

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาปัจจัยของการล้างด้วยคลื่นเหนือเสียงต่อการเกิดรอยแผลบนผิวของร่องนำบอลของตลับลูกปืน ใช้เวลา 1 เดือนในการเก็บข้อมูลของปัจจัยต่างของเครื่องล้างด้วยคลื่นเหนือเสียง และตัวอย่างของตลับลูกปืนที่เกิดรอยแผล โดยในกระบวนการผลิตมีการควบคุมคุณภาพของวัตถุดิบ และขั้นตอนการผลิตให้อยู่ในมาตรฐานที่กำหนดไว้ เพราะถ้าคุณภาพไม่ได้ตามที่กำหนดก็จะมีผลกระทบต่อการใช้งานของลูกค้ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของเสียงและความสั่นสะเทือนของตลับลูกปืน ดังนั้นรอยแผลบนผิวของร่องนำบอลจึงเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างมากที่ต้องคำนึงถึง

การเก็บข้อมูลตลอดการทดลองจะเก็บข้อมูลของตลับลูกปืน โมเดลเดียว และใช้เครื่องล้างเครื่องเดียว โดยเครื่องล้างดังกล่าวประกอบด้วยถังล้างทั้งหมด 4 ถัง โดยถังลำดับที่ 1, 2 และ 3 มีการใช้คลื่นเหนือเสียงในกระบวนการล้าง ส่วนในถังที่ 4 ไม่ใช้คลื่นเหนือเสียง

4.1 ผลการวิเคราะห์

จากแนวทางการใช้เทคนิคแบบ 5W 1H และเทคนิคแบบ 4M ในการตั้งคำถามเพื่อทราบถึงต้นเหตุของปัญหาที่แท้จริง โดยรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องได้แก่

- แผ่นตรวจสอบ (Check Sheet) การทำงานของเครื่องจักร ซึ่งเป็นการตรวจเช็คเป็นรายวัน โดยรายการที่ตรวจเช็คได้แก่ อุณหภูมิของสารละลายในถังล้าง อัตราการไหลวนของสารละลาย การเช็คจำนวนอนุภาคในสารละลาย

- ปริมาณงานเสีย (เกิดรอยแผลบนผิวของตลับลูกปืน) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากจำนวนตลับลูกปืนทั้งหมดที่พบในแต่ละวัน

จากข้อมูลที่ได้จากแผ่นตรวจสอบ (Check Sheet) นำมาเขียนเป็นแผนภูมิเหตุและผล (Cause and Effect Analysis) หรือแผนผังก้างปลาเพื่อเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ปัญหา ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 แผนภูมิเหตุและผล (Cause and Effect Analysis) หรือแผนผังก้างปลา

4.1.1 การวิเคราะห์ภาพรวมสาเหตุของปัญหาด้วยแผนภูมิเหตุและผล (Cause and Effect Analysis) (6)

จากรูปที่ 4.1 แผนภูมิแสดงสาเหตุของการเกิดรอยแผลบนผิวตลับลูกปืนในกระบวนการล้าง พบว่าสาเหตุส่วนใหญ่มาจากความแปรปรวนของปัจจัย 4 ประการ คือ คน เครื่องจักร วิธีการทำงาน วัสดุ ซึ่งสามารถสรุปสาเหตุจากปัจจัยต่างๆ ได้ดังนี้

4.1.1.1 สาเหตุที่เกิดจากคนซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่มาจากสิ่งต่างๆ ดังนี้

- (1) พนักงานขาดความชำนาญในการทำงาน เนื่องจากต้องรับผิดชอบทำงานแทนพนักงานที่หยุด หรือเป็นพนักงานใหม่ทำให้ทักษะในการทำงานไม่เพียงพอ
- (2) ปัญหาสุขภาพของพนักงานทั้งทางด้านร่างกายและจิตใจ หรืออาจจะมีอาการเกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานที่ติดต่อกันเป็นเวลานานเกินไป ทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย
- (3) พนักงานไม่มีความตั้งใจในการทำงาน ขาดความรอบคอบในการทำงาน โดยมีข้อเสีย หรือสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นแล้วไม่ให้ความสนใจเท่าที่ควร

4.1.1.2 สาเหตุเกิดจากเครื่องจักรซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่มาจากสิ่งต่างๆ ดังนี้

- (1) คลื่นเหนือเสียง ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการทำความสะอาด ขจัดสิ่งสกปรกบนผิวชิ้นงาน ถ้าความถี่ หรือกำลังของคลื่นเหนือเสียงไม่สม่ำเสมอ อาจสูงหรือต่ำไป

(2) อุณหภูมิของสารละลายในถัง ซึ่งเป็นตัวกลางที่ทำให้คลื่นเหนือเสียงสัมผัสกับชิ้นงาน และสิ่งสกปรก อุณหภูมิที่สูง หรือต่ำเกินไป อาจส่งผลต่อลักษณะการเป็นตัวกลางของคลื่นเหนือเสียง

(3) อัตราการไหลวนของสารละลายในถัง มีอัตราเร็ว หรือช้าเกินไป

(4) ความสะอาดของสารละลายในถังล้างชิ้นงาน เนื่องจากสารละลายที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำทำความสะอาดภายในถังเป็นระบบหมุนเวียนใช้ในกระบวนการล้าง ดังนั้นสิ่งสกปรกต่างๆ เช่น เศษเหล็กชิ้นเล็ก ที่หลุดจากผิวชิ้นงาน เศษฝุ่น ผง จากหินขัด น้ำมันที่ติดมากับชิ้นงาน และสิ่งสกปรกอื่นๆ ก็จะสะสมอยู่ในสารละลาย จึงมีกระบวนการกรองสารละลายที่ไหลเวียนในถัง เพื่อลดปริมาณสิ่งสกปรกต่างๆ ในสารละลาย ซึ่งถ้าในสารละลายมีสิ่งสกปรกอยู่ย่อมมีผลต่อการสัมผัสกับผิวชิ้นงาน เช่น การสกปรกกลับบนผิวชิ้นงาน และอาจทำลายผิวของชิ้นงานหากเมื่อกระทบกับชิ้นงาน

(5) ความเข้มข้นของสารละลายในถัง อาจส่งผลต่อความหนืดของสารละลาย

4.1.1.3 สาเหตุเกิดจากวิธีการทำงานซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่มาจากสิ่งต่างๆ ดังนี้

(1) ปริมาณชิ้นงานที่ป้อนเข้าสู่เครื่องจักร จำนวนชิ้นงานที่มากเกินไปที่ป้อนอาจทำให้ประสิทธิภาพการล้างชิ้นงาน ลดลง และชิ้นงานที่อยู่ติดกันมากเกินไปอาจส่งผลต่อลักษณะการกระทบของคลื่นเหนือเสียงที่กระทบบนผิวชิ้นงาน

(2) ทิศทางของชิ้นงานที่ป้อนเข้าสู่เครื่อง

4.1.1.4 สาเหตุเกิดจากวัตถุดิบ สำหรับวัตถุดิบ ณ ที่นี้หมายถึง ส่วนประกอบต่างๆ ของตลับลูกปืนที่นำมาประกอบรวมกันเป็นตลับลูกปืน เช่น วงแหวนนอก วงแหวนใน เม็ดบอล เป็นต้น ในส่วนของปัญหาเนื่องจากวัตถุดิบ ได้แก่ ปัญหาฝุ่นหรือเศษโลหะที่ติดมาบนผิวชิ้นงานก่อนเข้าสู่เครื่องล้างชิ้นงานที่ทำการวิจัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.2 การใช้ FMEA (Failure mode and effective analysis) มาวิเคราะห์เพื่อหาลำดับความสำคัญของปัจจัยที่จะนำมาศึกษาหาผลกระทบที่มีต่อการเกิดรอยแผลบนผิวร่องนำบอล (21)

โดยการนำปัจจัยที่ได้จากการรวบรวมด้วยแผนภูมิเหตุและผลมาวิเคราะห์เพื่อหาลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดรอยแผลบนผิวของร่องนำบอล ซึ่งในการวิเคราะห์ด้วย FMEA จะพิจารณาภายใต้หลักการ สำคัญ 3 ประการ ได้แก่

4.1.2.1 ความรุนแรงของข้อบกพร่อง หรือผลกระทบ, Severity (S)

4.1.2.2 ความถี่ของการเกิดข้อบกพร่อง หรือ โอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง, Occurrence (O)

4.1.2.3 ความสามารถในการตรวจจับข้อบกพร่อง, Detection (D)

และนำมาจัดลำดับความสำคัญก่อน หลังของปัจจัยที่จะศึกษา ด้วยเลขกำหนดลำดับก่อน หลังตามความเสี่ยง (Risk priority number, RPN) โดย RPN เป็นผลคูณของ Severity, Occurrence และ Detection ดังสมการ 4.1

$$RPN = S * O * D \dots\dots\dots(4.1)$$

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วย FMEA เพื่อหาลำดับความสำคัญ หรือค่า RPN ของการเกิดรอยบนผิวร่องนำบอลโดยการนำปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการล้างด้วยคลื่นเหนือเสียง (ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากแผนภูมิเหตุและผล) มาแยกพิจารณาเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรง(S) โอกาสการเกิด (O) และความสามารถในการตรวจจับได้(D) ของปัจจัยต่างๆ โดยใช้เกณฑ์การประเมิน 10 ระดับ ซึ่งเมื่อทำการประเมิน ที่ระดับตัวเลขสูงๆ แสดงว่าปัจจัยดังกล่าวมีผลกระทบอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ จากนั้นจึงนำมาคำนวณหาค่า RPN โดยใช้สมการ (4.1) และจากการคำนวณพบว่า ค่า RPN ที่มีค่าสูงสุด 3 อันดับ ซึ่งแสดงระดับความสำคัญของสาเหตุการเกิดรอยแผลบนผิวของร่องนำบอล 3 ลำดับแรกนั้น มาจากสภาวะการทำงานของเครื่องจักร ได้แก่

ลำดับที่ 1 คือ อัตราการไหลวนของสารละลาย

ลำดับ ที่ 2 มี 2 ปัจจัยที่มีค่า RPN เท่ากัน คือ อุณหภูมิของสารละลาย และความสะอาดของสารละลายในถัง

และ ลำดับที่ 3 คือ ความสกปรกของชิ้นงานก่อนเข้าเครื่องล้าง

ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ข้างต้น จึงนำปัจจัย ลำดับที่ 1 และลำดับที่ 2 มาศึกษาลักษณะของผลกระทบต่อการเกิดรอยแผลบนผิวร่อนนำบอลต่อไป

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ด้วย FMEA เพื่อหาลำดับความสำคัญของสาเหตุการเกิดรอยแผลบนผิวร่อนนำบอลในกระบวนการล้างด้วยคลื่นเหนือเสียง

ความต้องการ	แนวโน้มของลักษณะข้อบกพร่อง	แนวโน้มผลจากข้อบกพร่อง	S	แนวโน้มของสาเหตุ	O	การควบคุมในปัจจุบัน	D	RPN (S*O*D)	ลำดับความสำคัญ
รอยแผลบนผิวร่อนนำบอล									
	การควบคุมเครื่อง	พนักงานขาดความชำนาญ	2	พนักงานใหม่พนักงานทำแทน	2	การฝึกงานก่อนเข้าทำงานจริง	1	4	6
		ปัญหาสุขภาพของพนักงาน	2	ความล้าจากการทำงาน	2	จำนวนพนักงาน	1	4	6
	สภาวะการทำงานของเครื่องจักร	ความถี่ หรือกำลังของแหล่งกำเนิดคลื่นเหนือเสียง	10	การปรับแต่งค่าของเครื่องจักร	1	ห้ามการปรับแต่ง	1	10	5
		อุณหภูมิมีการแกว่ง	10	แหล่งความร้อนมีปัญหา	4	การตรวจสอบ heater	2	80	2
		อัตราการไหลวนของสารละลายในถัง	8	ความสะอาดของฟิวเตอร์	6	การตรวจสอบ filter	2	96	1
		ความสะอาดของสารละลายในถัง	5	ความสะอาดของฟิวเตอร์	8	การตรวจสอบ filter	2	80	2
		ความเข้มข้นของสารละลาย	7	ความใหม่ของสารละลายในถัง	3	การเปลี่ยนถ่ายน้ำยา	2	42	4
	ลักษณะชิ้นงานที่ถูกป้อนเข้าสู่เครื่อง	จำนวนงานมากเกินไป	2	งานเร่งด่วน capacity ของเครื่อง	2	ออกแบบภาชนะเฉพาะงาน	3	12	6
	ทำให้ระบบของเครื่องสกรปรก	ความสกปรกของชิ้นงาน	4	การควบคุมกระบวนการก่อนหน้า	8	การสุ่มตรวจงานก่อนเข้าระบบ	2	64	3

4.1.3 การตรวจหารอยแผลบนผิวร่องนำบอลเนื่องจากการล้างด้วยคลื่นเหนือเสียง (17)

การตรวจหารอยแผลบนผิวร่องนำบอลทำโดยการฟังเสียงของตลับลูกปืนขณะหมุน ซึ่งขณะที่ตลับลูกปืนหมุนถ้าตลับลูกปืนมีความผิดปกติเกิดขึ้น ไม่ว่าจะเป็นกรณีของการเกิดรอย หรือรูปร่างของส่วนประกอบย่อยมีความผิดปกติ การหมุน และความสั่นสะเทือนของตลับลูกปืนจะสั่นมาก เสียงที่เกิดจากการหมุนจะมีระดับเสียงดังกว่ามาตรฐาน โดยปกติตลับลูกปืนจะมีการสั่นสะเทือนน้อยมาก และเป็นการสั่นแบบเรณูคอม แต่ถ้าหากตลับลูกปืนเสียจะทำให้การสั่นของตลับลูกปืนเปลี่ยนไปทุกๆครั้งที่ส่วนการหมุนพบกับส่วนที่ผิดปกติ จะทำให้สัญญาณพัลส์ไม่ต่อเนื่อง สัญญาณการสั่นแบบพัลส์จะเกิดขึ้นซ้ำๆกันทุกคาบเวลาที่มีพบกับตำแหน่งของส่วนที่ผิดปกติ และโดยความสมมาตรของตลับลูกปืน อัตราการซ้ำกัน หรือเรียกว่า ความถี่ตลับลูกปืน (bearing frequency) ซึ่งประกอบไปด้วย

- 1) ความถี่ BPFO (ball-passing frequency outer-race) เป็นความถี่ที่เกิดจากวงแหวนนอก
- 2) ความถี่ BPFI (ball-passing frequency inner-race) เป็นความถี่ที่เกิดจากวงแหวนใน
- 3) ความถี่ FTF (fundamental train frequency) เป็นความถี่พื้นฐานซึ่งเกิดจากโครงยึด (cage)
- 4) ความถี่ BSF (ball spin frequency) เป็นความถี่ในการหมุนของลูกปืน

ในการวิเคราะห์ความบกพร่องของตลับลูกปืน จะดูได้จากส่วนประกอบทางความถี่เหล่านี้ และลักษณะความถี่ของตลับลูกปืนที่มีรอยตำหนิหรือรอยแผลบนผิวของร่องนำบอล แสดงดังรูปที่ 4.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) เสียงปกติ

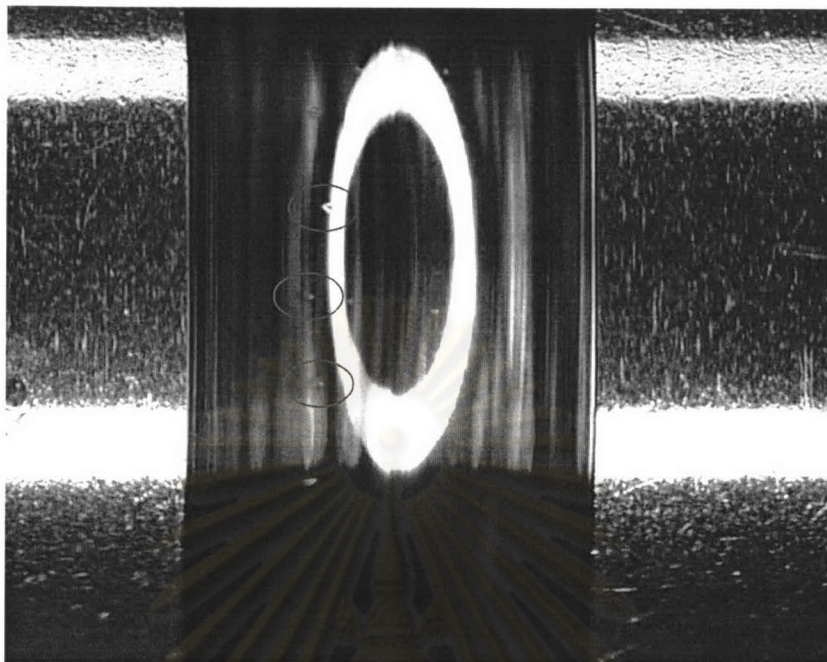


ข) เสียงจากรอยตำหนิ

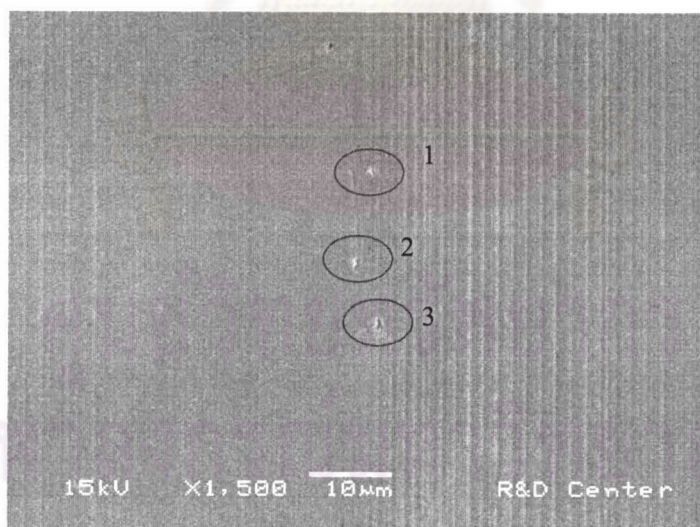
รูปที่ 4.2 คลื่นเสียงขณะที่ตลับลูกปืนหมุนเมื่อวัดด้วย Anderson meter

ตลับลูกปืนขณะหมุนที่พบว่ามีความถี่เสียงผิดปกติ ดังรูปที่ 4.2 ข) โดยมีรอยตำหนิ เช่น รอยนูนหรือรอยแผลที่ผิวของร่องนำบอล เมื่อตลับลูกปืนหมุนก็จะเกิดเสียงสั่น ซึ่งความถี่ของเสียงนี้จะมีสเปกตรัมสูงขึ้น จากลักษณะดังกล่าวจึงทำให้สามารถแยกได้ว่ามีรอยตำหนิหรือรอยแผลเกิดขึ้น จากนั้นจึงนำตลับลูกปืนมาแยกส่วนประกอบเพื่อดูลักษณะของรอยแผล ดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อดูรอยแผลบนผิวของร่องนำบอลด้วยกล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า มีรอยตำหนิเกิดขึ้น 3 รอย เรียงเป็นแถวเดียวกัน ตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



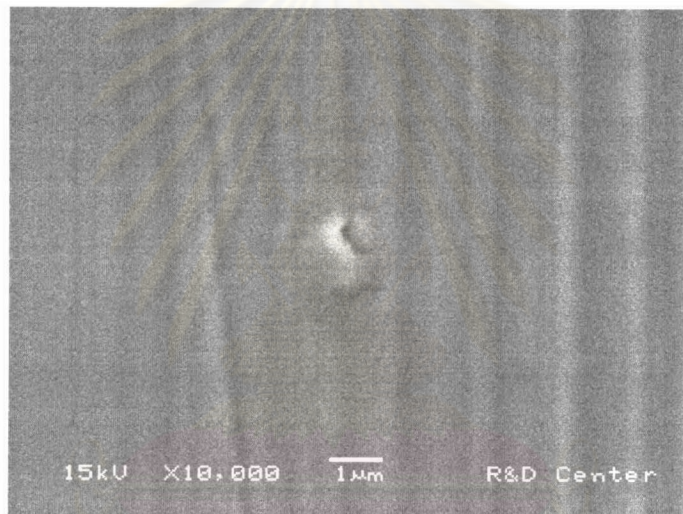
รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์ลักษณะผิวของร่องนำบอลที่เกิดรอยแผลเนื่องจากกระบวนการล้าง



รูปที่ 4.4 ภาพจาก SEM ลักษณะผิวของร่องนำบอลที่เกิดรอยแผลเนื่องจากกระบวนการล้าง

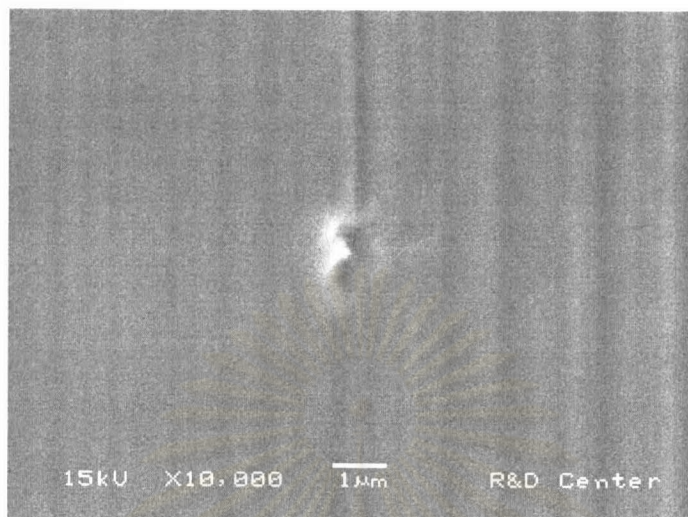
เมื่อเพิ่มกำลังขยายของเครื่อง SEM เพื่อพิจารณาขนาด และลักษณะรอยตำหนิ ดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 แสดงลักษณะรอยตำหนิแต่ละรอย พบว่าลักษณะของรอยแผลทั้ง 3 มีรูปร่าง ลักษณะเหมือนกัน คือเป็นรอยที่เกิดจากการกระแทก รอยแผลมีลักษณะเปิดผิวของร่องนำบอล และเป็นรอยที่

เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการขัดผิวร่อนนำบอล เพราะรอยแผลดังกล่าวเกิดขึ้นทับเส้นการขัดผิวร่อนนำบอล ขนาดรอยแผลทั้ง 3 รอย มีขนาดใกล้เคียงกัน, ประมาณ 1 ไมครอน และจากผลการวิเคราะห์ด้วย EDX ในรูปที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของรอยแผลดังกล่าวทั้ง 3 รอย พบว่ามีองค์ประกอบหลักเหมือนกัน คือ โครเมียม(Cr) เหล็ก(Fe) และซิลิกอน(Si) โดยโครเมียม(Cr) และเหล็ก(Fe) เป็นองค์ประกอบของเนื้อวัสดุของตั้บลูกปืนเอง คือ สเตนเลส ส่วนซิลิกอน(Si) ที่พบอาจมาจากสิ่งปนเปื้อนในกระบวนการผลิต เช่น หินขัด ซึ่งเมื่อตกค้างที่ผิวของตั้บลูกปืน เมื่อได้รับแรงกระแทก หรือการสั่นสะเทือน จึงกระแทกที่ผิวของร่อนนำบอลทำให้เป็นรอยและติดค้างที่ผิวได้

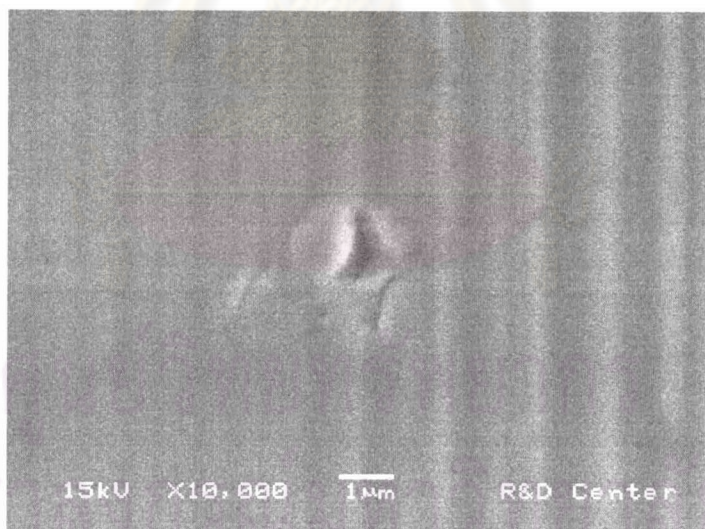


รูปที่ 4.5 ภาพจาก SEM ลักษณะผิวของร่อนนำบอลที่เกิดรอยแผลหมายเลข 1

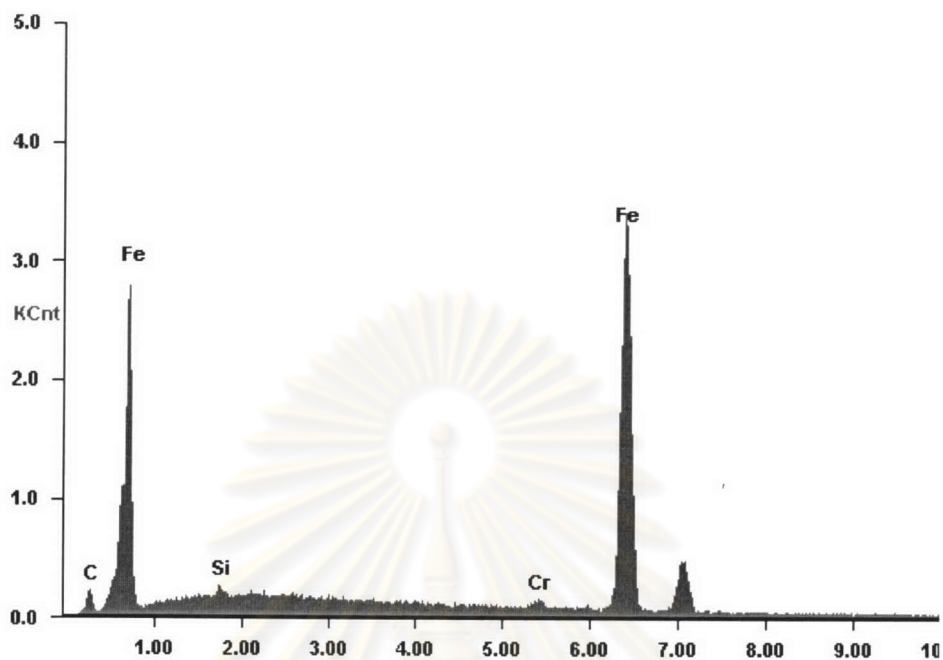
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.6 ภาพจาก SEM ลักษณะผิวของร่องนำบอลที่เกิดรอยแตกหมายเลข 2



รูปที่ 4.7 ภาพจาก SEM ลักษณะผิวของร่องนำบอลที่เกิดรอยแตกหมายเลข 3



รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ด้วย SEM-EDX แสดงส่วนประกอบทางเคมีที่รอยแผลทั้ง 3 รอย

4.1.4 สรุปข้อมูลปัจจัยต่างๆของเครื่องล้างโดยใช้คลื่นเหนือเสียง

จากตารางข้อมูลผลการทดลองในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1 – ตารางที่ ข.4 นำมาแสดงความถี่ (จำนวนวันที่เกิดขึ้น) ของปัจจัยต่างๆ ในเครื่องล้างที่ใช้คลื่นเหนือเสียงแต่ละถังล้าง

4.1.4.1 ข้อมูลของสารละลายในถังที่ 1 ซึ่งเป็นถังที่ล้างชิ้นงานในสารละลายที่ไม่มีการไหลวน นำมาแสดงอุณหภูมิค่าต่างๆ ของสารละลาย ดังตารางที่ 4.2 ค่าของอุณหภูมิที่ได้มี 5 ค่า ซึ่งมีความถี่ต่างกัน ดังแสดงด้วยแผนภูมิฮิสโตแกรม รูปที่ 4.9

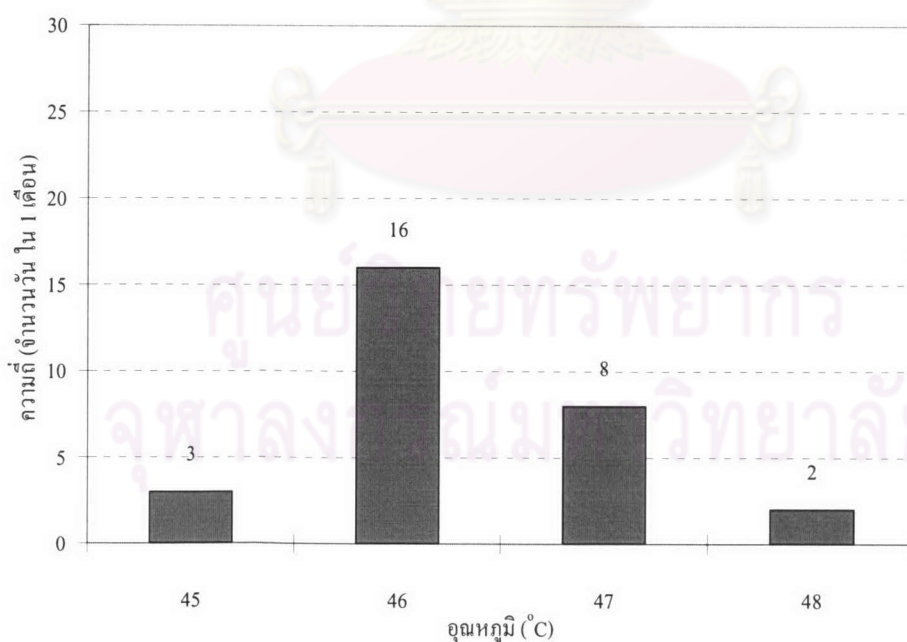
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.2 ค่าของอุณหภูมิของสารละลายในถังที่ 1 และค่าเฉลี่ยของงานเสียที่อุณหภูมิต่างๆ

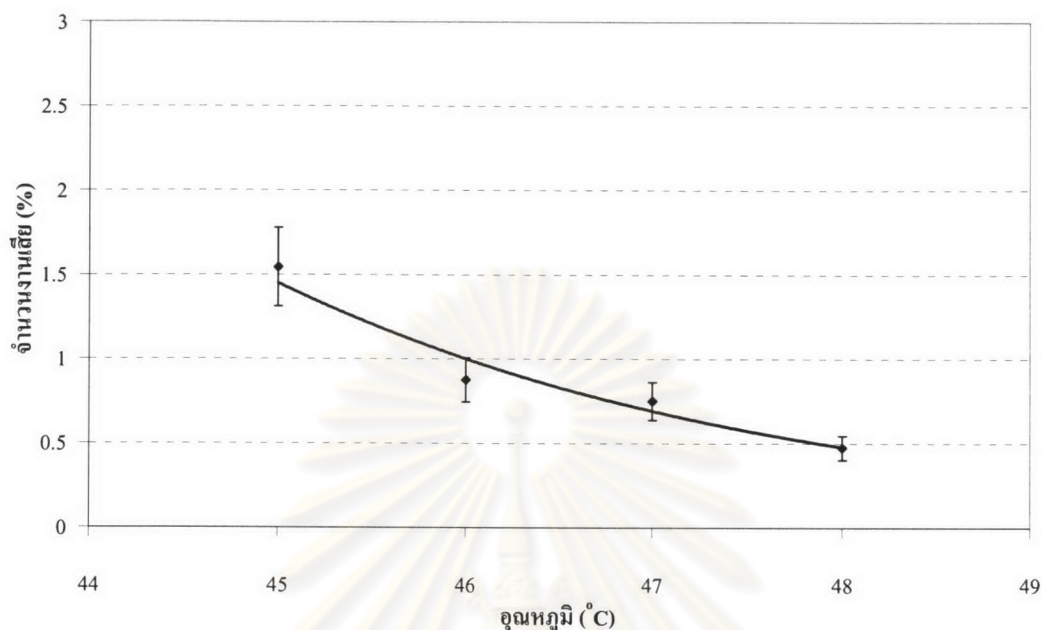
อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (จำนวนวัน ใน 1 เดือน)	ค่าเฉลี่ยของงานเสีย (%)
45	3	1.54
46	16	0.88
47	8	0.75
48	2	0.48

อุณหภูมิของสารละลายในถังที่ 1 ที่มีความถี่สูงสุด คือ ที่ 46 °C และมีการกระจายของอุณหภูมิที่พบใน 1 เดือน เป็นการกระจายแบบปกติ ส่วนจำนวนงานเสียเฉลี่ยที่พบในแต่ละอุณหภูมิของสารละลายมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารละลายมีค่าสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าเฉลี่ยของจำนวนงานเสียที่อุณหภูมิต่างกัน โดยจำนวนงานเสียสูงสุด และต่ำสุดที่อุณหภูมิของสารละลายในถังที่เพิ่มขึ้น จะมีค่าลดลงตามลำดับ จากอุณหภูมิ 45 °C ถึง 48 °C จำนวนงานเสียมีค่า 1.54 %, 0.88 %, 0.75 % และ 0.48 % ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 แผนภูมิฮิสโตแกรมแสดงความถี่ของอุณหภูมิของสารละลายในถังที่ 1

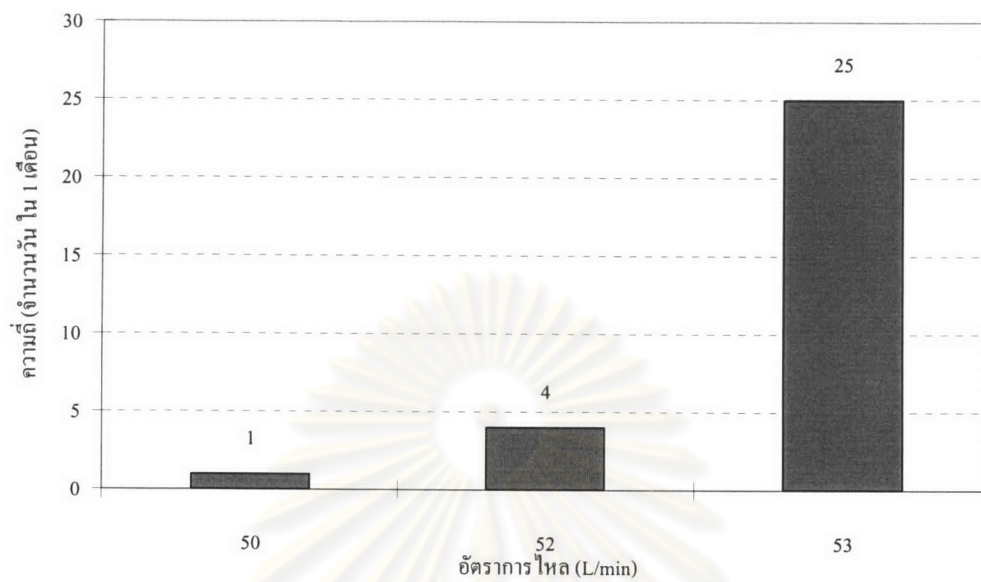


รูปที่ 4.10 ปริมาณงานเสียที่อุณหภูมิต่างๆของสารละลายในถังที่ 1

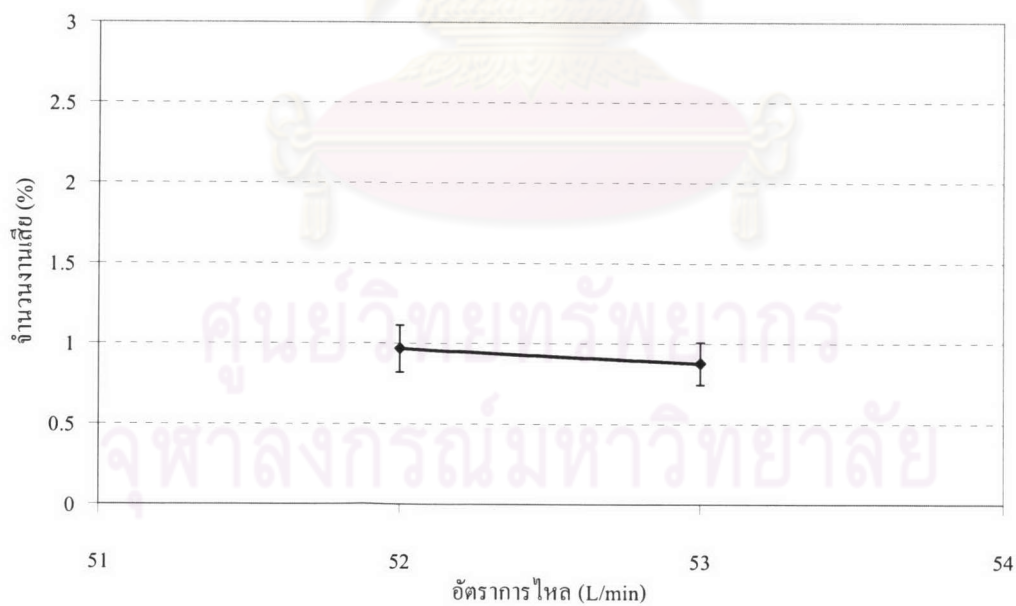
4.1.4.2 ข้อมูลของสารละลายในถังที่ 2 ซึ่งเป็นถังที่ล้างชิ้นงานในสารละลายที่มีการไหลวนของสารละลาย และมีอุณหภูมิต่างๆ กัน ดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ โดยจากตารางที่ 4.3 อัตราการไหลของสารละลายในถังที่ 2 มี 3 ค่าซึ่งมีความถี่ต่างกัน โดยมีความถี่สูงสุดที่อัตราการไหล 53 L/min รูปที่ 4.11 และค่าเฉลี่ยของงานเสียมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.12 โดยมีจำนวนงานเสีย 0.97 % และ 0.88 % ที่อัตราการไหล 52 L/min และ 53 L/min ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าอัตราการไหลของสารละลายในถังที่ 2 และค่าเฉลี่ยของงานเสียที่อัตราการไหลต่างๆ

อัตราการไหล (L/min)	ความถี่ (จำนวนวัน ใน 1 เดือน)	ค่าเฉลี่ยของงานเสีย (%)
50	1	1.17
52	4	0.97
53	25	0.88



รูปที่ 4.11 แผนภูมิฮิสโตแกรมแสดงความถี่ของอัตราการไหลของสารละลายในถังที่ 2

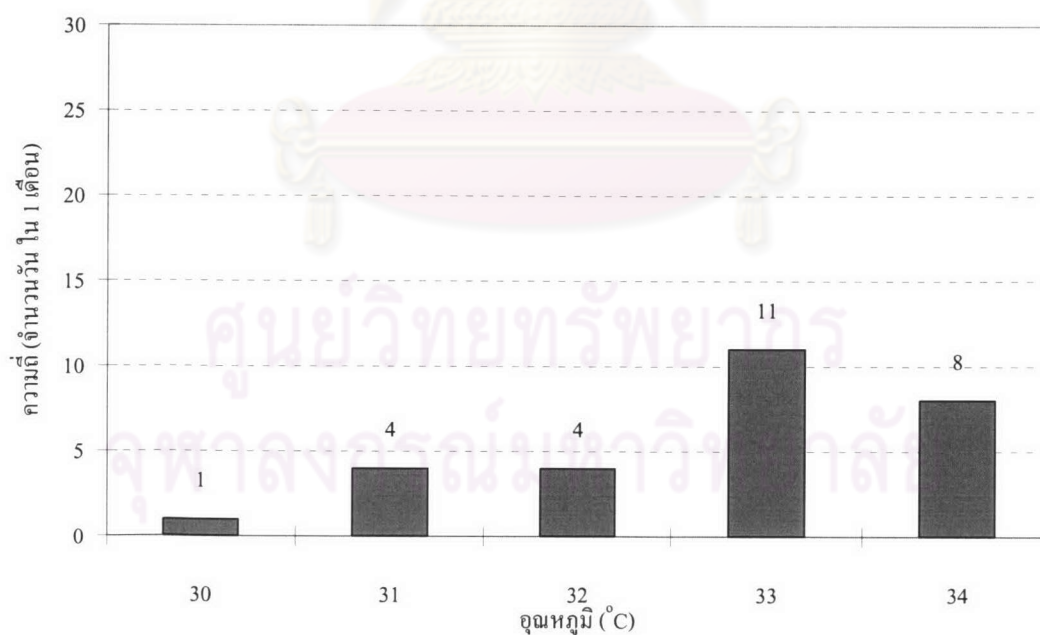


รูปที่ 4.12 ปริมาณงานเสียที่อัตราการไหลของสารละลายต่างๆในถังที่ 2

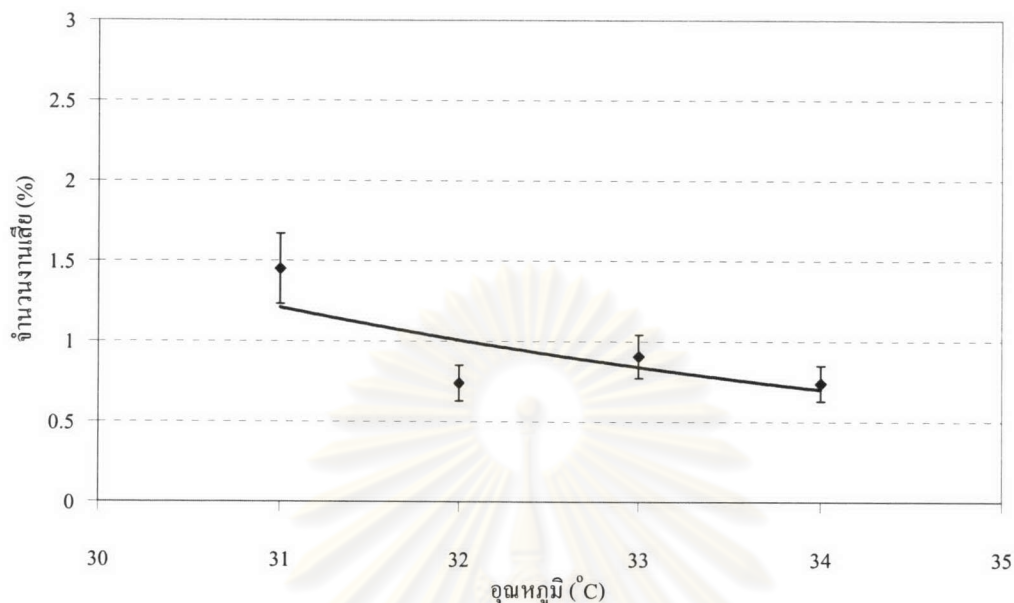
ส่วนตารางที่ 4.4 อุณหภูมิของสารละลายในถังที่ 2 มีการเปลี่ยนตั้งแต่ 30°C – 34 °C โดยมีความถี่สูงสุดที่อุณหภูมิ 33 °C ดังรูปที่ 4.13 และค่าเฉลี่ยของงานเสียมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.14

ตารางที่ 4.4 ค่าของอุณหภูมิของสารละลายในถังที่ 2 และค่าเฉลี่ยของงานเสียที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (จำนวนวัน ใน 1 เดือน)	ค่าเฉลี่ยของงานเสีย (%)
30	1	0.86
31	4	1.45
32	4	0.74
33	11	0.91
34	8	0.74



รูปที่ 4.13 แผนภูมิฮิสโตแกรมแสดงความถี่ของอุณหภูมิของสารละลายในถังที่ 2



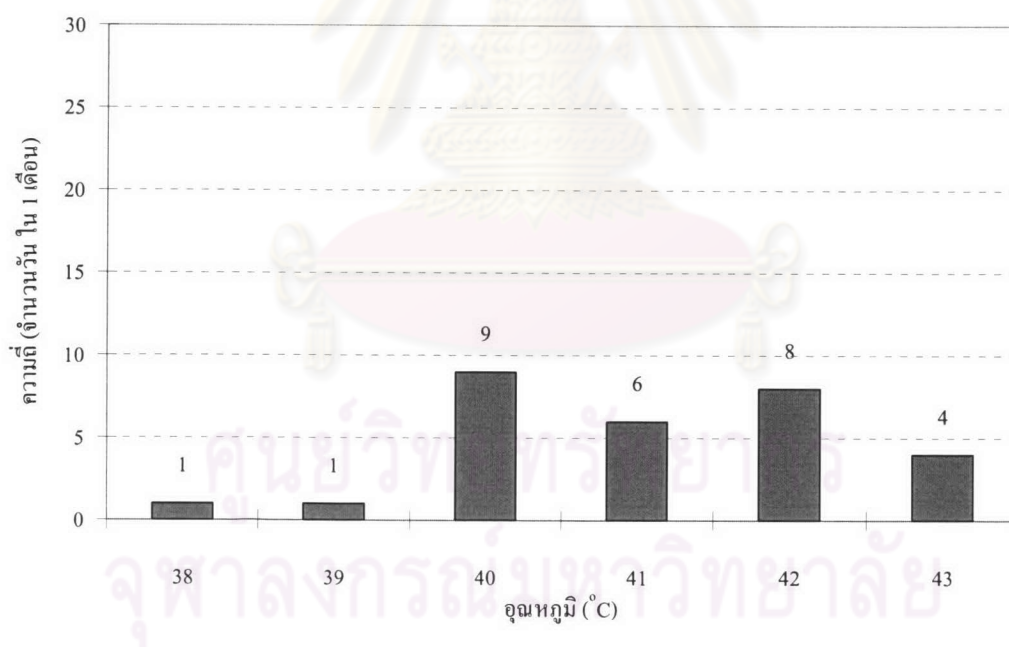
รูปที่ 4.14 ปริมาณงานเสียที่อุณหภูมิต่างๆของสารละลายในถังที่ 2

4.1.4.3 ข้อมูลของสารละลายในถังที่ 3 ซึ่งเป็นถังที่ล้างชิ้นงานในสารละลายที่มีการไหลวนของสารละลาย และมีอุณหภูมิต่างๆ กัน ดังตารางที่ 4.5 แต่อัตราการไหลของสารละลายตลอดช่วงของการเก็บข้อมูลมีค่าคงที่ ที่ 50 L/min โดยจากตารางที่ 4.5 อุณหภูมิของสารละลายในถังที่ 3 มีการเปลี่ยนตั้งแต่ 38°C – 43 °C โดยมีความถี่สูงสุดที่อุณหภูมิ 40 °C และ ที่ 42 °C ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.15 ค่าเฉลี่ยของงานเสียมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิ ของสารละลายมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.16 โดยจำนวนงานเสียเฉลี่ยที่อุณหภูมิ 40 °C – 43 °C ได้แก่ 0.98 % , 0.82 % , 0.81% และ 0.64 % ตามลำดับ

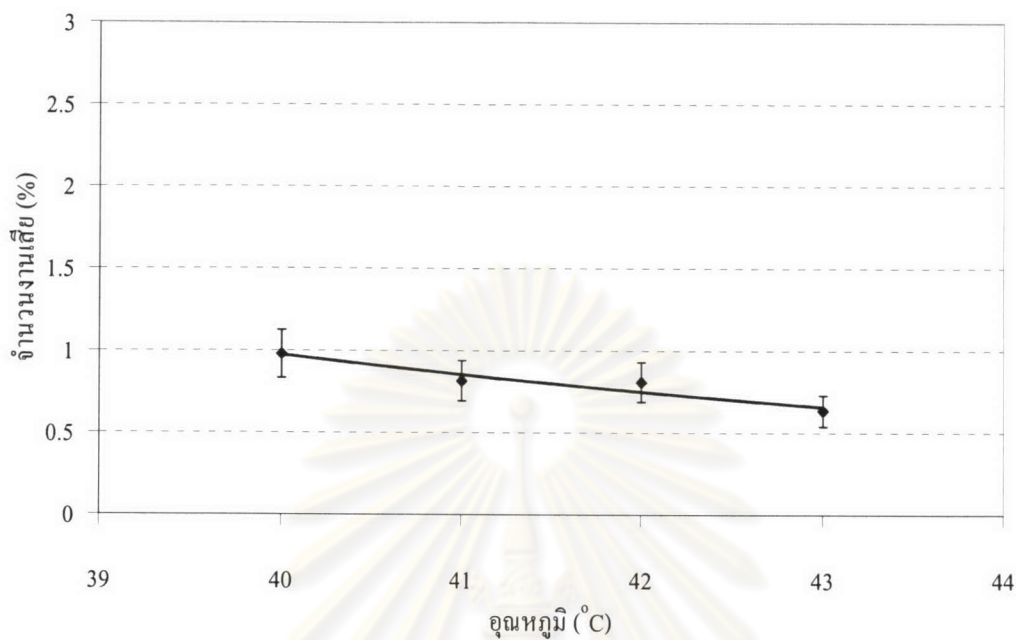
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ค่าของอุณหภูมิของสารละลายในถังที่ 3 และค่าเฉลี่ยของงานเสียที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความถี่ (จำนวนวัน ใน 1 เดือน)	ค่าเฉลี่ยของงานเสีย (%)
38	1	2.54
39	1	0.86
40	9	0.98
41	6	0.82
42	8	0.81
43	4	0.64



รูปที่ 4.15 แผนภูมิฮิสโตแกรมแสดงความถี่ของอุณหภูมิของสารละลายในถังที่ 3



รูปที่ 4.16 ปริมาณงานเสียที่อุณหภูมิต่างๆของสารละลายในถังที่ 3

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการทดลองของจำนวนงานเสียที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และอัตราการไหลของสารละลายต่างๆ

อัตราการไหล (L/min)	อุณหภูมิ (°C)	จำนวนงานเสีย (%)		
		การทดลองชุดที่ 1	การทดลองชุดที่ 2	ค่าเฉลี่ย
51	32	0.92	0.72	0.82
	33	1.07	1.21	1.14
	34	0.92	1.03	0.98
53	32	0.64	1.16	0.90
	33	0.66	1.15	0.90
	34	0.86	0.57	0.72

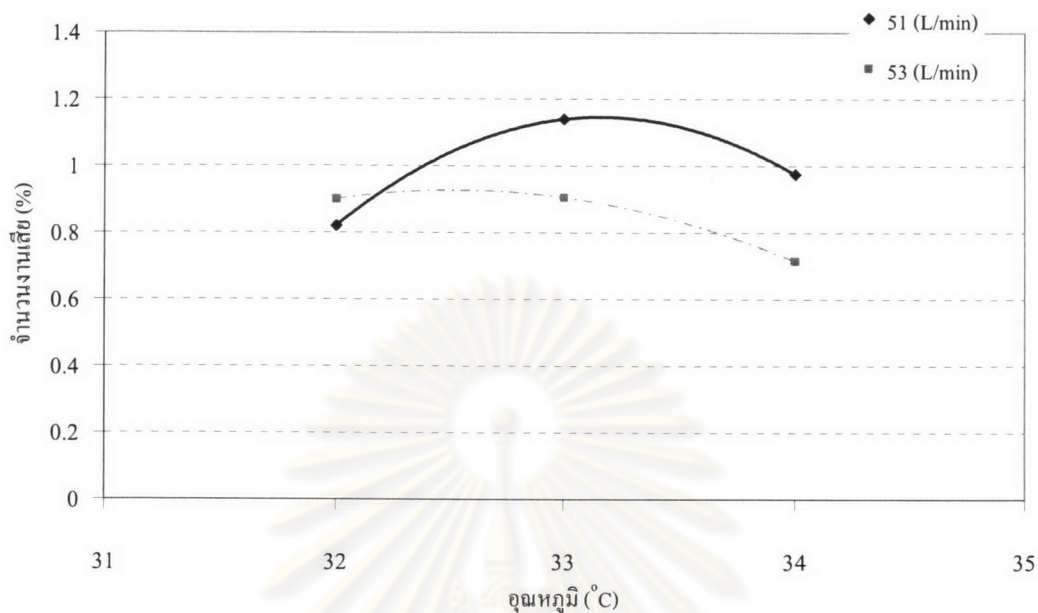
4.2 ผลการเปรียบเทียบ (8)

จากการเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยต่างๆของเครื่องล้างชิ้นงานต่อปริมาณงานเสีย เนื่องจากรอยแผลบนผิวของร่องนำบอลดั่งที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นำมาทำการทดลองที่อุณหภูมิ 3 ค่า ได้แก่ 32 °C, 33 °C และ 34 °C และอัตราการไหล 2 ค่า คือ 51 L/min และ 53 L/min โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 4.6

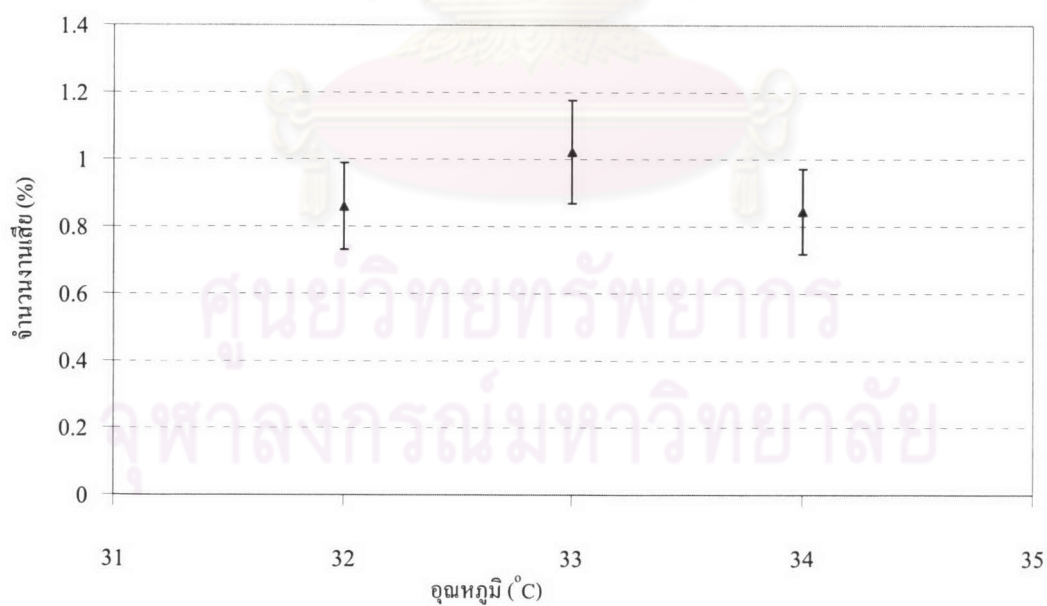
นำข้อมูลในตารางที่ 4.6 มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยจำนวนงานเสียของแต่ละสภาวะของการล้างชิ้นงาน เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป โดยผลการคำนวณค่าเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 4.7 และจากผลการคำนวณค่าเฉลี่ย นำไปพล็อตกราฟเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มของจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้นที่สภาวะดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.17 อธิบายด้วยเส้นกราฟ 2 เส้น ที่แสดงผลอุณหภูมิของสารละลายต่อจำนวนงานเสียที่อัตราการไหล 51 L/min (เส้นทึบ) และ 53 L/min (เส้นประ) ตามลำดับ พิจารณาที่อัตราการไหลของสารละลายเป็น 51 L/min จำนวนงานเสียที่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิ 33°C น้อยกว่าจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเป็น 34 °C อยู่ 16 % และเมื่อพิจารณาที่อัตราการไหล 53 L/min จำนวนงานเสียที่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิ 33°C น้อยกว่าจำนวนงานเสียที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของสารละลายเป็น 34 °C อยู่ 25 %

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของจำนวนงานเสียที่ขึ้นกับอุณหภูมิ และอัตราการไหลของสารละลายต่างๆ

อัตราการไหล (L/min)	จำนวนงานเสีย (%)			
	อุณหภูมิ (°C)			จำนวนงานเสียเฉลี่ย (%)
	32	33	34	
51	0.82	1.14	0.98	0.98
53	0.90	0.90	0.72	0.84
จำนวนงานเสียเฉลี่ย (%)	0.86	1.02	0.85	0.91



รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิของสารละลายในถึงต่อจำนวนงานเฉลี่ยที่เกิดรอยแผลบนผิวร่องนำบอล ที่แต่ละค่าของอัตราการไหลของสารละลาย



รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิของสารละลายในถึงต่อจำนวนงานเฉลี่ยที่เกิดรอยแผลบนผิวร่องนำบอล

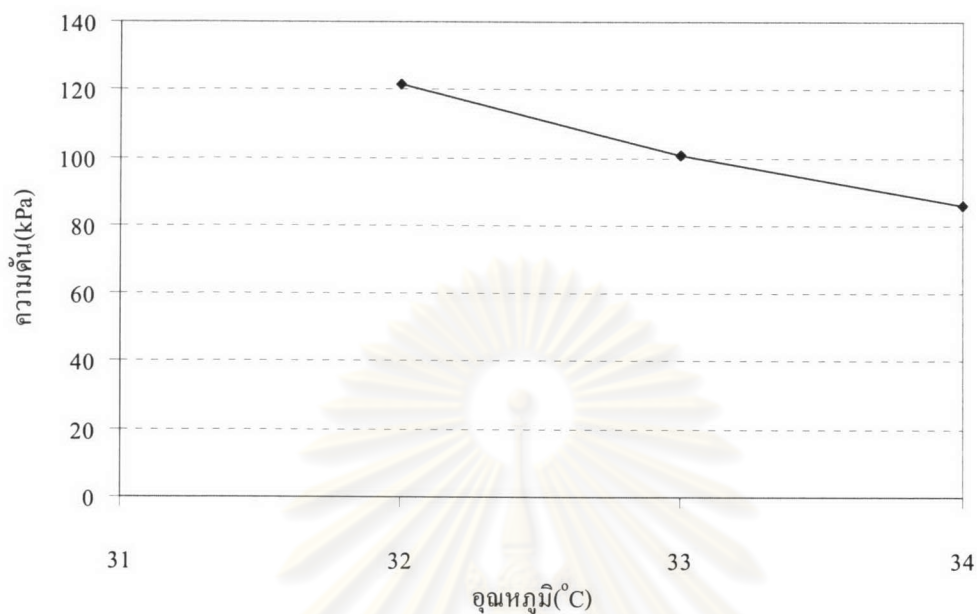
กล่าวโดยสรุปผลของอุณหภูมิต่อจำนวนงานเสียที่เกิดจากรอยแผลบนผิวหนังนำบอล จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออุณหภูมิของสารละลายในถังเพิ่มขึ้นจาก 33 °C เป็น 34 °C ปริมาณงานเฉลี่ยที่พบรอยแผลบนผิวหนังนำบอลมีจำนวนลดลงประมาณ 20 % ทั้งนี้เนื่องจากผลทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยเมื่ออุณหภูมิของสารละลายในถังเพิ่มขึ้น จะทำให้ค่าความหนืดของสารละลายมีค่าลดลง รวมทั้งค่าความดันไอของสารละลาย(vapor pressure) จะมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะส่งผลให้ค่าคาวิตีชันเทรโซลด์มีค่าลดลง คาวิตีชันจึงเกิดขึ้นได้ง่าย และทำให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากการยุบตัวของคาวิตีชันมีค่าลดลง (1) ดังสมการที่ (2.2) และจากสมการที่ (2.5) จะได้ว่าความดันสูงสุดเมื่อคาวิตีชันแตกออกมีค่าลดลง ดังนั้นแรงที่จะกระทำต่อผิวหนังของร่องนำบอลอันส่งผลต่อการทำลายผิวหนังของร่องนำบอลจึงลดลงด้วย โดยผลการคำนวณอุณหภูมิและความดันสูงสุดเมื่อคาวิตีชันแตกแสดงในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.19 เมื่ออุณหภูมิของสารละลายในถังสูงขึ้น จากสมการ (2.2) ทำให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของคาวิตีชันมีค่าลดลง และทำให้ความดันสูงสุดของคาวิตีชันมีค่าลดลงด้วย

นอกจากนี้ความหนาแน่นของคาวิตีชันที่เกิดมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำความสะอาดดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ (22) เพราะที่อุณหภูมิต่ำคาวิตีชันที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ และมีจำนวนน้อยกว่าจึงทำให้ประสิทธิภาพในการทำความสะอาดส่วนที่เป็นจุดบอดทำได้ไม่ดี

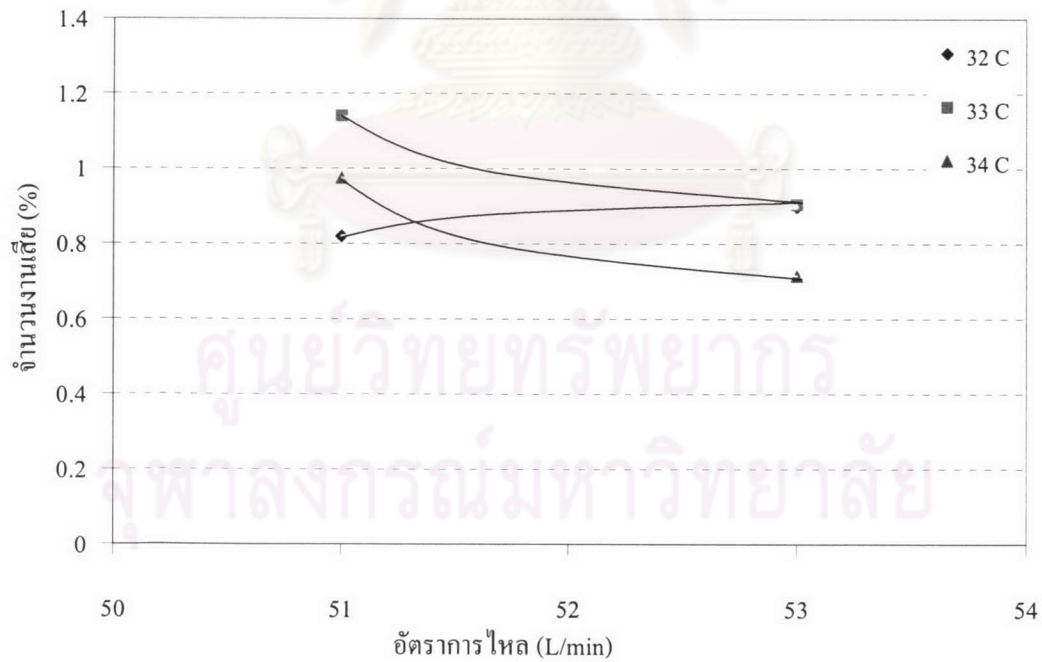
ตารางที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิของสารละลายต่ออุณหภูมิสูงสุด และความดันสูงสุดของคาวิตีชัน

อุณหภูมิสารละลาย, T_0 (°C)	อุณหภูมิสูงสุดในทางทฤษฎีที่เกิดจากคาวิตีชัน, T_{max} (°C)	ความดันสูงสุดในทางทฤษฎีของคาวิตีชัน (kPa)
32	2143	121
33	2023	101
34	1925	86

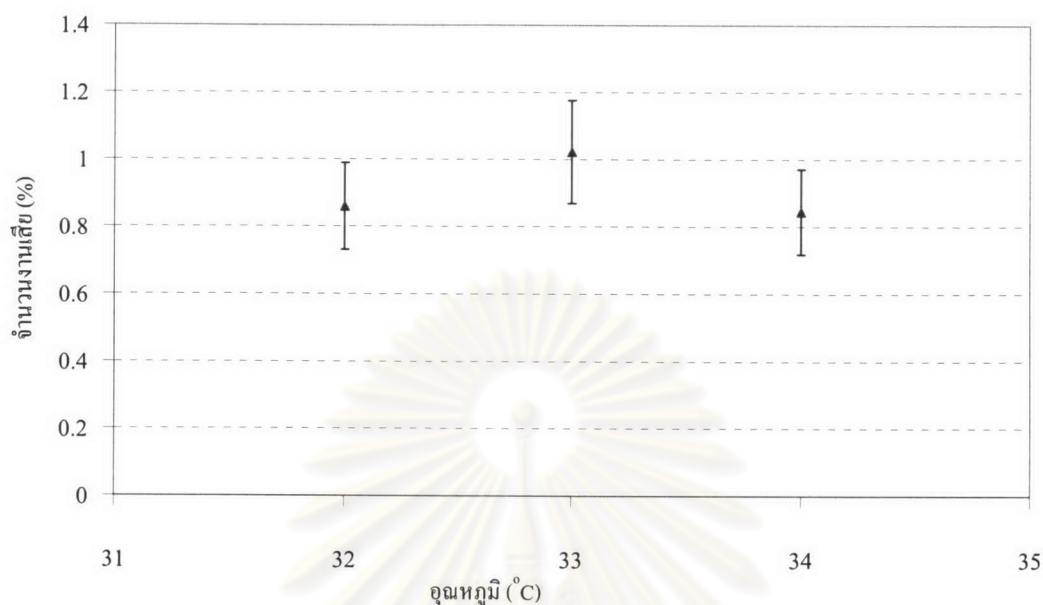
หมายเหตุ อุณหภูมิสูงสุด และความดันสูงสุดในตารางที่ 4.8 คำนวณได้จากสมการ (2.2) และ (2.5)



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารละลายกับความดันสูงสุดของคาวีเทชัน



รูปที่ 4.20 ผลของอัตราการไหลวนของสารละลายที่อุณหภูมิต่างๆ ต่อจำนวนงานเฉลี่ยที่พบรอยแผล



รูปที่ 4.21 ผลของอัตราการไหลวนของสารละลายในถังต่อจำนวนงานเฉลี่ยที่พบรอยแผล

ส่วนผลของอัตราการไหลวนของสารละลายในถังมีผลกระทบต่อการเกิดรอยแผลบนผิวร่องนำบอล กล่าวคือเมื่ออัตราการไหลวนของสารละลายมาก (53 L/min) พบว่าปริมาณงานเฉลี่ยที่พบรอยแผลบนผิวร่องนำบอลมีจำนวนน้อยกว่าเมื่อมีอัตราการไหลที่ต่ำ (51 L/min) โดยจากรูปที่ 4.20 จะเห็นว่าที่อุณหภูมิของสารละลายทั้ง 2 ช่วง คือ 33 °C และ 34 °C จำนวนงานเสียมีปริมาณลดลงเมื่อสารละลายในถังมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้นจาก 51 L/min เป็น 53 L/min โดยที่อุณหภูมิ 33 °C จำนวนงานเสียลดลง 21 % เมื่อเทียบกับอัตราการไหล 51 L/min และที่อุณหภูมิ 34 °C จำนวนงานเสียลดลง 26 % เมื่อเทียบกับอัตราการไหล 51 L/min หรือกล่าวโดยสรุปได้ว่าจำนวนงานเสียลดลงประมาณ 17 % เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้นจาก 51 L/min เป็น 53 L/min ดังแสดงในรูปที่ 4.21 เนื่องจาก เมื่ออัตราการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถดึงอนุภาค และสิ่งสกปรกออกจากผิวของร่องนำบอลได้ดีกว่าอนุภาคดังกล่าวจึงไปกระทบผิวหน้าของร่องนำบอลได้น้อยลง (16)

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ตัวแปร (อุณหภูมิ และอัตราการไหล) ในการทดลองชุดนี้ ดังตารางที่ 4.9 พิจารณาค่า MS_A , MS_B และ MS_{AB} เทียบกับ MS_E เพื่อเป็นการทดสอบความมีนัยสำคัญของอิทธิของปัจจัยหลักและอันตรกิริยา (ปัจจัยร่วม) ถ้ามีความแตกต่างกันเนื่องจากอุณหภูมิ (ปัจจัย A) MS_A จะมีค่ามากกว่า MS_E และในทำนองเดียวกับผลของอัตราการไหล และผลของอันตรกิริยา (MS_B และ MS_{AB} ตามลำดับ) ถ้ามีอิทธิพลต่อการเกิดรอยแผลบนผิวของร่องนำ

บอลลอยงมีนัยสำคัญ ค่า MS_B และ MS_{AB} จะมีค่ามากกว่า MS_E โดยจากการทดลองนี้พบว่าผลของอัตราการไหล (MS_B) มีค่ามากกว่า MS_E แสดงว่าอัตราการไหลมีอิทธิพล หรือผลต่อการเกิดรอยแผลบนผิวของร่อนนำบอลลอยงมีนัยสำคัญ (9)

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการเกิดรอยแผลบนผิวของร่อนนำบอล

Source of variation	Degree of freedom(DF)	Sum of squares (SS)	Mean squares (MS)
Block	1	0.0494	0.0494
Temperature(A)	2	0.0775	0.0387
Flow rate(B)	1	0.0574	0.0574
Interaction	2	0.0722	0.0359
Error(E)	5	0.284	0.0568
Total	11	0.540	

นอกจากนี้สำหรับกรณีของปัจจัยร่วมระหว่าง อุณหภูมิ กับอัตราการไหลของสารละลายในถังต่อการเกิดรอยแผลบนผิวร่อนนำบอลของตลับลูกปืนหรืออันตรกิริยา จากรูปที่ 4.17 จะเห็นว่าเส้นกราฟของงานเสียเนื่องจากอัตราการไหลต่างกันที่อุณหภูมิตั้งแต่ 32 °C – 34 °C ตัดกันในช่วงอุณหภูมิต่ำ และจากรูปที่ 4.20 เส้นกราฟของงานเสียเนื่องจากอุณหภูมิที่อัตราการไหล 51 L/min และ 53 L/min ตัดกันในช่วงอัตราการไหล ต่ำ แสดงว่าปัจจัยทั้งสองมีอิทธิพลหรือมีผลกระทบซึ่งกันและกันในการก่อให้เกิดรอยแผลบนผิวของร่อนนำบอล