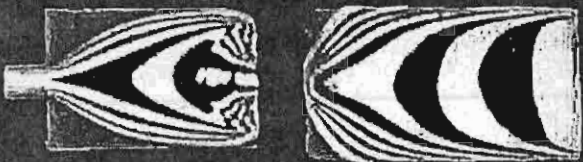




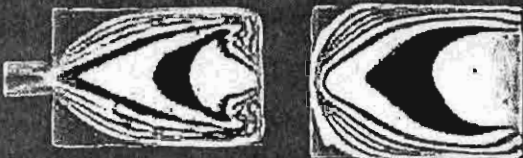
a



b



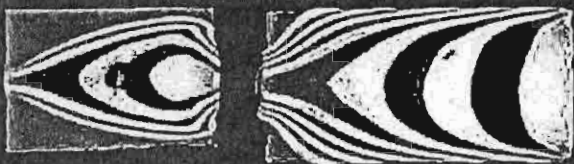
c



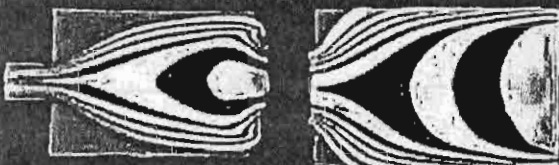
d



a



b



c



d

Die #2c

Die #2d

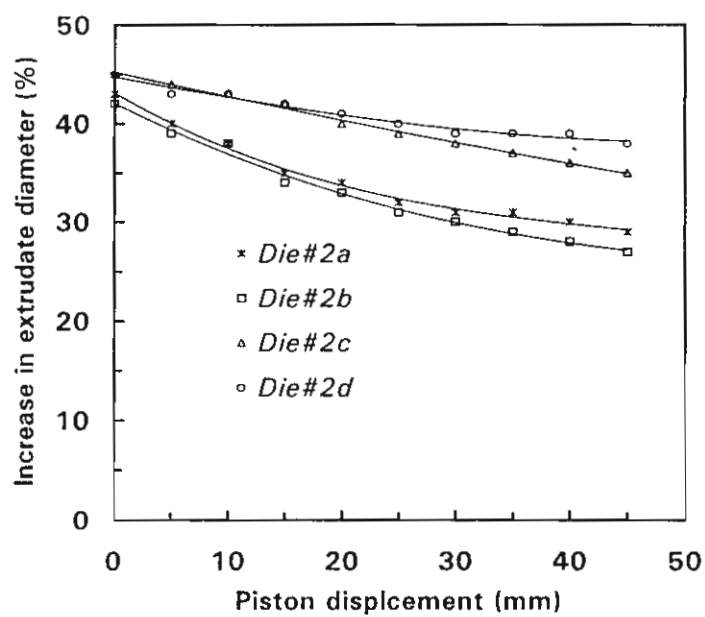


Figure 3

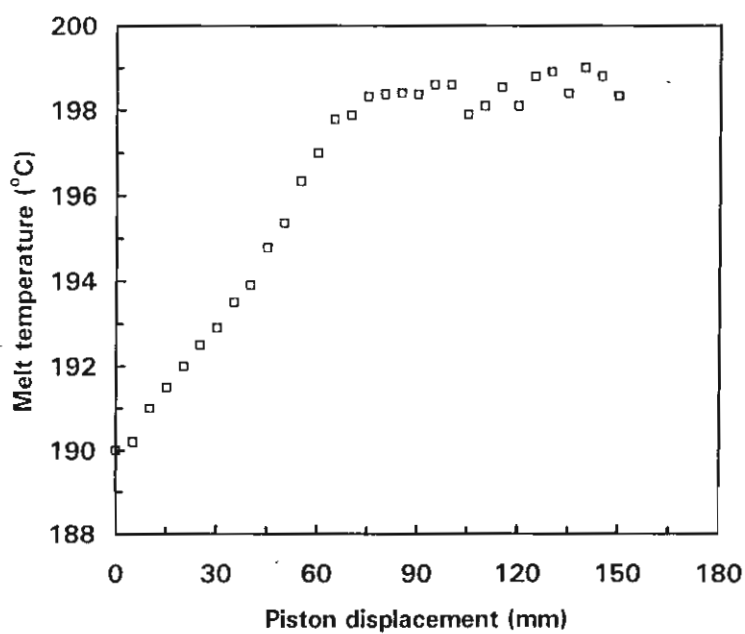


Figure 4

Sombatsompop N & Intawong N-T (2001) Flow Properties and Entrance Corrections in Polymer Melts By a Mobile Barrel Capillary Rheometer – *Polymer Testing*, 20 (1): 97-103.

Test Procedure

Flow properties and entrance corrections of polymer melts by a mobile barrel capillary rheometer

N. Sombatsompop *, N.-T. Intawong ¹

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

Received 22 November 1999; accepted 7 January 2000

Abstract

This paper investigates the flow properties and entrance corrections of a polyethylene melt in a capillary rheometer that features the possibilities of moving either the piston or the barrel, the latter mode being novel in operation. The paper mainly aims to investigate the variations in the flow properties and the entrance corrections due to the mode of operation. It is found that the flow properties and entrance corrections are dependent on the mode of operation and the die sizes used in the capillary rheometer, this being thought to be associated with the flows occurring in the capillary rheometer. © 2000 Elsevier Science Ltd. All rights reserved.

Keywords: Entrance (Bagley) corrections; Polymer melts; Capillary rheometers; Flow properties; Polymer rheology

1. Introduction

Generally, flow properties of a polymer melt are determined using a capillary rheometer. The common type of capillary rheometer consists of a heated barrel, at the bottom of which is fitted a small capillary die. In the case of a Newtonian fluid the flow curves (plots of shear stress against shear rate) observed are independent of the die system, but this is not the case for polymer melts. The flow curves of polymer melts generated with different dies, whilst being similar in shape, are not superimposable [1–3]. These problems lead to the use of some corrections to determine the die geometry-independent flow properties of a fluid, the corrections being called the entrance corrections or the Bagley corrections [4].

Experimental work [3–5] showed that the pressure at the die entrance is extremely difficult to obtain experimentally. Extrapolation of the measurable values of pressure downstream of the barrel and upstream of the die are thus carried out. Entrance corrections are applied to correct for the non-linear pressure drop at the die entrance, thus correcting the *wall shear stress* (Eq. (1)), and then giving the *true shear stress* (Eq. (2)) in a capillary die. These corrections can be determined experimentally using a series of dies of the same radius but different lengths, the details being discussed elsewhere [1].

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

$$\text{True shear stress} = \tau_{\text{true}} = \frac{RP}{2(L+NR)} \quad (2)$$

where R is the radius of the die, P is the pressure drop along the die, L is the length of the die, and N is the extension of the imaginary length of the dies.

It is accepted that the entrance corrections are of practical importance [3,5], but less so for comparative results of materials over an existing material with known flow

* Corresponding author. Tel.: +662-470-8645; +662-427-9062.

E-mail address: inarmpop@cc.kmutt.ac.th (N. Sombatsompop).

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

properties [6]. It has been found by a number of workers that such corrections are very difficult to use due to the following factors [2,3,5–8].

1. N and pressure (P) values vary with shear rate: in this case a number of experimental results are required, and result in time consumption.
2. Non-linearity of the correction curve: the relationship between pressure drop and L/R is not always linear, giving rise to errors of extrapolation and thus incorrect shear stresses.
3. Contraction ratio dependency: it has been found that the N value is dependent on the ratio of barrel to die diameters.
4. Negative N value: the N value has been found to be negative, this being a practical impossibility.
5. Method of obtaining the N value: entrance corrections are only experimentally determined, not theoretically, thus it is difficult to utilise the process for calculations.

In this work, we propose another method regarding the use of the entrance corrections of a polymer melt in a capillary rheometer. The entrance corrections are studied using a novel capillary rheometer that features the possibilities of moving either the piston or the barrel, the latter mode being novel in design operation.

2. Experimental

2.1. Experimental capillary rheometer

A novel capillary rheometer was designed and manufactured such that there is the possibility of moving either the piston or the barrel in order to investigate the flow properties of polymer melts. It is a constant shear rate rheometer. The barrel is 26 mm in diameter and 150 mm long. The temperature of the apparatus was controlled using a Eurotherm Type 018 temperature controller. A novel pressure sensor, the so-called Pin-Spring Sensor, designed and developed by Sombatsompop et al. [9], was used to monitor the pressure drop near the die entrance in the barrel. All the components were assembled and fitted into an AGS-500 D (SHIMADZU) tensile testing machine. The details of the capillary rheometer are described elsewhere [10].

2.2. Experimental procedure

The experimental procedures are commenced by 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 down the polymer. The piston is

Table 1
Die characteristics

Ref. no.	Length (10^{-3} , m)	Diameter (10^{-3} , m)	L/R ratio
1	55	2.25	49
2	55	2.75	40
3	55	3.50	31
4	55	4.75	23
5	55	8.25	13

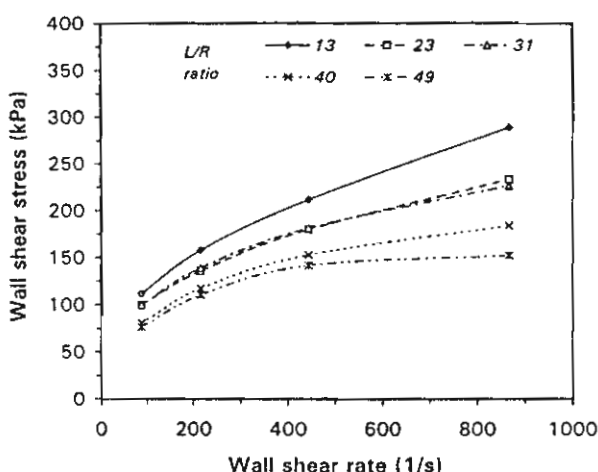


Fig. 1. Flow curves for LDPE melt at different die sizes using the moving piston system.

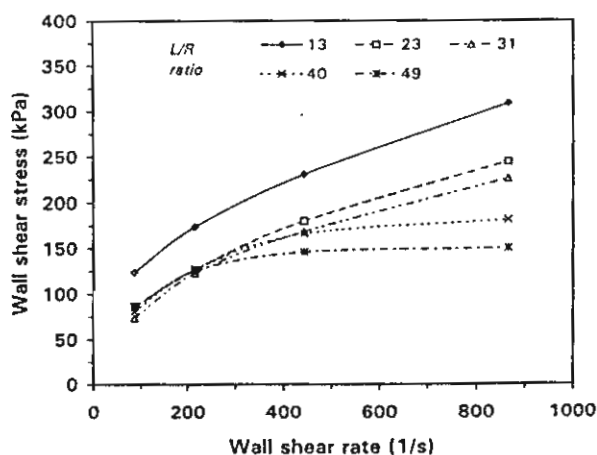


Fig. 2. Flow curves for LDPE melt at different die sizes using the moving barrel system.

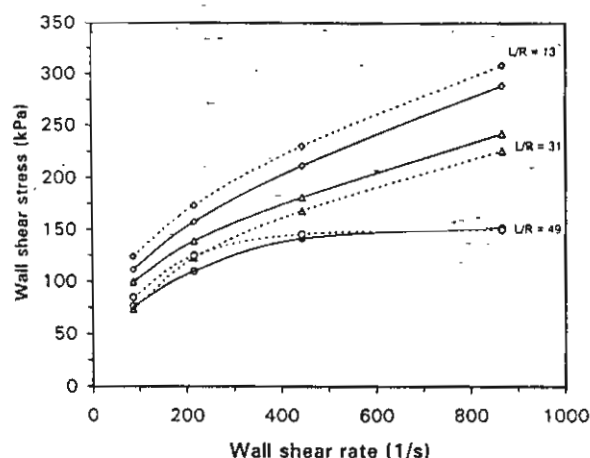


Fig. 3. Comparison of flow curves between moving piston and moving barrel systems for selected die sizes: solid line, moving piston; dashed line, moving barrel.

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 10 min in order to allow the polymer to melt and consolidate. In the case of using a moving piston, 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 using a moving barrel, the piston is rigidly mounted on the base of the tensile testing machine and the barrel and die move downwards along the piston at various speeds, thus also generating the pressure and the polymer being extruded upwards. The barrel and piston speeds are used to calculate the shear rate while the pressures generated are used for calculating the shear stress. Flow curves of the polymer melt are then constructed.

The entrance corrections were determined by using a series of dies of the same radius but different lengths, the correction results being obtained at various shear rates. The true shear stress values were obtained from the experimental data using Eq. (2). In this work, a low-density polyethylene (LDPE, Exxon Chemical Ltd, LD100BW), was used. The test temperature used was 180°C throughout the work. The dies used are listed in Table 1.

3. Results and discussion

Figs. 1 and 2 show flow curves for the LDPE melt tested with different dies using the moving piston and moving barrel systems, respectively. Generally, it is

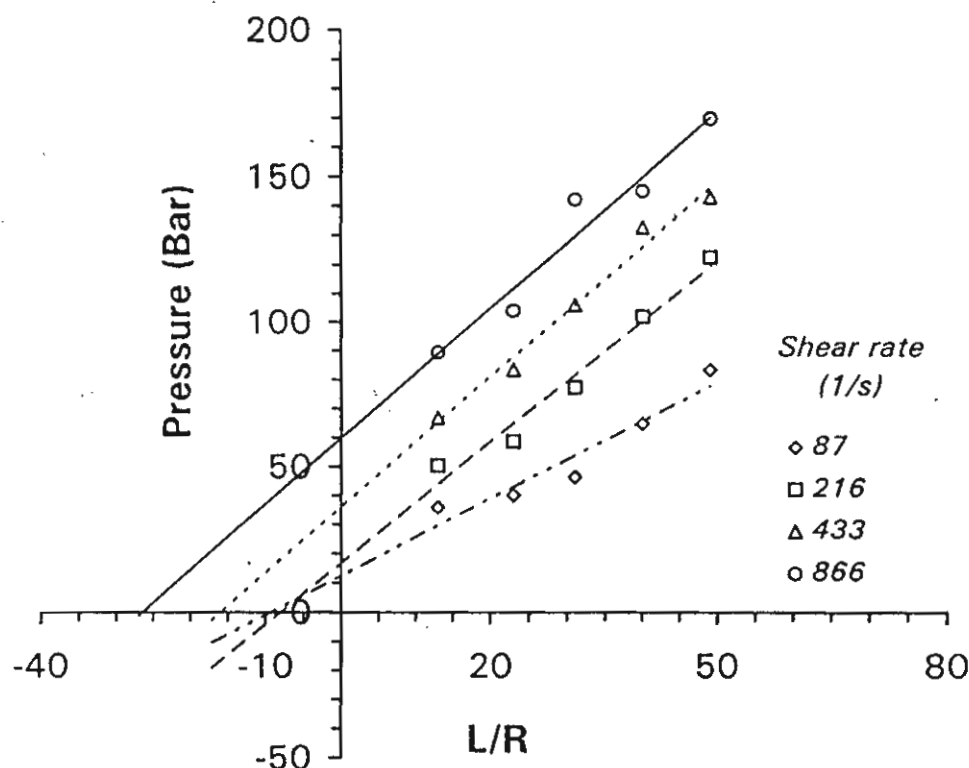


Fig. 4. Plots of pressure drop and L/R ratio for LDPE melt using the moving piston system.

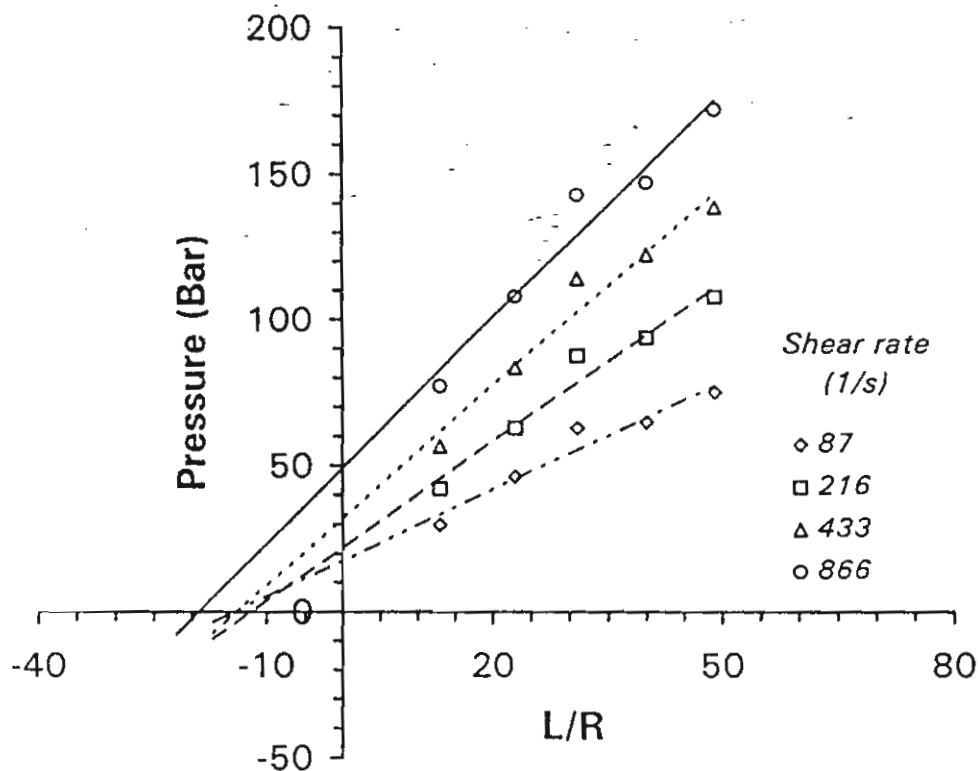


Fig. 5. Plots of pressure drop and L/R ratio for LDPE melt, using the moving barrel system.

Table 2

The N values for moving piston and barrel systems of the capillary rheometer of the LDPE melt

Shear rate (s^{-1})	Moving piston system		Moving barrel system	
	N value	Regression coefficient	N value	Regression coefficient
87	8.98	0.958	13.91	0.946
216	7.76	0.972	11.65	0.963
433	15.45	0.984	13.52	0.960
866	25.96	0.945	18.71	0.954

found that the LDPE melt exhibited a pseudoplastic non-Newtonian behaviour as one would expect. However, the flow properties seem to be dependent on the mode of operation (moving piston and moving barrel systems) and the size of dies used. Fig. 3 shows a comparison of flow curves for the LDPE melt between moving piston (solid line) and moving barrel (dashed line) systems. It can be observed that, for a given die size, the variations in the results due to the mode of operation are large, this being greater than the limit of the experimental errors ($\pm 3.5\%$). The variations in the results due to the mode of operation have been previously discussed by the authors [10].

This is the first time that the entrance corrections have

been studied using a capillary rheometer that features the possibilities of moving either the piston or the barrel. The plots of pressure drop against L/R obtained from the moving piston and the moving barrel systems of the capillary rheometer are shown in Figs. 4 and 5, respectively. From the results, the following observations should be noted.

1. The general trends of the curves for both modes are very similar, the pressure drop increasing with increasing die length for a given shear rate.
2. For a given shear rate and L/R ratio, the pressure drop obtained from the moving piston system is observed

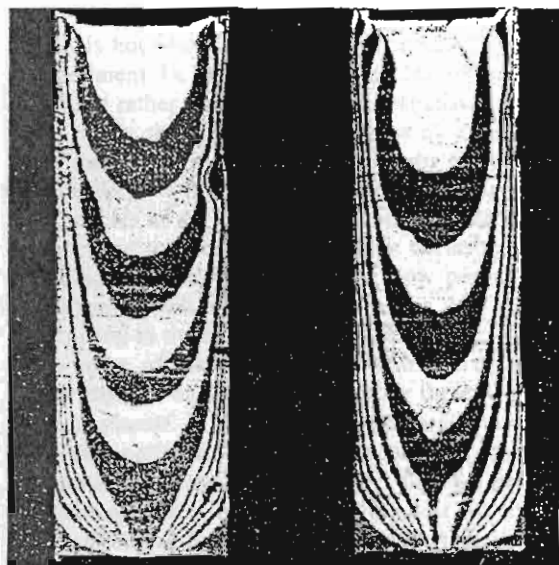


Fig. 6. Flow patterns of natural rubber in the barrel with moving piston (left) and moving barrel (right) systems.

to be greater than that obtained from the moving barrel system.

3. The relationship between pressure drop and L/R is linear. The extrapolations were carried out using a linear least square best line fit in order to obtain the N values.
4. N and pressure values are found to vary with shear rate.
5. The values of N are positive.

The N values obtained by extrapolations of Figs. 1 and 2 are listed in Table 2. Ideally, the results of the entrance

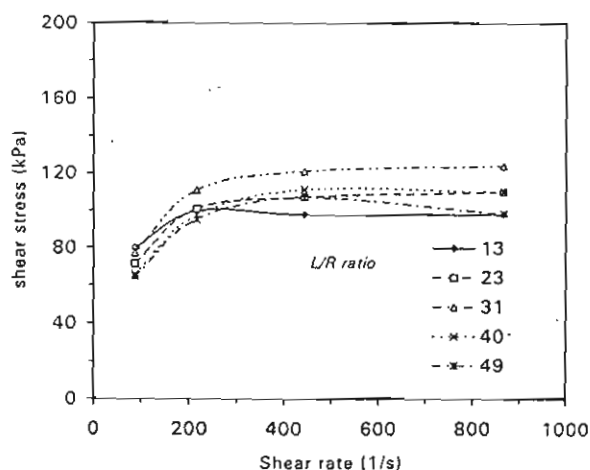


Fig. 7. The corrected flow curves for LDPE melt for different dies using the moving piston system.

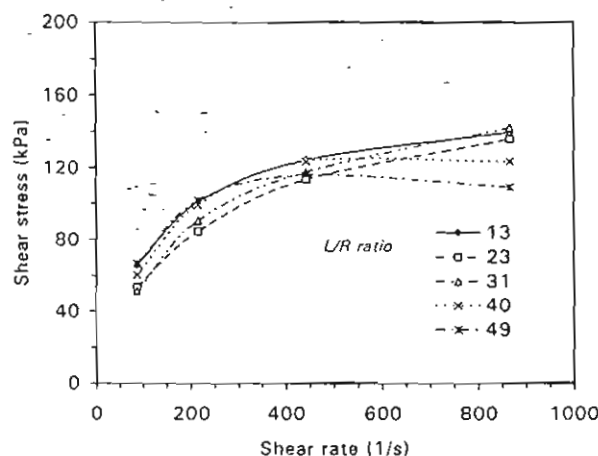


Fig. 8. The corrected flow curves for LDPE melt for different dies using the moving barrel system.

corrections (N values) obtained from the moving barrel capillary rheometer would be expected to be similar (or virtually the same) to those for the moving piston system, since the calculations of the entrance corrections (from Eq. (2)) are independent of mode of rheometer operation. However, this is not the case, the results being considerably different. From Table 2, the N value tends to increase with increasing shear rate, as one would expect [1]. When comparing the two systems at low shear rates, the N values from the moving piston seem to be less than those from the moving barrel system, the opposite behaviour being observed at higher shear rates.

The variations in the results of flow properties and entrance corrections are thought to be probably due to the following reasons.

- Alignment of the equipment: as indicated by previous work [10] the alignments of the apparatus for both modes of operation of the rheometer were good enough to generate reproducible results of the flow properties of the polymer melts for a given test condition. Thus, the alignment of the apparatus is not the cause of the variations in the results.
- Extrusion direction: as stated earlier in this paper, in the case of using a moving piston, the piston drive is engaged and the polymer melt extrudes through the die, the melt being extruded downwards out of the die. In the case of using a moving barrel, the piston is rigidly mounted on the base of the tensile testing machine and the barrel and die move downwards along the piston, the melt being extruded upwards out of the die. The differences in the pressure drops at a given shear rate for these two extrusion modes may be caused by the fact that, for the moving barrel system the polymer may be extruded into pile of the polymer melt that may accumulate on top of the die.

This is not found to be the case, because during the experiment the melt did not accumulate on top of the die, but rather curled down and accumulated near the die (along the die length), with thus no extrusion of the melt into the pile of polymer melts occurring.

- Differences in flow patterns: it is thought that the discrepancies in the entrance corrections results may be associated with differences in flow occurring in the two operation systems, since the flow properties of a polymer melt are influenced by the flow patterns occurring in the system [10-12]. 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. In this work, a rough consideration of the flow patterns occurring in the barrel of these two operation systems was carried out. For this purpose, a coloured tracer technique was selected and used to investigate the flow patterns in the barrel. Recent evidence [6,11,12] has shown that the flow patterns of a natural rubber (NR) and a molten thermoplastic (LDPE) are very similar, the flow patterns observed appeared primarily to be a function of piston displacement. As a consequence, it is very convenient to use natural rubber compound to view the flow patterns in the capillary rheometer. The experimental technique and procedure (including raw materials used) have been explained in detail elsewhere [6,11]. In this work, the flow patterns were investigated in the moving barrel and moving piston systems. Die number 4 was used at a test temperature of 160°C. Fig. 6 shows a comparison of the flow patterns of the rubber in the barrel between moving piston (left) and moving barrel (right) systems for a given shear rate (87 s^{-1}) and piston (or barrel) displacement (about half barrel length). 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, the actual flow rates at a given radial position of the two systems were different. By consideration of the central flow layer, the sample from the moving barrel system exhibited the faster flow at the centre. For a given piston (or barrel) displacement, the number of flow layers left in the barrel with the moving barrel system appeared to be less than those with the moving piston system, indicating the faster flows of the polymer in the moving barrel mode. In addition, it can be observed that the convergent angle of the flow from the moving barrel system was less than that from the moving piston mode. Work by Sombatsompop and Wood [13], and by Liang [14] has suggested that the convergent angle (flow patterns near the die entrance) of the flow was closely associated with pressure drops along the barrel.

After considering the above possible causes of the variations in the flow property results, we thought that the differences in the flow patterns may be the cause of the discrepancies in the flow properties and entrance corrections investigated in this paper. No further quantitative investigations were made of the relationship between flow properties and flow patterns of polymer melts in our capillary rheometer.

Figs. 7 and 8 show the corrected flow curves of the LDPE melt with moving piston and moving barrel, respectively, the same plotting scales being used as those used in Figs. 1 and 2 for comparative purposes. The true shear stress values are also listed in Table 3. It is clear that after the use of the entrance corrections the differences in the results due to the die sizes used are much minimised: the variations in the results due to the mode of operation tend to be less.

In summary, this paper seems to indicate that the flow properties of the polymer melt are dependent on the

Table 3

Comparison of the corrected values of shear stress of the LDPE melt for moving piston and moving barrel systems at different dies used

Shear rate (s^{-1})	L/R=13	L/R=23	L/R=31	L/R=40	L/R=49
<i>True shear stress (kPa) for moving piston system</i>					
87	80	72	77	66	65
216	99	101	111	97	95
433	98	107	121	111	107
866	98	110	124	110	98
<i>True shear stress (kPa) for moving barrel system</i>					
87	66	54	51	60	67
216	101	84	90	99	102
433	124	113	118	123	116
866	140	136	142	123	109

mode of operation used. The variations in the entrance corrections due to the mode of operations at least raises a practical concern when one wishes to use the entrance corrections and tries to correlate the results obtained from different designs of the measuring equipment (i.e. taking the results given from one piece of equipment and adjusting/converting them to obtain the results for another piece of equipment). Further investigation, beyond the scope of this initial paper, is required to quantitatively examine the causes of the discrepancies in the results by studying the relationship between flow properties and flow patterns of polymer melts in our capillary rheometer in detail.

4. Conclusion

A capillary rheometer featuring the possibilities of moving either the piston or the barrel was used to investigate the flow properties and the entrance corrections in molten polymer systems. The flow properties and the entrance corrections were found to be dependent on the mode of operation and die sizes used in the capillary rheometer. The discrepancies in the results were thought to be associated with the flow occurring in the barrel of the capillary rheometer.

Acknowledgements

The authors would like to thank the Thailand Research Fund (RSA 18/2543-TRF) for financial support throughout this work.

References

- [1] J.A. Brydson, *Flow Properties of Polymer Melts*, George Godwin, London, 1981.
- [2] C.D. Han, *AIChE J.* 18 (1972) 1.
- [3] J.Z. Liang, *Plast. Rubb. Comp. Process. Appl.* 25 (1996) 495.
- [4] E.B. Bagley, *J. Appl. Phys.* 28 (1957) 624.
- [5] A.K. Wood, A.G.G. Read, J.G.A. Lovegrove, *Plast. Rubb. Process. Appl.* 12 (1989) 15.
- [6] N. Sombatsompop, M.C. Tan, A.K. Wood, *Polym. Eng. Sci.* 37 (1997) 270.
- [7] K.S. Hyun, *Polym. Eng. Sci.* 14 (1974) 666.
- [8] J.F. Ballenger, I.-J. Chen, J.W. Crowder, G.E. Hagler, D.C. Bogue, J.L. White, *Trans. Soc. Rheol.* 15 (1971) 195.
- [9] N. Sombatsompop, N.-T. Intawong, N.-S. Intawong, *Polym. Testing* 19(5) (2000) 579.
- [10] N. Sombatsompop, N.-T. Intawong, *Mater. Res. Innovat.* 3 (1999) 150.
- [11] N. Sombatsompop, A.K. Wood, I.S. Godfrey, *SPE ANTEC Tech. Papers* 43 (1997) 388.
- [12] N. Sombatsompop, A.K. Wood, *ASME Fluid Meas. Instrum. FED-239* (1996) 447.
- [13] N. Sombatsompop, A.K. Wood, *Polym. Eng. Sci.* 37 (1997) 281.
- [14] J.Z. Liang, Y.Q. Huang, G.J. Tang, *Plast. Rubb. Comp. Process. Appl.* 18 (1992) 311.

Rungrattawachai P, Eaksrisakul K, Bouvaree N, Intawang N-T & Sombatsompop N (2000) - Flow Properties & Flow Patterns of NR and SBR Compounds in a New Capillary Rheometer - *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 22 (4), 477-487.



วารสาร

สงขลานครินทร์

วารสารวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ISSN 0125-3395

สำเนาพิมพ์จากวารสารสงขลานครินทร์ ฉบับวทท.
Reprint from Songklanakarin J. Sci. Technol.

กองบรรณาธิการวารสารสงขลานครินทร์ สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตู้ ปณ. 102 อ.หาดใหญ่
จ.สงขลา 90110 โทร. (074) 211-030 ต่อ 2983 โทรสาร (074) 212837 E-mail : ksasiton@ratree.psu.ac.th
Editorial Board Songklanakarin J. Sci. Technol., President's Office, Prince of Songkla University,
P.O. Box 102, Hat Yai, Songkhla 90110 Thailand Tel. (66-74) 211-030 Ext. 2983, Fax. (66-74) 212837
E-mail : ksasiton@ratree.psu.ac.th

สมบัติและรูปแบบการไหลของสารประกอบยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวทีไดอีนในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์แบบใหม่

ปฏิพัทธ์ รุ่งรัตน์วัชชัย¹ กมสันต์ เอกศรีสกุล¹ นพปฎล บ่อวารี¹
นเรศ อินตะวงศ์² และ ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ³

Abstract

Rungrattawachai, P.¹, Eaksrisakul, K.¹, Bouvaree, N.¹, Intawong, N-T.² and Sombatsompop, N.³
Flow properties and flow patterns of NR and SBR compounds in
a new capillary rheometer
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2000, 22(4) : 477-487

This research paper aimed to investigate the flow properties and flow patterns of Natural Rubber (NR) and Styrene-Butadiene Rubber (SBR) in a capillary rheometer, that featured possibilities of moving the piston and the barrel, the flow patterns being studied using a coloured tracer technique. The results showed that

¹Department of Materials Technology, Faculty of Industrial Technology, Silpakorn University, Sanamchandra Palace Campus, Nakhon Pathom, 73000, ²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangakala Institute of Technology, Northwest Campus, Muang, Chiang Mai, 50202, ³Division of Materials Technology, School of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology, Thonburi (KMUTT), Rat Burana, Bangkok 10140 Thailand.

นักศึกษาปริญญาตรี คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม 73000 ¹นักศึกษาปริญญาเอก คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และอาจารย์สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคพายัพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50202 ³Ph.D. (Polymer Processing and Rheology) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ราษฎร์บูรณะ กรุงเทพฯ 10140

Corresponding e-mail : inarmpop@cc.kmutt.ac.th

รับต้นฉบับ 14 กุมภาพันธ์ 2543 รับลงพิมพ์ 17 พฤษภาคม 2543

the rubber compounds exhibited pseudoplastic non-Newtonian behaviour, and the flow properties and flow patterns changed with the mode of rheometer operation. The flow patterns of the rubber compounds changed continuously with piston movement, the flow patterns of SBR being more complex than those of NR especially at higher piston displacements. The convergent angles of flow at the die entrance can be used to explain the differences in the flow pattern results influenced by the mode of rheometer operation. Finally, it was observed that the mastication had a significant effect on the flow patterns observed, this being associated with the radial flows occurring.

Key words : flow properties, flow patterns, capillary rheometer, mastication, shear and elongation, rubber compounds

บทคัดย่อ

ปฏิพัทธ์ รุ่งรัตน์รัชชัย กมสันต์ เอกศรีสกุล นพปฎล บ่อวาริ นเรศ อินดิวงค์ และ
ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ

สมบัติและรูปแบบการไหลของสารประกอบยางธรรมชาติและยางสไตรีนบิวตะไดอินใน
เครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์แบบใหม่

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2543 22(4) : 477-487

บทความนี้เป็นการศึกษาและวิเคราะห์สมบัติและรูปแบบการไหลของสารประกอบยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) และสารประกอบยางสไตรีนบิวตะไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) ในเครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์ (Capillary rheometer) ใช้ระบบการขับเคลื่อน Barrel และ Piston โดยอาศัยเทคนิคการใช้แถบสีของสารประกอบยาง ผลการทดลองพบว่า สารประกอบยาง NR และ SBR แสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic non-Newtonian และพบว่า ระบบการขับเคลื่อนของเครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์ มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติและรูปแบบการไหลของสารประกอบยางทั้งสองชนิด ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า รูปแบบการไหลของสารประกอบยางเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามระยะการอัดรีด โดยรูปแบบการไหลของสารประกอบ SBR มีความซับซ้อนมากกว่ารูปแบบการไหลของสารประกอบยาง NR โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ณ ระยะการอัดรีดสูง ๆ มุมการไหลของพอลิเมอร์บริเวณทางเข้าคาย (die entrance) สามารถใช้อธิบายความแตกต่างของรูปแบบและสมบัติการไหลที่มีผลมาจากระบบการขับเคลื่อนของ Barrel และ Piston สุดท้ายพบว่า รูปแบบการไหลของสารประกอบยาง NR เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของการบดยาง ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการเกิด การไหลอัดตามแนวรัศมี (radial flow) ของพอลิเมอร์ไหลวนในช่องไหลวนเหลวทรงกระบอก

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ หมายถึง การแปรรูปวัตถุดิบพอลิเมอร์เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป โดยผ่านกระบวนการให้ความร้อน (heating and cooling processes) ภายใต้ความดัน จากงานวิจัยเป็นจำนวนมาก (Cogswell, 1982) ระบุว่า สมบัติทางการไหล (rheological properties) ของพอลิเมอร์หลอมเหลว โดยปกติจะแสดงในรูปแผนภูมิการไหล (flow curves) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นแรงเฉือน (shear stress) และอัตราเฉือน (shear rate) และค่าความหนืดเฉือน (shear viscosity) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้สามารถใช้เป็นตัวกำหนด

ความเหมาะสมและสภาวะของกระบวนการผลิต รวมถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ หากผู้ผลิตกำหนดสภาวะการผลิตที่เหมาะสมได้ ก็จะทำให้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ดีตามไปด้วย สมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลวนิยมตรวจวัดโดยใช้เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางการไหลที่เรียกว่าโอมิเตอร์ (rheometers) หรือ วิสโคมิเตอร์ (Viscometers) ซึ่งมีหลายแบบ แต่แบบที่นิยมใช้กับพอลิเมอร์หลอมเหลวในอุตสาหกรรม คือ คาปิลารี่โอมิเตอร์ (capillary rheometers) ซึ่งหลักการของเครื่องมือวัดชนิดนี้ คือ การวัดค่าความดันตก (pressure drop) ในระบบ ณ

อัตราการไหลต่างๆ (Sombatsompop *et al.*, 1997)

ผลงานวิจัยในปัจจุบัน (Wood *et al.*, 1989) ระบุว่า ผลการทดสอบคุณสมบัติการไหลของพอลิเมอร์หลอมเหลว ชนิดหนึ่งๆ โดยใช้เครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์ เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการทดสอบซึ่งมีผลมาจากตัวแปรหลายตัว เช่น อุณหภูมิ ความดัน และอัตราเร็วการไหล ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเฉพาะของพอลิเมอร์ ในขณะเดียวกัน มีตัวแปรบางตัว ยกตัวอย่างเช่น ขนาดและรูปร่างของ ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์ (เช่น แท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก (piston) และ die ซึ่งตามทฤษฎี (Cogswell, 1982) ไม่น่าจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของผลการทดสอบ (variations of experimental results) แต่จากผลการวิจัยของผู้วิจัยหลายท่าน (Wood, *et al.*, 1989, Sombatsompop and Wood, 1997, and Sombatsompop and Intawong, 1999) ระบุว่า ผลการทดสอบ เปลี่ยนแปลง และเบี่ยงเบนไปอย่างมากด้วยอิทธิพลของการออกแบบและขนาดของชิ้นส่วนของเครื่องรีโอมิเตอร์ ผลงานวิจัยของ Sombatsompop และ Wood (1997) กล่าวว่า ทั้งหมดนี้อาจเป็นเพราะรูปแบบของการไหล (flow patterns หรือ velocity profiles) ของพอลิเมอร์ที่ไม่เหมือนกันในเครื่องมือทดสอบที่มีขนาดและรูปร่างของเครื่องรีโอมิเตอร์และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ต่างกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของการไหลมีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางการไหลของพอลิเมอร์ที่กำลังวัด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า รูปแบบการไหลเป็นตัวแปรสำคัญในการกำหนดสมบัติทางการไหลของวัสดุพอลิเมอร์ที่กำลังทดสอบ อย่างไรก็ตาม จนกระทั่งขณะนี้ ยังไม่มีผลงานวิจัยใดให้การพิสูจน์และข้อสรุป ดังกล่าวนี้อย่างชัดเจน ซึ่งหากได้หาข้อสรุปจะนำไปสู่การกำหนดและทำนายสมบัติทางการไหลที่แน่นอนของพอลิเมอร์ในกระบวนการผลิตจริงได้ในแต่ละกระบวนการผลิต ผลการวิจัยล่าสุด (Sombatsompop and Intawong, 1999) ได้ออกแบบพัฒนาและจัดสร้างเครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์แบบใหม่ โดยใช้ระบบการขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (barrel) เข้าสู่แท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก (piston) แทนการขับเคลื่อนของแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกเข้าสู่ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก ตามที่ใช้กันอยู่ทั่วไป จากนั้น ทำการศึกษาอิทธิพลของระบบการทำงานแบบใหม่ของเครื่องรีโอมิเตอร์นี้ต่อสมบัติทางการไหลของ

พอลิเมอร์หลอมเหลว โดยผลการทดลองที่ได้รับถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้รับจากเครื่องมือวัดคาปิลารี่โอมิเตอร์ แบบธรรมดาทั่วไป (แบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกเข้าสู่ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก) ด้วย จาก การวิจัยค้นคว้าดังกล่าว พบว่า ระบบการขับเคลื่อนที่ต่างกัน (ขับเคลื่อน ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก และขับเคลื่อน แท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก) ให้ผลการทดสอบทางการไหลของพอลิเมอร์ที่แตกต่างกันอย่างมาก (ประมาณ 15-20% ณ สภาวะการทดสอบเดียวกัน ในขณะที่ข้อผิดพลาดจากการทดลองที่คำนวณได้ประมาณ 3%) ในงานวิจัยดังกล่าวได้สรุปในเบื้องต้นว่า ความแตกต่างของผลการทดสอบ ที่มาจากระบบการขับเคลื่อนที่แตกต่างกัน (ขับเคลื่อน ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก กับ แท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก) น่าจะมาจากรูปแบบการไหลที่แตกต่างกันอันเนื่องมาจากการขับเคลื่อนที่แตกต่างกัน รวมไปถึงความสัมพันธ์ของสมบัติการไหลและรูปแบบการไหลของพอลิเมอร์ในสองระบบ

ในกรณีของกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง การศึกษาสมบัติทางการไหลมีความสำคัญไม่น้อยไปกว่ากระบวนการผลิตชิ้นงานพลาสติก เป็นที่ทราบกันอย่างชัดเจนว่า การเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกายภาพ (เช่น น้ำหนักโมเลกุล ความหนาแน่นของพันธะข้ามและโครงสร้างโมเลกุล) มีอิทธิพลมาจากคุณลักษณะของการไหลของสารประกอบยาง ระหว่างการผลิตซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ (Brydson, 1981) อย่างไรก็ตาม ผลงานวิจัยที่ผ่านมาโดยมาก ได้เน้นศึกษาสมบัติการไหลของสารประกอบยางชนิดต่างๆ ในส่วนของสมบัติการไหล (flow properties) ในสภาวะการทดสอบที่แตกต่างกัน (เช่น ขนาดและรูปร่างของ die ความเร็วการอัดรีด อุณหภูมิ) (Lablanc, 1986) ในขณะที่มีผลงานวิจัยจำนวนไม่มากนัก ที่ทำการศึกษารูปแบบการไหลของสารประกอบยาง ในเครื่องมือทดสอบและผลิตผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ อาจเป็นเพราะความยากลำบากในการทดลองและข้อจำกัดต่างๆ เทคนิคที่ใช้ (Whorlow, 1992)

บทความนี้ได้ทำการศึกษาสมบัติและรูปแบบการไหลของสารประกอบยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) และยางสไตรีนบิวทีไดเอน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) ในเครื่องคาปิลารี่โอมิเตอร์ที่ออกแบบและ

จัดสร้างขึ้น โดยใช้ระบบการขับเคลื่อน ห้องหลอมเหลว ทรงกระบอก และ แท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก (Sombatsompop and Intawong, 1999) นอกจากนี้ ยังทำการ ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการบดยาง (mastication time) ที่มีต่อสมบัติและรูปแบบการไหลของสารประกอบ ยางทั้งสองด้วย

วิธีการทดลอง

1. วัสดุและอุปกรณ์ในการวิจัย

- 1.1 สารประกอบยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) จากบริษัทเซ่งมัยพาราและเคมีจำกัด (กรุงเทพฯ)
- 1.2 สารประกอบยางสไตรีน บิวทีไดอีน (SBR) จาก Emco Intertrade SBR1502 No.1-540 (Taiwan)
- 1.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบ (Table 1)

Table 1. Vulcanization recipe for NR and SBR

Chemicals	Rubber Compound	
	NR	SBR
NR	100	-
SBR	-	100
ZnO	4	4
Stearic acid	2	2
MBT*	1	1
Sulphur	3	3
TiO ₂	2	2

MBT* = Mercaptobenzothiazole

1.4 เครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์แบบใหม่ (Sombatsompop and Intawong, 1999) ที่ใช้สำหรับทดสอบสมบัติ การไหลและรูปร่างการไหลของสารประกอบยางในงานวิจัยนี้ มี ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มม ยาว 130 มม Die มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มม ยาว 55 มม เครื่องรีโอมิเตอร์ที่ใช้สามารถทำการทดสอบได้ 2 ระบบคือ ระบบการขับเคลื่อนห้อยหลอมเหลวทรงกระบอก (mobile barrel) และระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรง กระบอก (mobile piston) โดยทำการประกอบเข้ากับ เครื่องมือทดสอบแรงดึง SHIMADZU รุ่น AGS-500 D

ซึ่งใช้ความเร็วในการดึง (speed) 0.5-1000 มม/นาที และ ทำการวัดความดันในระบบโดยใช้เครื่องมือวัดความดันที่ใช้ เป็นแบบเข็มสปริง (Pin Spring Pressure Transducer, PSPS) ซึ่งออกแบบโดย Sombatsompop, *et al* (2000)

1.5 เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mills) ผลิต โดยบริษัท Baughan (Stroud) Co. Ltd Engineers Model 1419/Sa Serial No. C700 สำหรับทำการบดยาง (mastication)

1.6 เครื่องขึ้นรูปแบบอัดความดัน (compression moulder) ผลิตโดยบริษัท Carver Model 2759 S/N 2759-614 สำหรับขึ้นรูปสารประกอบยางให้มีลักษณะเป็นแผ่น

1.7 อุปกรณ์ตัดชิ้นงานเป็นรูปวงกลม (circular punch) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 มม สำหรับตัดชิ้น งานแผ่นที่ได้รับจากเครื่องขึ้นรูปแบบอัดความดัน ให้เป็น แผ่นวงกลม

2. การเตรียมสารประกอบยาง

เตรียมสารประกอบยาง 3 กระบวนการ คือ การบด ยาง การผสมสารเคมี และการขึ้นรูปสารประกอบยางโดย กระบวนการอัดความดัน

2.1 การบดยาง (mastication)

การบดยางเป็นกระบวนการลดน้ำหนักโมเลกุลของยาง ก่อนทำการผสมสารเคมีโดยทำการบดยางด้วยเครื่องบดยาง แบบสองลูกกลิ้ง (two roll mills) เป็นเวลา 10 นาที ใน กรณีที่ได้มีการศึกษาวิจัยผลของเวลาในการบดยาง (mas- tication time) ที่มีต่อสมบัติและรูปแบบการไหล ได้ออกแบบให้มีการบดยางที่ระยะเวลาต่างๆ กัน คือ 10 20 25 และ 30 นาที ก่อนทำการผสมสารเคมี (Sombat- sompop *et al.*, 1997)

2.2 การผสมสารเคมีกับยาง (compounding)

หลังจากได้ยางที่ผ่านการบดยาง ทำการเติมสารเคมี ดัง Table 1 จากนั้นบดสารประกอบยางต่อไปอีก 5 นาที บนเครื่องบดยางแบบลูกกลิ้ง เพื่อให้สารเคมีผสมเข้าเป็น เนื้อเดียวกัน จากนั้นรีดออกมาเป็นแผ่น

2.3 การขึ้นรูปสารประกอบยางโดยกระบวนการอัด ความดัน (compression)

สารประกอบยางที่ได้จากกระบวนการผสมสารเคมี กับยาง นำมาขึ้นรูปให้มีลักษณะเป็นแผ่นด้วยการอัดเย็น

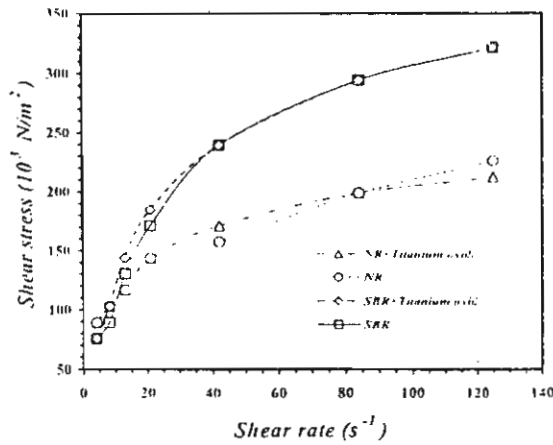


Figure 1. Shear stress and Shear rate for NR and SBR compounds with and without TiO_2 using mobile piston system

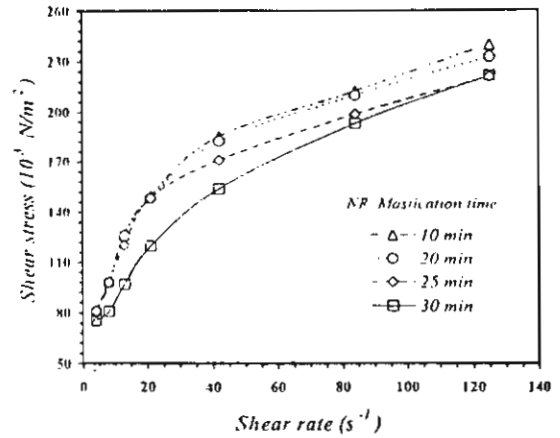


Figure 3. Shear stress and Shear rate for NR compounds for different mastication times

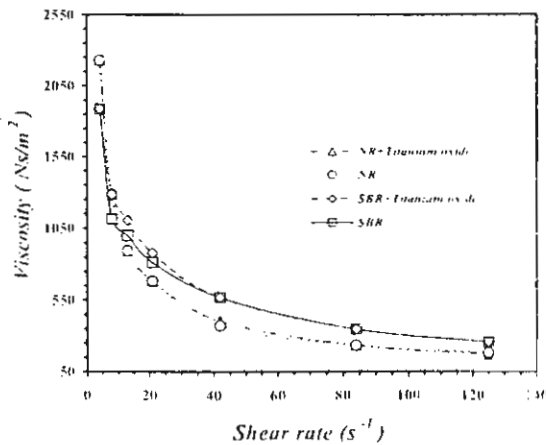


Figure 2. Viscosity and Shear rate for NR and SBR compounds with and without TiO_2 using mobile piston system

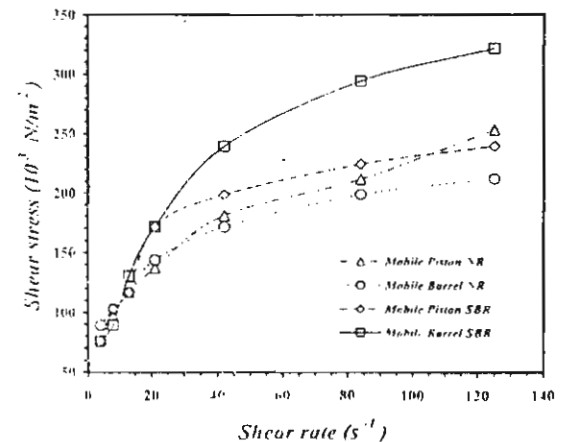


Figure 4. Shear stress and Shear rate for NR and SBR compounds using mobile barrel and mobile piston systems

การเปรียบดังกล่าวอาจเป็นไปได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบมีความแตกต่างกัน (ระบุในหัวข้อวิธีการ)

1.2 อิทธิพลของสี (TiO_2) ที่ใช้ผสมในสารประกอบยาง หากพิจารณาจาก Figures 1 และ 2 ในแง่ของอิทธิพลของ TiO_2 ในสารประกอบยางชนิดเดียวกัน พบว่า TiO_2 ไม่มีผลกระทบต่อสมบัติการไหลโดยรวมของสาร

ประกอบยางทั้งสองชนิด

1.3 อิทธิพลของระยะเวลาการบดยาง

Figure 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้นเฉือน กับ อัตราเฉือนของสารประกอบยาง NR ที่มีระยะเวลาในการยางแตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าระยะเวลาในการบดยางไม่มีผลต่อลักษณะและพฤติกรรมการไหลโดยรวมของสารประกอบยาง กล่าวคือ สารประกอบยางในทุกกรณีของระยะเวลาการบดยางแสดงสมบัติความเป็นของไหลแบบ

ที่อุณหภูมิห้องให้มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความหนาประมาณ 5 มม ด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัดความดัน โดยระหว่างกระบวนการอัดความดันใช้แผ่นพลาสติกพอลิเอทิลีนวางทั้งสองด้านของแม่พิมพ์ (mould) ด้านในเพื่อป้องกันการยึดติดของยางกับแม่พิมพ์ และการหดตัวของยางหลังกระบวนการอัดเย็น จากนั้นทำการตัดชิ้นทดสอบสารประกอบยางให้มีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมโดยใช้อุปกรณ์ตัดขึ้นงานรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 25 มม ซึ่งในการทดสอบแต่ละครั้งใช้ชิ้นทดสอบสารประกอบยางชนิดเดียวกันโดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มชิ้นทดสอบสารประกอบยางที่ไม่ใส่ TiO_2 และกลุ่มชิ้นทดสอบสารประกอบยางที่ผสม TiO_2 ซึ่งให้สีขาว และนำชิ้นงานทดสอบทั้งหมดเข้าเก็บในห้องควบคุมอุณหภูมิ 25°C ที่ความชื้น 50%

3. การศึกษาสมบัติการไหลของสารประกอบยาง

สารประกอบยางที่ได้เตรียมนำมาตรวจสอบสมบัติทางการไหล โดยแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน (τ) กับ อัตราเฉือน ($\dot{\gamma}$) และความหนืด (η) กับ อัตราเฉือน ($\dot{\gamma}$) โดยใช้เครื่องคาลารีรีโอมิเตอร์ ซึ่งหลักการคำนวณแสดงในสมการที่ 1 และสมการที่ 2 (Sombatsompom, et al., 1997)

$$\tau = \frac{RP}{2L} \quad \text{สมการที่ 1}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad \text{สมการที่ 2}$$

โดย R = รัศมี Die (ในที่นี้ใช้ $L/D = 55/6$)

Q = ปริมาตรการไหล (m^3/s)

P = ความดันที่ปาก die (N/m^2)

L = ความยาว Die (m)

สำหรับขั้นตอนและวิธีการทดสอบสมบัติการไหลของสารประกอบยางในเครื่องคาลารีรีโอมิเตอร์ ดูจาก Sombatsompom and Intawong (1999)

4. การศึกษารูปแบบการไหลของสารประกอบยาง

นำชิ้นทดสอบสารประกอบยางรูปวงกลมที่มีสีและไม่มีสีมาอย่างละ 10 แผ่น ทำการลอกพลาสติกออกจากชิ้น

ทดสอบทั้งด้านบนและด้านล่าง จากนั้นบรรจุชิ้นงานทดสอบลงในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของเครื่องคาลารีรีโอมิเตอร์ โดยสลับสักัน โดยขั้นตอนและเทคนิคการบรรจุสารประกอบยางดูรายละเอียดจากงานวิจัยของ Sombatsompom (1998) หลังจากบรรจุสารประกอบยางเต็ม ห้องหลอมเหลวทรงกระบอก แล้วรักษาอุณหภูมิของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกให้คงที่เป็นเวลา 10 นาที (โดยอุณหภูมิที่ใช้ $\text{NR}=80^\circ\text{C}$ และ $\text{SBR}=100^\circ\text{C}$) จากนั้นทำการอัดรีด (extruding) ด้วยความเร็วการอัดรีด (piston speed) 50 มม/นาที สารประกอบยางจะไหลออกจาก Die ที่ถูกประกอบอยู่ตอนใต้ของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกในคาลารีรีโอมิเตอร์ ตามระยะการอัดรีดที่ต้องการ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 160°C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ยางสุก จากนั้น นำชิ้นงานออกจากห้องหลอมเหลวทรงกระบอก ทำการตัดแบ่งครึ่งชิ้นงานทดสอบตามแนวยาวเพื่อตรวจสอบรูปแบบการไหล ทำการทดสอบครั้งต่อไปตามวิธีการข้างต้น ทั้งระบบการทดสอบแบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก และขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกที่ระยะการอัดรีดต่างๆ ดังนี้ คือ 15, 35, 55, 75 และ 95 มม ซึ่งการอัดรีดระยะดังกล่าวนี้ให้ชิ้นทดสอบที่มีความยาว 120, 100, 80, 60 และ 40 มม ตามลำดับ

ผลการทดลอง

1. การศึกษาสมบัติของการไหล

1.1 การวิเคราะห์ทั่วไป

Figure 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน และ Figure 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอัตราเฉือน ของสารประกอบยาง NR และสารประกอบยาง SBR ที่ผสมและไม่ผสม TiO_2 โดยทั่วไปพบว่าสารประกอบยางทั้งสองแสดงสมบัติความเป็น non-Newtonian ในพฤติกรรมกรการไหลแบบ Pseudoplastic กล่าวคือ ความหนืดลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นตามที่คาดหมายไว้ (Cogswell, 1982) เมื่อพิจารณาสมบัติการไหลของ NR และ SBR พบว่ามีความแตกต่างกัน โดย SBR มีค่าความเค้นเฉือนที่สูงกว่าสารประกอบยาง NR ณ อัตราเฉือนหนึ่งๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารประกอบยาง NR มีความหนืดต่ำกว่าและไหลได้ง่ายกว่า SBR อย่างไรก็ตาม

Pseudoplastic non-Newtonian เมื่อพิจารณาโดยละเอียดพบว่า เมื่อเวลาในการบดยางเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนืดลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะการบดยางเป็นเวลานานทำให้สายโมเลกุลของยางสั้นลงซึ่งทำให้ความหนืดลดลงไปด้วย (Sombatsompop *et al.*, 1997)

1.4 อิทธิพลของระบบการขับเคลื่อนของเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์

Figure 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความดันเฉือน กับ อัตราเฉือน ของสารประกอบยาง NR และ SBR ในระบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกและขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกจะเห็นได้ว่าสารประกอบยาง NR และ SBR ในทั้งสองระบบการขับเคลื่อนที่ใช้ ยังคงแสดงสมบัติความเป็น non-Newtonian แบบ Pseudoplastic นั้นหมายความว่าระบบขับเคลื่อนไม่ได้เปลี่ยนแปลงพฤติกรรมโดยรวมของสารประกอบยาง นอกจากนี้ ยังพบว่าในระบบการขับเคลื่อนเดียวกัน สารประกอบยาง SBR ให้ค่าอัตราเฉือนสูงกว่าสารประกอบยาง NR โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก ความแตกต่างที่พบจากผลการทดลองคือ ค่าความดันเฉือนของสารประกอบยาง NR ในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกมีค่าสูงกว่าค่าความดันเฉือนในระบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก ในขณะที่ ผลการทดสอบของ SBR ในระบบการขับเคลื่อนแบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก มีค่าความดันเฉือนสูงกว่าการทดสอบในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกสำหรับการวิเคราะห์และการอธิบายผลการทดสอบที่แตกต่างกันระหว่างระบบการขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกและระบบการขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกของสารประกอบยางทั้งสอง แสดงไว้ในหัวข้อ 2 การศึกษารูปแบบการไหล

2. การศึกษารูปแบบการไหล

2.1 สารประกอบยาง NR

Figures 5 และ 6 แสดงรูปแบบการไหลของสารประกอบยาง NR ในระบบการขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกและขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก ณ ระยะการอัดรีดต่างๆ ตามลำดับ จากข้อสังเกตโดยรวมพบว่ารูปแบบการไหลของสารประกอบยางของทั้งสองระบบ

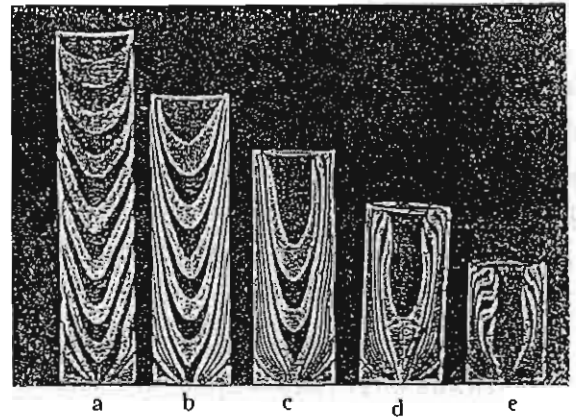


Figure 5. Flow patterns of NR compound using mobile barrel system at different extrusion displacements (a) 15mm, (b) 35mm, (c) 55mm, (d) 75mm และ (e) 95mm

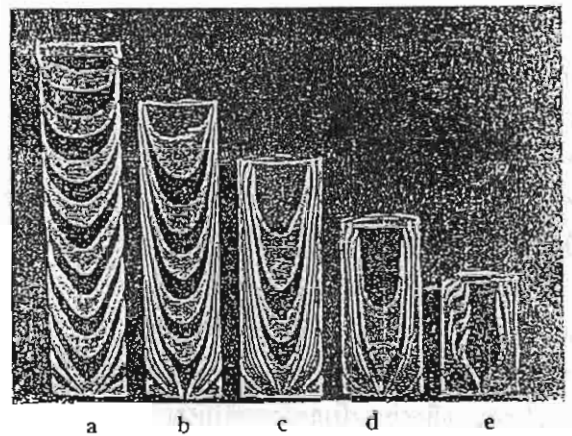


Figure 6. Flow patterns of NR compound using mobile piston system at different extrusion displacements (a) 15mm, (b) 35mm, (c) 55mm, (d) 75mm และ (e) 95mm

การขับเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปตามระยะการอัดรีดของแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก โดยในระยะการอัดรีดแรกๆ สารประกอบยางมีรูปแบบการไหลเป็นพาราโบลา (parabolic-like) คือ ความเร็วของการไหลบริเวณส่วนกลางห้องหลอมเหลวทรงกระบอกสูงกว่าบริเวณผนัง และพอลิเมอร์

มีทิศทางการไหลไปในทิศทางเดียวกับการขับเคลื่อนของแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก มีลักษณะการไหลของสารประกอบยางเข้าสู่ Die อย่างเป็นระเบียบ ในระยะการอัดรีดที่ 75 มม และ 95 มม ลักษณะรูปแบบการไหลของทั้งสองระบบการขับเคลื่อนเกิดการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ พอลิเมอร์บริเวณผนังห้องหลอมเหลวทรงกระบอกที่ติดกับผิวหน้าของแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก เกิดการไหลในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก ในที่นี้เรียกการไหลแบบนี้ว่า การไหลขวาง (crossflow) ซึ่งการไหลขวางมีผลมาจากความแตกต่างของความเร็วของแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกกับความเร็วของพอลิเมอร์บริเวณผนังห้องหลอมเหลวทรงกระบอก (Sombatsompop et al., 1997) เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบการไหลของสารประกอบยาง NR ที่มีระบบการขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอก และแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกโดยละเอียดมากขึ้น พบว่าระบบการขับเคลื่อนมีผลต่อรูปแบบการไหลของสารประกอบยาง ดังต่อไปนี้

1) ความเร็วของการไหลตามแนวรัศมี (central flow velocity) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเร็วของสารประกอบยางที่ไหลในห้องหลอมเหลวทรงกระบอก พบว่าระบบการขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอกให้ความเร็วการไหลที่สูงกว่าระบบการขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก โดยพิจารณาได้จากระยะการไหลและจำนวนชั้นที่เหลืออยู่ในห้องหลอมเหลวทรงกระบอกของทั้งสองระบบ กล่าวคือ เมื่อวัดระยะจากตำแหน่งเริ่มต้นจนถึงปลายสุดของชั้นการไหล (flow layer) ที่ 1 ในบริเวณกึ่งกลางของการไหล (central flow) พบว่าการไหลของพอลิเมอร์ในระบบขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอก ให้ความเร็วสูงกว่าการไหลในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก และหากพิจารณาจำนวนชั้นการไหลที่ระยะการอัดรีดเดียวกันในทั้งสองระบบการขับเคลื่อน พบว่าระบบขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอก มีจำนวนชั้นการไหลที่เหลืออยู่น้อยกว่าระบบการขับเคลื่อนแบบระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก เห็นได้ชัดเจนจาก Figures 5d และ 6d ผลการทดสอบรูปแบบการไหลนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกับผลการทดสอบสมบัติทาง การไหลดังที่กล่าวมาแล้วใน Figure 4 ซึ่งอธิบายได้ว่า สารประกอบยาง NR ในระบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลว

ทรงกระบอกมีค่าความเค้นเฉือนน้อยกว่าในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก จึงสามารถไหลได้ง่าย และสะดวกกว่า ดังนั้น จึงส่งผลให้มีความเร็วในการไหลในระบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก สูงกว่า

2) มุมสู่เข้าของการไหล (convergent flow angles) หากพิจารณามุมการไหลบริเวณทางเข้า Die (ดังเห็นได้อย่างชัดเจนใน Figures 5d และ 6d พบว่ารูปแบบการไหลของสารประกอบยาง NR ในระบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก มีมุมสู่เข้า (convergent angle) ที่แคบกว่าในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก ซึ่งการไหลเช่นนี้ ส่งผลให้มีความเร็วของ Central flows มากขึ้น (Sombatsompop and Intawong, 1999) นอกจากนี้ จากความรู้พื้นฐานโดยทั่วไป มุมสู่เข้าเป็นตัวบ่งบอกถึงลักษณะการไหลว่าเป็นว่ามีการไหลเป็นเฉือน (shear) หรือแบบยืด (elongation) มากน้อยเพียงใด (Cogswell, 1982) โดยทั่วไป ลักษณะมุมสู่เข้าที่มีความกว้างมาก ๆ ทำให้ลักษณะการไหลเข้าใกล้การไหลแบบยืด ซึ่งส่งผลให้มีค่าความหนืด หรือค่าความเค้นเฉือนสูง ณ อัตราเฉือนหนึ่งๆ ของของไหลประเภทเดียวกัน (Cogswell, 1982 and Sombatsompop et al., 1997) ซึ่งข้อความดังกล่าวนี้ สอดคล้องกับผลการทดสอบที่ได้ในงานวิจัยนี้ กล่าวคือ ค่าความเค้นเฉือน และค่าความหนืดของระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกมีค่าสูงกว่าการทดสอบในระบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก และมีมุมสู่เข้าที่กว้างกว่าระบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก ข้อมูลดังกล่าวข้างต้นนี้ บอกเป็นนัยว่ารูปแบบการไหลมีความสัมพันธ์กับสมบัติการไหลเป็นอย่างดี และทั้งสองคุณลักษณะนี้มีผลกระทบมาจากระบบการขับเคลื่อนในเครื่องรีโอมิเตอร์ที่ใช้ (Intawong, 1999)

2.2 สารประกอบยาง SBR

Figures 7 และ 8 แสดงรูปแบบการไหลของสารประกอบยาง SBR ณ ระยะการอัดรีดต่างๆ ในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก และระบบขับเคลื่อนของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกตามลำดับ รูปแบบการไหลโดยรวมในระยะการอัดรีดต่างๆ มีลักษณะคล้ายรูปแบบการไหลของสารประกอบยาง NR กล่าวคือ มีลักษณะการไหลที่เป็นแบบ Parabolic-like ในช่วงแรกๆ ของระยะการอัดรีด และพัฒนาเป็นรูปแบบการไหลที่ค่อนข้างซับซ้อน

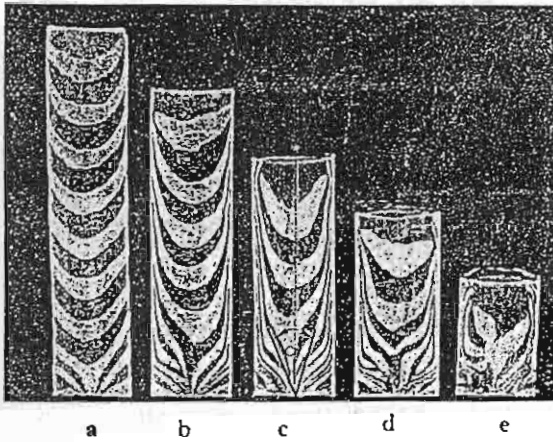


Figure 7. Flow patterns of SBR compound using mobile piston system at different extrusion displacements (a) 15mm, (b) 35mm, (c) 55mm, (d) 75mm และ (e) 95mm

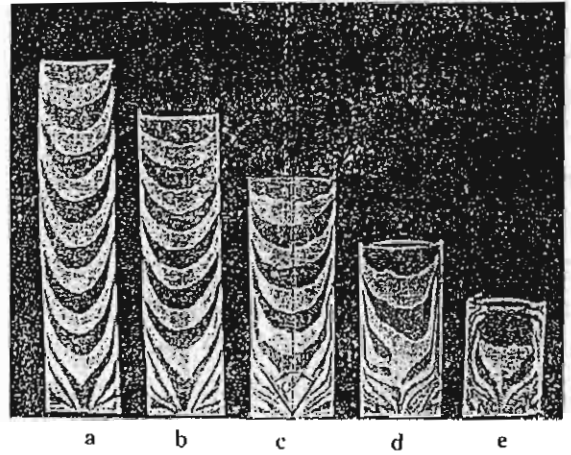


Figure 8. Flow patterns of SBR compound using mobile barrel system at different extrusion displacements (a) 15mm, (b) 35mm, (c) 55mm, (d) 75mm และ (e) 95mm

มากขึ้น ในระหว่างการอัดรีดที่สูงขึ้น ในบทความนี้จะไม่นำรูปแบบการไหลของสารประกอบยางทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบแตกต่างกัน และไม่มีข้อมูลเชิงกายภาพ (เช่น น้ำหนักโมเลกุล ความหนาแน่น เป็นต้น) ของสารประกอบยางทั้งสองเพียงพอ

หากพิจารณาในแง่ของอิทธิพลของระบบการขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอก และแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก ที่มีต่อรูปแบบการไหลของสารประกอบยาง SBR พบว่ามีความแตกต่างกันของรูปแบบการไหลของสารประกอบยางในทั้งสองระบบการขับเคลื่อน ซึ่งสามารถอธิบายและวิเคราะห์ได้ดังนี้

1) รูปแบบการไหลของสารประกอบยาง SBR ในระบบขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอก มีความแตกต่างระหว่างความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์บริเวณส่วนกลางและบริเวณริมผนัง ห้องหลอมเหลวทรงกระบอกไม่มากเมื่อเทียบกับในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก ดังสังเกตได้จากความชันของชั้นการไหล โดยความชันของเส้นการไหลในระบบขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอก มีค่าต่ำกว่าในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก ดัง Figures 7c และ 8c เมื่อพิจารณารูปแบบการไหลที่ระยะการอัดรีดที่ 75 และ 95 มม ของการทดสอบทั้ง

สองระบบการขับเคลื่อนพบว่า สารประกอบยาง SBR มีลักษณะการไหลที่ไร้รูปแบบ (irregular flows) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการความดันตก (pressure drop) ที่ค่อนข้างสูงบริเวณทางเข้า Die ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก Figures 4 ประกอบกับเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการไหลอย่างกะทันหันจากการไหลแบบพาราโบลา (parabolic flow) ไปเป็นการไหลแบบสู่เข้าบริเวณทางเข้า Die ซึ่งการที่แท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก ขับเคลื่อนเข้ามาใกล้บริเวณทางเข้า Die มากขึ้นทำให้ความแตกต่างของความเร็วของแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกและสารประกอบยาง SBR บริเวณผนังของห้องหลอมเหลวทรงกระบอกมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้รูปแบบการไหลเปลี่ยนแปลงเป็นการไหลแบบไร้รูปแบบ (Yukio Tomita and Toshio Shimbo, 1973)

2) พิจารณารูปแบบการไหลบริเวณทางเข้า Die โดยมุมการไหลแบบสู่เข้าของพอลิเมอร์ในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก แคบกว่ามุมของพอลิเมอร์ในระบบขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอกดัง Figures 7c และ 8c ซึ่งจากความรู้พื้นฐานของลักษณะการไหลแบบยึดและแบบเฉือนตามที่กล่าวมาแล้ว พบว่าค่าความเค้นเฉือนและค่าความหนืดในระบบ mobile barrel มีค่ามากกว่าค่าที่ได้ในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก

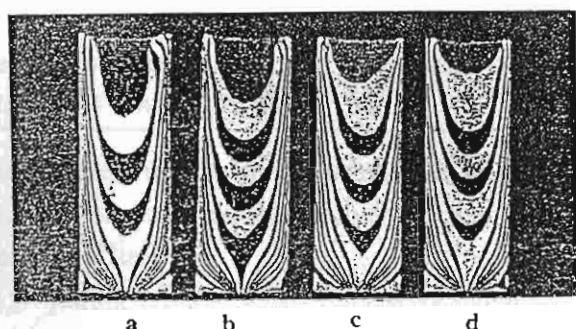


Figure 9. Flow patterns of NR compound at mastication times of 10, 20, 25 and 30 minutes using mobile piston system using the extrusion displacement of 55mm

ซึ่งสอดคล้องกับค่าสมบัติการไหลของสารประกอบยาง SBR แสดงใน Figures 4

3) พิจารณาจำนวนชั้นของชั้นการไหลที่ระยะการอัดรีดเดียวกันในทั้งสองระบบการขับเคลื่อน พบว่าระบบขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอกมีจำนวนชั้นการไหลที่เหลืออยู่ในหลอมเหลวทรงกระบอกมากกว่าระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก ดัง Figures 7c และ 8c ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การไหลของสารประกอบยาง SBR ในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก เป็นไปได้ง่ายและสะดวกกว่าการไหลในระบบขับเคลื่อนห้องหลอมเหลวทรงกระบอก

2.3 อิทธิพลของระยะเวลาการบดยาง

Figure 9 แสดงรูปแบบการไหลของสารประกอบยาง NR ในเครื่องคัปปลารีโอมิเตอร์ ในระบบขับเคลื่อนแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกที่ระยะการอัดรีด 55 มม ณ ระยะเวลาการบดยางต่างๆ โดยทั่วไป พบว่าทุกระยะเวลาการบดยาง รูปแบบการไหลมีลักษณะคล้ายคลึงกัน เมื่อพิจารณาถึงความเร็วในการไหลเปรียบเทียบกันแต่ละระยะเวลาในการบดยาง พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาการบดยาง ความเร็วในการไหลลดลง เมื่อพิจารณาชั้นการไหลที่ 1 ของทั้ง 4 ชั้นงานตัวอย่าง พบว่าที่ระยะเวลาในการบดยาง 10 นาที มีความเร็วในการไหลมากกว่าชั้นงานทดสอบอื่นๆ

จากสมมุติฐานทางการไหล (Cogswell, 1982 and Sombatsompop *et al.*, 1997) ที่ว่า ยิ่งทำการบดยางเป็นเวลานาน ๆ ย่อมทำให้สายโมเลกุลของสารประกอบยางสั้น

ลง และน่าจะส่งผลให้ค่าอัตราเฉือน และ ความหนืดที่ต่ำลง และไหลได้ดีกว่า แต่ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ดูเหมือนว่าจะขัดกับข้อสมมุติฐานดังกล่าว ซึ่งมีคำอธิบายดังนี้ สายโซ่โมเลกุลของยางที่ผ่านการ Mastication เป็นเวลานาน อาจมีขนาดที่สั้นลงจริง และย่อมทำให้เกิดการไหลที่ง่ายขึ้น ซึ่งทำให้เกิดการไหลอ้อมตามแนวรัศมี (radial flows) ของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก มากกว่าสารประกอบยางที่มีสายโมเลกุลที่ยาว การไหลอ้อมตามแนวรัศมีพอลิเมอร์จากรูปพบว่าเกิดขึ้นในชั้นการไหลที่ 2 (ดูจากความหนาของชั้นการไหล) ซึ่งการเกิดการไหลอ้อมตามแนวรัศมีในชั้นการไหลที่ 2 เช่นนี้มีผลให้ความเร็วในการไหลของพอลิเมอร์ใน Layer 1 ลดลง คณะวิจัยคาดว่า (Rungrattawachai *et al.*, 2000) การเกิดการไหลอ้อมตามแนวรัศมีในชั้นการไหลที่ 2 เกิดจากความแตกต่างของความเร็วการไหลของพอลิเมอร์ที่ผนังระหว่างชั้นการไหลที่ 1 (ที่อยู่ติดกับแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก และมีความเร็วในการไหลเท่าเทียมกับความเร็วของแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอก) และชั้นการไหลที่ 2 (ที่มีความเร็วในการไหลค่อนข้างต่ำ)

สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้ สามารถให้ข้อสรุป ดังนี้

1. สารประกอบยาง NR และ SBR ที่ใช้งานงานวิจัยนี้ แสดงพฤติกรรมการไหลแบบ Pseudoplastic non-Newtonian

2. ระบบการขับเคลื่อนของแท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกและห้องหลอมเหลวทรงกระบอกในเครื่องคัปปลารีโอมิเตอร์ มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติและรูปแบบการไหลของสารประกอบยางทั้งสองชนิด และยังพบว่า สมบัติการไหลมีความสัมพันธ์กับรูปแบบการไหลที่เกิดขึ้นในเครื่องคัปปลารีโอมิเตอร์

3. รูปแบบการไหลของสารประกอบยางเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตามระยะการอัดรีด ซึ่งรูปแบบการไหลของสารประกอบ SBR มีความซับซ้อนมากกว่ารูปแบบการไหลของสารประกอบยาง NR โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ณ ระยะการอัดรีดสูงๆ

4. การวิเคราะห์มุมทางเข้า Die ของการไหลของพอลิเมอร์ สามารถใช้อธิบายความแตกต่างของรูปแบบ

และสมบัติการไหล อันเนื่องมาจากระบบการขับเคลื่อนของ
แท่งขับเคลื่อนทรงกระบอกและห้องหลอมเหลวทรงกระบอก
ในเครื่องคาปิลารีโอมิเตอร์

5. รูปแบบการไหลของสารประกอบยาง NR เปลี่ยน
แปลงไปตามระยะเวลาของการบดยาง ซึ่งมีความเกี่ยวข้อง
กับการเกิดการไหลอัดตามแนวรัศมี (radial flow) ของ
ผนังของห้องหลอมเหลวทรงกระบอก

กิตติกรรมประกาศ

คณะวิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุน
การวิจัย (สกว.) ในการให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย (ทุนเมธี
วิจัย สกว. รหัสโครงการ RSA 18/2543) และคณะเทคโนโลยี
อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร (จ.นครปฐม) ใน
การให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องบดยางแบบสองลูก
กลิ้งและเครื่องขึ้นรูปแบบอัดความดัน เพื่อผสมและขึ้นรูป
สารประกอบยาง

เอกสารอ้างอิง

- Brydson, J.A. 1981. Flow properties of polymer melts,
2nd ed., Gorage Godwin, London.
- Cogswell, F.N. 1982. Polymer melt rheology, George
Godwin, London.
- Intawong, N-T. 1999. Novel design and development
of a capillary rheometer, M.Eng Thesis, KMUTT,
Bangkok Thailand.
- Lablanc, J.I. 1986. Progress and Trends in Rheology
2, 2nd Conference of European Rheologists,
New York USA.
- Rungrattawachai, P., Eaksrisakul, K. and Bouvaree, N.
2000. Studies on flow properties and flow
patterns of NR and SBR in a new capillary
rheometer, B.Sc. Dissertation, Silpakorn Univer-

sity, Nakorn Pathom, Thailand, May.

- Sombatsompop, N. and Intawong, N-T. 1999. A Novel
Capillary rheometer for Measurement of Flow
Properties of Polymer Melts" Materials Research
Innovations. 3: 150-155.
- Sombatsompop, N. and Wood, A.K. 1997. Flow ana-
lysis of natural rubber in a capillary rheometer:
Part 2. Flow patterns and entrance velocity pro-
files in die, Polymer Engineering and Science.
37: 281-290.
- Sombatsompop, N. 1998. Relationship between tem-
perature profiles and flow pattern of flowing
polymer melts, Songkranakarin Journal of Sci-
ence & Technology. 20: 455-463
- Sombatsompop, N., Intawong, N-T. and Intawong, N-S.
2000. A Novel sensing device for pressure
measurement in molten polymer systems, Po-
lymer Testing, 19: 570-589.
- Sombatsompop, N., Tan, M.C. and Wood, A.K. 1997.
Flow analysis of natural rubber in a capillary
rheometer: Part 1. Rheological behaviour and
flow visualisation in the barrel, Polymer Engi-
neering and Science. 37: 270-280.
- Tomita, Y. and Shimbo, T. 1973. Unstable flow of visco-
elastic fluids, Journal of Applied Polymer Sym-
posium. 20: 137-153.
- Whorlow, R.W., 1992. Rheological techniques" 2nd,
Illis Horwood Limited.
- Wood, A.K., Read, A.G. and Lovegrove, J.G.A. 1989.
The effect of rheometer design on the measure-
ment of flow properties of polymer melts, Plas-
tics and Rubber Processing and Applications.
12: 15-20.

Sombatsompop N, Dangtungee R (2001) Effects of Magnetic Fields on Die Swell of Polymer Melts in Capillary Extrusion - *The International Polymer Symposium 2001*, The Polymer Society of Thailand, 16-18th October, Songkla, Thailand.



บทคัดย่อ **EXTENDED ABSTRACTS**

การประชุมวิชาการ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27

16-18 ตุลาคม 2544

ณ โรงแรม ลี การ์เดนส์ พลาซ่า อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

27th Congress on Science and Technology of Thailand

16-18 October 2001

Lee Gardens Plaza Hotel, Hat Yai, Songkla, Thailand



สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์
THE SCIENCE SOCIETY OF THAILAND UNDER THE PATRONAGE
OF HIS MAJESTY THE KING



คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
FACULTY OF SCIENCE, PRINCE OF SONGKLA UNIVERSITY

อิทธิพลของสนามแม่เหล็กต่อพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวในกระบวนการอัดรีด

EFFECTS OF MAGNETIC FIELDS ON DIE SWELL OF POLYMER MELTS IN CAPILLARY EXTRUSION

นารองฤทธิ์ สมบัติสมภพ และ ราพีเพอญ ดางตุงเก

Narongrit Sombatsompop* and Rapeephun Dangtungee

Division of Materials Technology, School of Energy & Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) Bangkok 10140, Thailand; e-mail address: narongrit.som@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ: งานวิจัยนี้ได้ศึกษาพฤติกรรมการบวมตัวของพอลิเมอร์หลอมเหลวในเครื่องคาปิลลารีรีโอเมเตอร์โดยใช้ die ที่มีสนามแม่เหล็กถาวร และเปรียบเทียบกับผลการทดลองกับ die ธรรมดา พบว่าสนามแม่เหล็กส่งผลให้เกิดการบวมตัวของพอลิเมอร์สูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ die ธรรมดา ประมาณ 27% และ 37% สำหรับ PS และ PC ตามลำดับ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีหมู่เบนซีนอยู่ ในขณะที่การบวมตัวของ LDPE และ PVC มีผลน้อยมาก กับสนามแม่เหล็ก นอกจากนี้ ยังพบว่าสนามแม่เหล็กทำให้คุณภาพของผิวของ PVC ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากความเป็นขั้วของ PVC และสนามแม่เหล็กที่ให้กับพอลิเมอร์

Abstract: The die swell of various polymer melts in a capillary rheometer was studied using a magnetic die system under a wide range of temperatures and shear rates, the results being compared with those by a non-magnetic die. It was found that using the magnetic die resulted in a significant increase in the die swell of the extrudates (27% for PS and 37% for PC) as compared with the non-magnetic die, this involving the increases in the existing electron delocalisations and the distortion of the electron clouds within the benzene rings, the shear stress during the flow, and molecular orientations. This effect was very small for LDPE & PVC melts. The PVC texture was found to improve with magnetic die due to increases in the polarity & dipole-dipole interaction, and the critical tensile stress of the melt.

Methodology: Four thermoplastics used in this study were LDPE (LD1905F), PS (Styron 656D 267), PC (2800C), PVC compound (Y5911BLA). A rate-controlled capillary rheometer was used as used by previous work(1). The barrel having 30mm diameter and 135mm long was designed so that the die system could be easily changed. Two circular dies with the same L/D (55/6) were used, permanent magnetic (with an intensity of 126 milli-tesla or 1.26×10^3 Gauss) and non-magnetic die. The die swell ratio of the polymer melts was directly measured by calculating the ratio of diameter of the extrudate to that of the die, the extrudate diameter being the size of the extrudate diameter in the fully swollen (2 inches of the extrudate length from die exit). The extrusion temperature range was 170-260°C with a shear rate range of 5-28s⁻¹. The extrudate texture was also examined using a digital camera.

Results, Discussion and Conclusion: It was generally found that the magnetic die gave greater die swell than the non-magnetic die. The maximum differences in die swell of each polymer melt between *magnetic and non-magnetic dies* decreased in the order of PS → LDPE → PVC. For LDPE and PVC melts, the difference in the extrudate swell was very close to the experimental errors. For PS melt, the increase in extrudate swell due to the magnetic field was so high (up to 27%), the values decreasing with shear rate. It should be noted in the case of PS melt that the entrance pressure drop for the two dies were the same, suggesting that the material property did not change with the magnetic die used, due to a very short time scale of testing. It was postulated that the increase in the extrudate swell due to the magnetic field for the PS melt was related to the increases in the existing electron de-localisation and a distortion of the electron clouds, induced by the applied magnetic field, within the benzene rings. This caused an increase in the shear stresses and a change in the molecular orientations during the flow (2). On molecular relaxation, the increased shear stresses were dissipated elastically and the molecular re-coiling process occurred, thus causing the increased swell. These findings were substantiated by testing the PC whose difference in the extrudate swell ratio between the magnetic and non-magnetic dies was in the range of 22-37%. For PVC, it was observed that the extrudate generated by the magnetic die had a better texture than that by the non-magnetic one, suggesting the applied shear stress exceeded the critical shear stress of the melt. When the magnetic field was applied to the molecules, the polarity and subsequently the dipole-dipole interaction between atoms in PVC increased, implying that the critical tensile stress of the PVC melt had increased, and thus the sharkskin characteristic disappeared (3).

Acknowledgement:

Thanks are expressed to TRF for financial supports to this work.

References:

- (1) Sombatsompop, N. & Dangtungee R (2001) *J. Appl. Polym. Sci.* (in press)
- (2) Amundson K. (1998) *Electric & Magnetic Field Effects on Polymeric Systems Exhibiting Long Range Orientational Order*. Marcel Dekker, New York.
- (3) Sombatsompop, N. & Wood, A.K. (1998) *Polym.-Plast. Tech. Eng.* 37, 317-336.