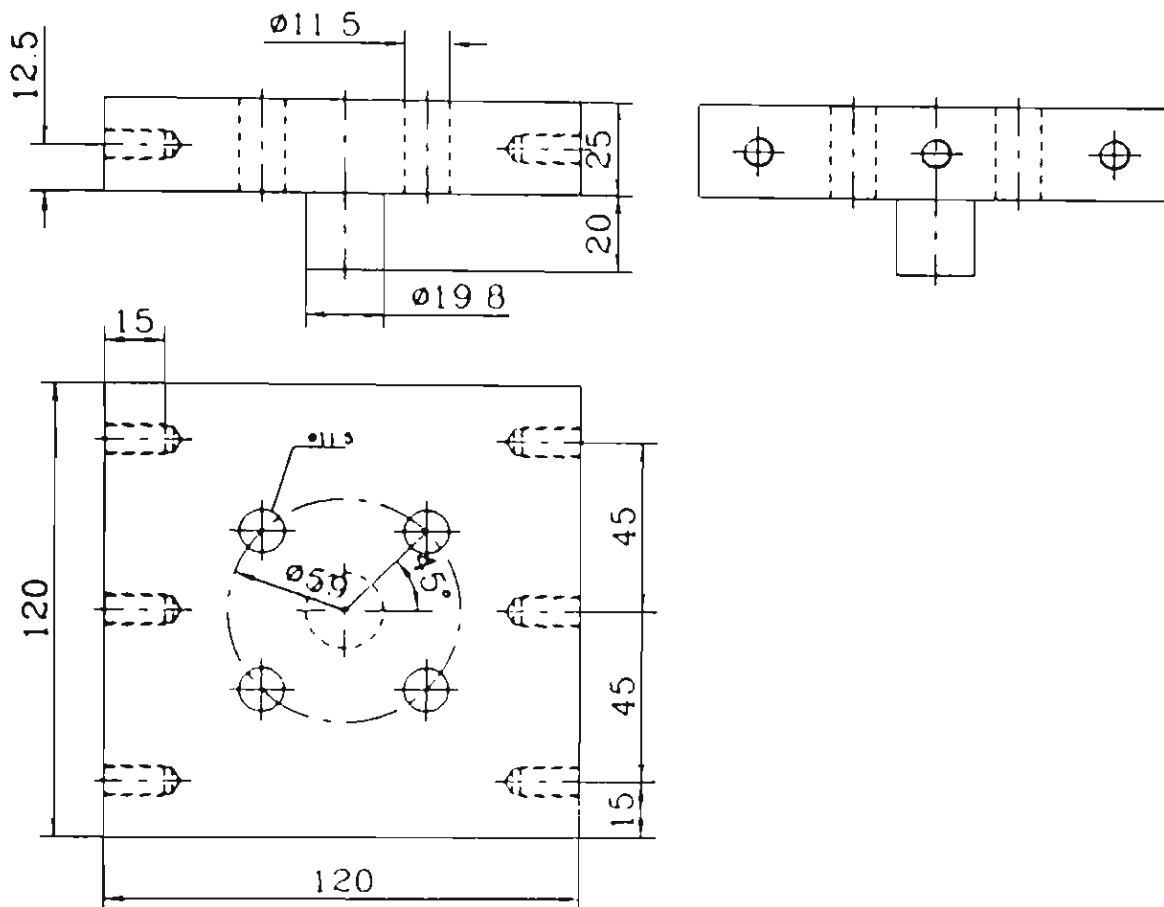
NO.	NAME OF PARTS		MATERIAL		PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140			SCALE		
			MATERIAL SKD61		
			NAME OF WORK		
			BARREL		
DRAWN BY:		DATE	NAME		
N.INTAWONG		DWN.			
N. SOMBATSOMPOP		CHK.			
		APP.			
		STD.			
MODIFICATION	NAME	DATE	ORIGINAL		
			IN EXCHANGE FOR		
			PART NO. 6 (SECTION B-B . D-D)		PAGE NO
			FILE NAME		OF PAGE



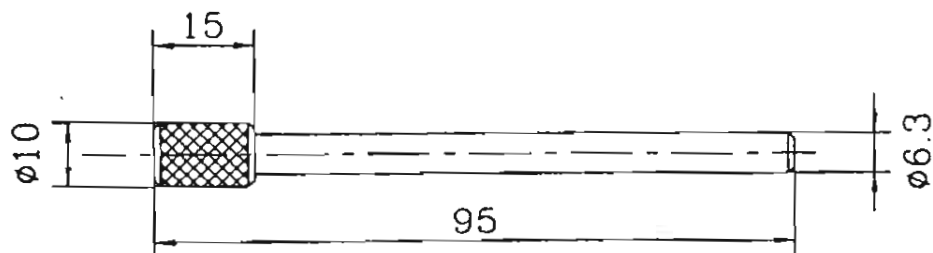
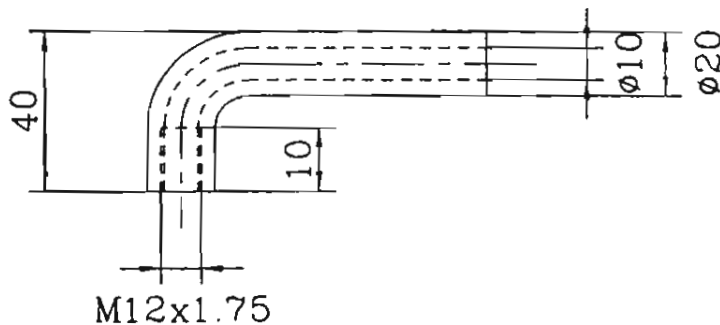
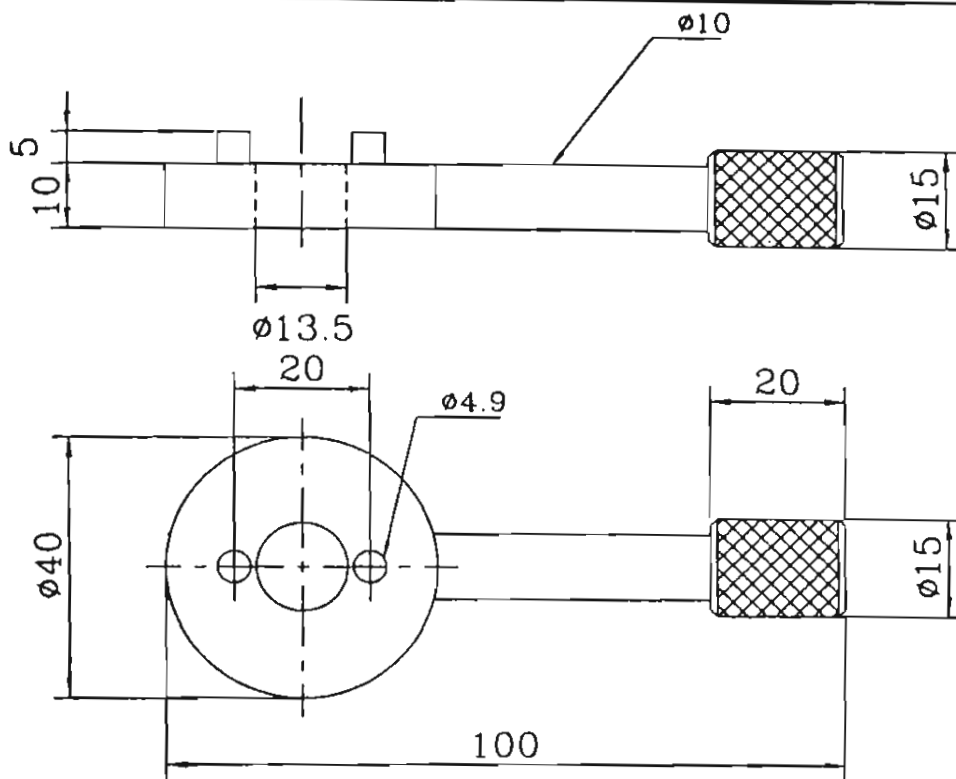
NO	NAME OF PARTS		MATERIAL	PIECES
KING MONCKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140			SCALE	
			MATERIAL ST37 F-CU	
			NAME OF WORK	
DRAWN BY			PISTON	
N. INTAWONG				
N. SOMBATSOMPOP				
APP				
STD.				
MODIFICATION			PART NO. 7	
NAME			PAGE NO	
DATE			OF PAGE	
ORIGINAL			IN EXCHANGE FOR	



NO.	NAME OF PARTS		MATERIAL		PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140			SCALE		
			MATERIAL ST37		
			NAME OF WORK		
DRAWN BY:			SIDE PLATE (2)		
N. INTAWONG			PART NO. 8		
N. SOMBATSOMPOP			PAGE NO		
			FILE NAME		
			OF PAGE		
MODIFICATION			IN EXCHANGE FOR		
NAME					
DATE					
ORIGINAL					



NO.	NAME OF PARTS				MATERIAL		PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140					SCALE		
					MATERIAL ST37		
					NAME OF WORK		
DRAWN BY:					BOTTOM PLATE		
N.INTAWONG		DWN.	DATE	NAME			
N. SOMBATSOMPOP		CHK.					
		APP.					
		STD.		PART NO. 9		PAGE NO	
				FILE NAME		OF PAGE	
MODIFICATION	NAME	DATE	ORIGINAL		IN EXCHANGE FOR		



NO.	NAME OF PARTS		MATERIAL		PIECES
KING MONGKUT'S UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THONBURI PRACHAUTHIT Rd. SUKSAWAT 48 RATBURANA BANGKOK 10140			SCALE		
			MATERIAL ST37		
			NAME OF WORK		
DRAWN BY:			SPARE PART		
N.INTAWONG		DWN.	DATE		NAME
N.SOMBATSOMPOP		CHK.			
		APP.			
		STD.			
MODIFICATION		NAME	DATE	ORIGINAL	IN EXCHANGE FOR
				PART NO.	PAGE NO
				FILE NAME	OF PAGE

สูง มีการประมวลผลและแสดงผลโดยใช้คอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงผลของการวัดสามารถถูกแสดงในรูปของแรงดันไฟฟ้า และค่าความดันจริง

ง. ความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

- 5 จดมุ่งหมายของการประดิษฐ์นี้ คือ การออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือวัดความดันแบบใหม่ ที่มีระบบการทำงานที่ไม่ซับซ้อน และสามารถใช้วัดความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องวัดความหนืดคาปิลลารีโอมิเตอร์ของพอลิเมอร์หลอมเหลวขณะไหลที่อุณหภูมิสูงได้ดี ซึ่งเครื่องมือวัดความดันดังกล่าวนี้อาศัยหลักการทำงานของเครื่องวัดแรงดันไฟฟ้า โดยใช้ร่วมกับระบบกลไกของเข็มวัดความดัน
- 10 แหวนยางทนความร้อน สปริง และชุดวัดความดันทานปรับค่าได้แบบรางเลื่อน เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่นี้ มีความแข็งแรงคงทน ใช้งบประมาณในการจัดสร้างค่อนข้างน้อย และให้ประสิทธิภาพการวัดความดันสูง เนื่องจากใช้ระบบเก็บข้อมูลและประมวลผลโดยใช้เครื่องเก็บข้อมูลแบบความเร็วสูง และคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้ ด้วยระบบป้องกันนำความร้อนระหว่างเครื่องคาปิลลารีโอมิเตอร์และเครื่องมือวัดความดัน ค่าการวัดจะไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิ

15 2. สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

- วิศวกรรมการออกแบบเครื่องมือวัดในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์
- มาตรวิทยา
- วิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและประดิษฐ์เครื่องมือวัด

20 3. ภูมิหลังของศิลปวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

- ในกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ หมายถึง กระบวนการแปรรูปวัสดุพอลิเมอร์เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป โดยผ่านขบวนการให้และระบายความร้อนภายใต้ความดันสูง เป็นที่ทราบกันดีในทางปฏิบัติว่า พอลิเมอร์หลอมเหลวเป็นของไหลที่สามารถอัดภายใต้ความดันได้ (Compressible Fluids) ในกระบวนการผลิตและการทดสอบคุณสมบัติของพอลิเมอร์หลอมเหลวโดยมากกระทำกัน
- 25 ภายใต้ความดันสูง จากงานวิจัยค้นคว้าทางวิทยาศาสตร์มากมาย ระบุว่า คุณสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ซึ่งบ่อยครั้งที่แสดงในรูปของค่าความหนืด ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวกำหนดความสามารถของกระบวนการผลิตที่เหมาะสม หากผู้ผลิตกำหนดสภาวะการผลิตที่เหมาะสมได้ ก็จะทำให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ดีตามไปด้วย ค่าความหนืดของพอลิเมอร์โดยมากนิยมวัดโดยใช้เครื่องมือวัดความหนืดที่เรียกว่า รีโอมิเตอร์ (Rheometers) หรือ วิสโคมิเตอร์ (Viscometers) ซึ่งมี
- 30 มากมายหลายลักษณะ แต่แบบที่นิยมใช้กับพอลิเมอร์หลอมเหลวทางวิศวกรรม คือ คาปิลลารีโอมิเตอร์ (Capillary Rheometers) ระหว่างทำการทดสอบ ความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องมือวัดนี้ ถือว่ามี

ความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะความดันที่เกิดขึ้นเป็นตัวแปรสำคัญตัวหนึ่งในการบ่งบอกถึงคุณสมบัติของพอลิเมอร์หลอมเหลวที่กำลังทดสอบ โดยปกติความดันที่เกิดขึ้นในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์ จะมีค่าระหว่าง 10-150 บาร์ ในช่วงอุณหภูมิใช้งานทั่วไปประมาณ 100-300 °C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ หลักการของเครื่องมือวัดชนิดนี้ คือ การวัดค่าความดันตก (Pressure Drop) ในระบบ ณ อัตราการไหลต่างๆ สิ่งที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของเครื่องมือวัดชนิดนี้ คือ การได้รับค่าความดันตกในระบบที่ถูกต้องแม่นยำ ดังนั้น เครื่องมือที่ใช้วัดความดันจะต้องได้มาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับสากล และให้ค่าการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ เครื่องมือวัดความดันที่นิยมใช้กันมากในเครื่องมือวัดความหนืดคาปิลารีโอมิเตอร์ของพอลิเมอร์หลอมเหลว คือ เครื่องมือวัดความดันแบบไดอะแฟรมสเตรนเกจ (Strain-Gauge Diaphragm Transducers) ทั้งนี้เพราะสามารถให้ค่าการวัดที่แม่นยำ และสามารถใช้วัดในสภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของความดันอย่างต่อเนื่อง (Dynamic Measurement) ได้ค่อนข้างดี หลักการทำงานของเครื่องวัดความดันชนิดนี้ อาศัยการวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานที่เกิดขึ้น ในวงจรความต้านทานที่เรียกว่า สเตรนเกจ (Strain Gauge) เครื่องมือวัดชนิดนี้มีข้อจำกัดอยู่ที่ว่า ไม่สามารถยอมให้สเตรนเกจสัมผัสของไหลที่กำลังวัดได้ ดังนั้น เมื่อสเตรนเกจไม่สัมผัสโดยตรงกับของไหล นั้นหมายความว่า จะต้องมียระบบทางกลที่จะสามารถส่งผ่านความดันในระบบของเหลวไปสู่สเตรนเกจ โดยทั่วไปจะใช้ระบบการส่งผ่านความดันโดยอาศัยการเสียรูปแบบยืดหยุ่น (Elastic Deformation) ของแผ่นไดอะแฟรมที่มักจะติดตั้งอยู่กับสเตรนเกจ ซึ่งแผ่นไดอะแฟรมนี้ไม่คงทนแข็งแรงมากนัก และหากเกิดการชำรุดเสียหาย นั้นก็หมายความว่าเครื่องมือวัดความดันชนิดนี้ ไม่สามารถใช้งานได้ เหตุการณ์นี้ พบบ่อยครั้ง เช่น ในกรณีที่ของไหลพอลิเมอร์เกิดการแข็งตัวในขณะที่ยังสัมผัสอยู่กับแผ่นไดอะแฟรม และถูกแยกออกอย่างไม่ระมัดระวัง นอกจากนี้ หากต้องการบันทึกสัญญาณ เครื่องมือวัดชนิดนี้อาจต้องการชุดขยายสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้รับจากเครื่องมือวัดมีค่าค่อนข้างต่ำ สำหรับในแง่ของราคาของเครื่องมือวัดชนิดนี้ โดยปกติมีราคาค่อนข้างสูง (ที่ใช้อยู่ทั่วไป มีราคาสำหรับเครื่องขนาดเล็ก ประมาณ 1,800,000 บาท) เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดชนิดอื่นๆ ในย่านการวัดเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากประสิทธิภาพและค่าความแม่นยำในการวัดที่สูง ประกอบกับการใช้เทคโนโลยีขั้นสูง และซับซ้อนในการผลิตเครื่องมือวัดดังกล่าว

โดยทั่วไป เครื่องมือวัดความดันที่ดีควรมีคุณสมบัติ ดังนี้ คือ ให้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำ ความเชื่อมั่นสูง ราคาถูก ผลิตและหาซื้อง่าย อายุการใช้งานยาวนาน คงทนแข็งแรง และไวต่อการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อยของความดัน แต่ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับความดันที่กำลังตรวจวัด (เช่น อุณหภูมิ สารเคมี หรือ/และ ปฏิกริยาทางเคมีที่เกิดขึ้น ฯลฯ) ในสภาวะปัจจุบันนี้ แสดงถึงการประดิษฐ์เครื่องมือวัดความดันแบบใหม่สำหรับการวัดความดันใน