

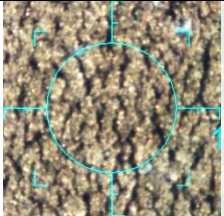
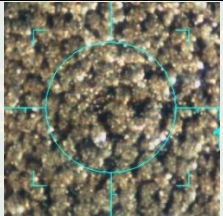
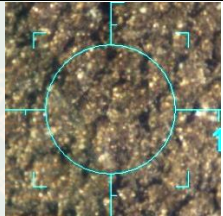
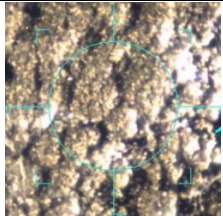
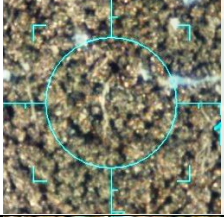
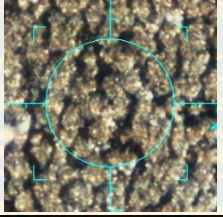
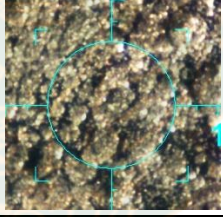
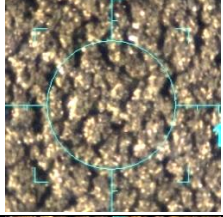
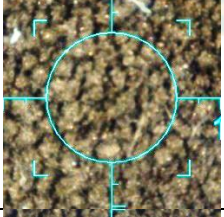
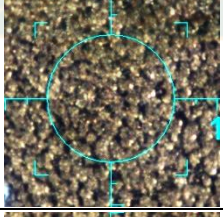
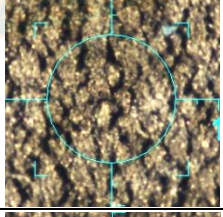
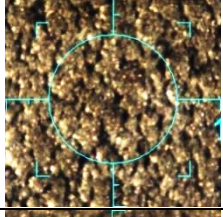

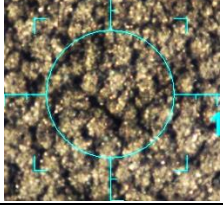
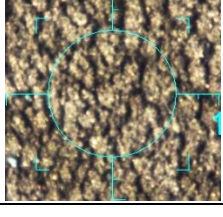
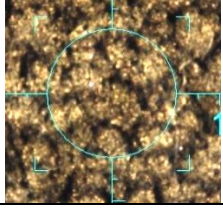
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิจัยนี้มีปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อชั้นเคลือบด้วยไฟฟ้าได้แก่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟฟ้า และปริมาณผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ดังนี้

5.1 ลักษณะพื้นผิวชั้นเคลือบ

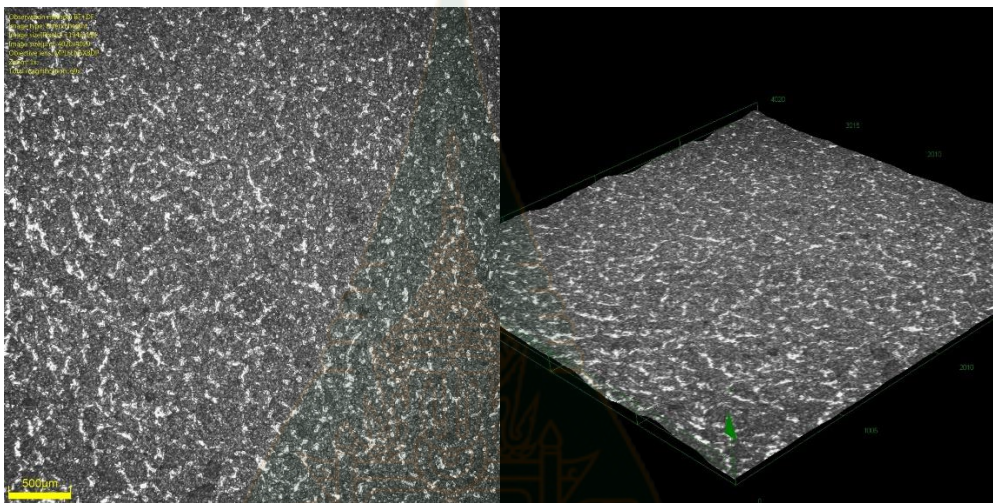
จากตารางที่ 5.1 พบว่าพื้นผิวชั้นเคลือบด้วยไฟฟ้ามีลักษณะเป็นก้อนหรือ Nodule เกาะติดกันทั่วพื้นผิวชั้นเคลือบ โดยขนาดของก้อนดังกล่าวโตขึ้นตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 5.1 ลักษณะของพื้นผิวชั้นเคลือบ

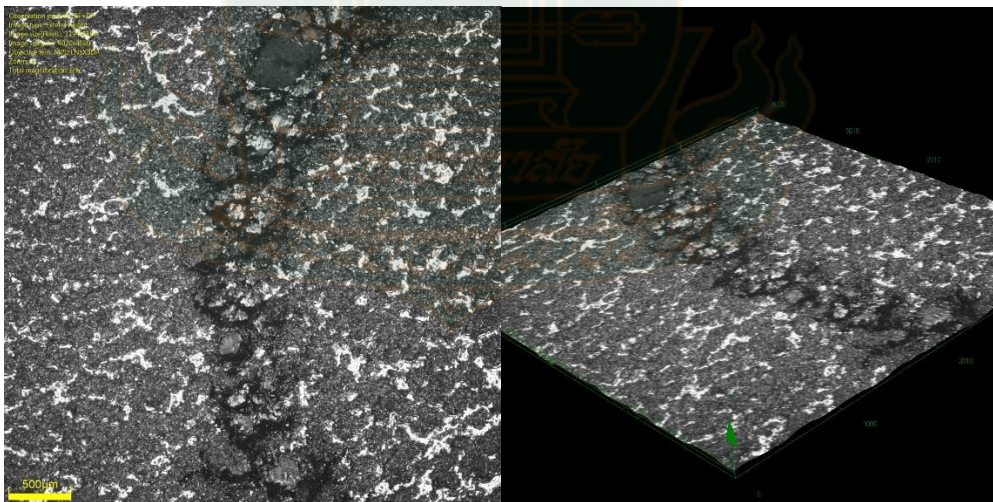
ความเข้มข้น MoS ₂ ในสารละลาย (g/l)	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟฟ้า (A/dm ²)			
	4	6	8	10
6				
8				
10				
12				

500 μm

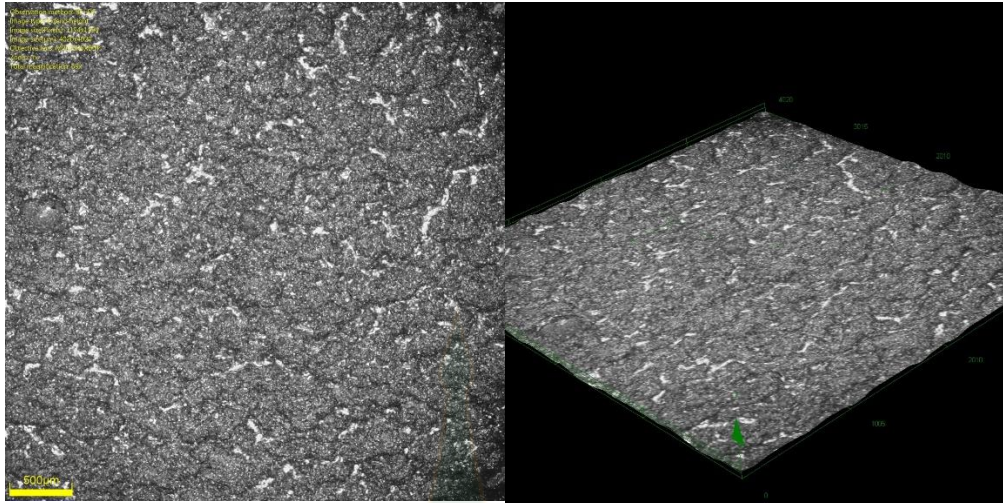
เมื่อพิจารณาลักษณะผิวชั้นเคลือบจากภาพที่ 5.1 (ก) (ค) พบว่าพื้นที่ส่วนใหญ่คือบริเวณของการรวมตัวของอนุภาคโพลีเอทิลีนไดออกไซด์กับนิกเกิล (พื้นที่สีดำ) ซึ่งมีลักษณะเป็นก้อนโคงมนคล้ายภูเขา โดยมีบริเวณที่เป็นนิกเกิล (พื้นที่สีขาว) แทรกตัวอยู่เป็นพื้นที่แคบ ๆ เพียงเล็กน้อยซึ่งอยู่ต่ำกว่าพื้นที่สีดำ นั่นคือ สภาวะจากปัจจัยทั้งความเข้มข้นของผงโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ ในสารละลายและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในงานวิจัยนี้ทุกค่าทำให้อนุภาคของโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ ปกคลุมพื้นผิวส่วนใหญ่ของชิ้นงานได้อย่างทั่วถึง ซึ่งทำให้อนุภาคโพลีเอทิลีนไดออกไซด์ทำหน้าที่รับการสัมผัสในขณะการเสียดสีได้โดยตรง ดังภาพที่ 5.1 (ข) (ง)



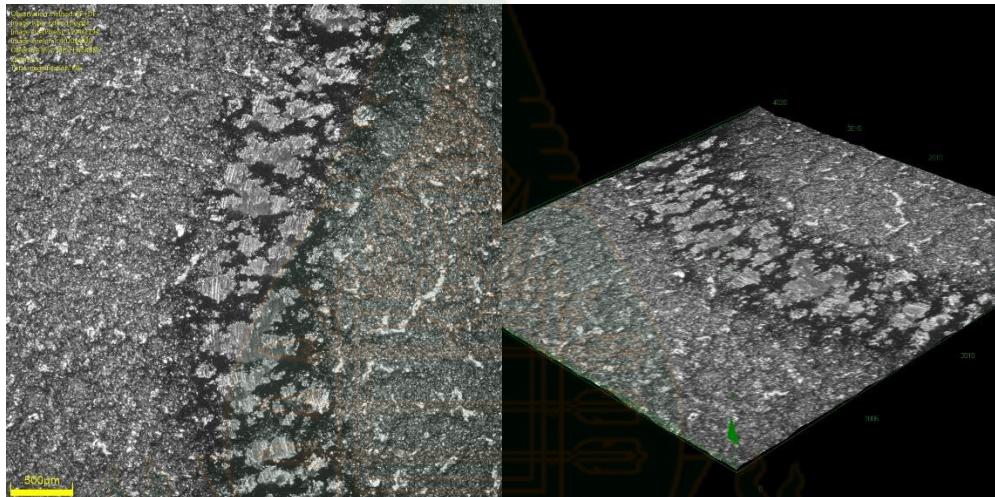
(ก)



(ข)



(ค)



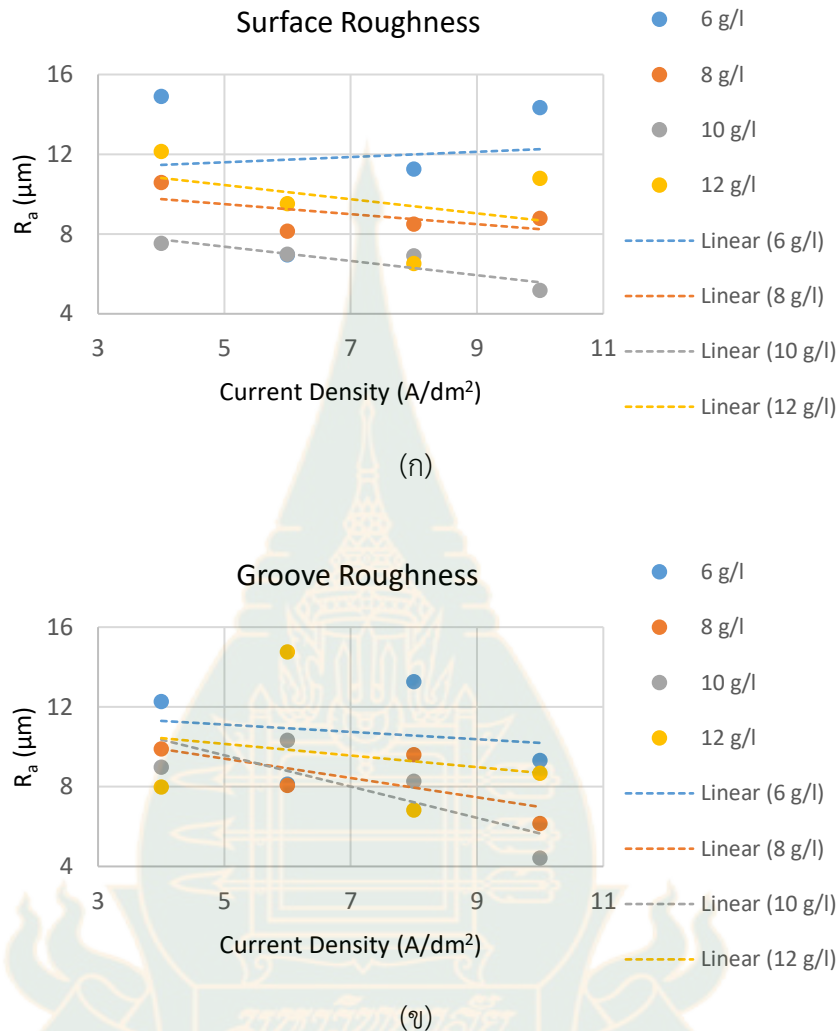
(ง)

- ภาพที่ 5.1 (ก) ลักษณะพื้นผิวและ (ข) รอยการเสียดสีจากการทดสอบด้วยวิธี Ball-On-Disk ของชั้นเคลือบที่ได้จาก ค่าความเข้มข้นผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายต่ำสุด (6 g/l) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่ำสุด (4 A/dm²)
- (ค) ลักษณะพื้นผิวและ (ง) รอยการเสียดสีจากการทดสอบด้วยวิธี Ball-On-Disk ของชั้นเคลือบที่ได้จาก ค่าความเข้มข้นผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายสูงสุด (12 g/l) และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด (10 A/dm²)

5.2 ความหยาบผิวของชั้นเคลือบ

จากภาพที่ 5.2 ค่าความหยาบผิวของชั้นเคลือบมีแนวโน้มลดลงตามค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟฟ้าสูงจะทำให้เกิดการโตของ

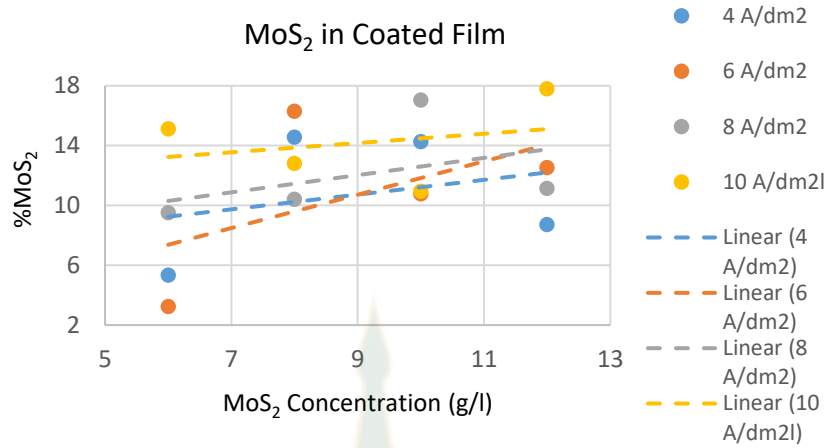
Nodule ทั้งตั้งและแนวนอน [13] ทำให้เกิดการรวมกันของ Nodule ที่อยู่ใกล้เคียงกลายเป็น Nodule ก้อนใหญ่ขึ้นพร้อม ดังภาพในตารางที่ 5.1



ภาพที่ 5.2 ค่าความหยาบผิว (ก) ผิวเคลือบชิ้นงาน (ข) ภายในรอยสัก

5.3 ส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบ

จากการวัดค่าส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบด้วยเครื่อง XRF ดังภาพที่ 5.3 พบว่าเมื่อผสมผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ลงในละลายอิเล็กโทรไลต์เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ปริมาณโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในชั้นเคลือบด้วยไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น



ภาพที่ 5.3 ปริมาณร้อยละ MoS₂ ในชั้นเคลือบด้วยไฟฟ้า

5.4 ปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบ

ค่าเฉลี่ยของความกว้างของรอยสึกจากการวัดด้วยเครื่อง Profilometer แสดงดังตารางที่ 4.1 สามารถนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของปริมาณการสึกหรอจากการทดสอบด้วยเครื่อง Ball-On-Disc ตามสมการที่ (5.1) [12] แสดงดังตารางที่ 5.2

$$V = \frac{\pi R d^3}{6r} \quad (5.1)$$

โดย V คือ ปริมาณการสึกหรอ
 d คือ ความกว้างรอยสึกหรอ
 R คือ รัศมีรัศมีรอยสึก
 r คือ รัศมีลูกบอลที่ใช้ทดสอบ

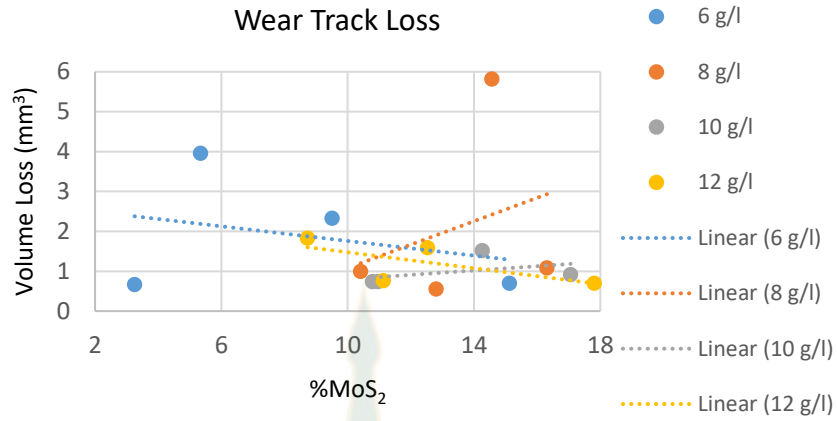
ตารางที่ 5.2 ปริมาณการสึกหรอของผิวเคลือบจากการทดสอบด้วยเครื่อง Ball-On-Disc

ปัจจัย		ผลการทดลอง
ความเข้มข้นผง MoS ₂ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์(g/l)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไฟฟ้า (A/dm ²)	ปริมาณการสึกหรอ (mm ³)
6	4	3.96
	6	0.67
	8	2.33
	10	0.7
	4	5.82

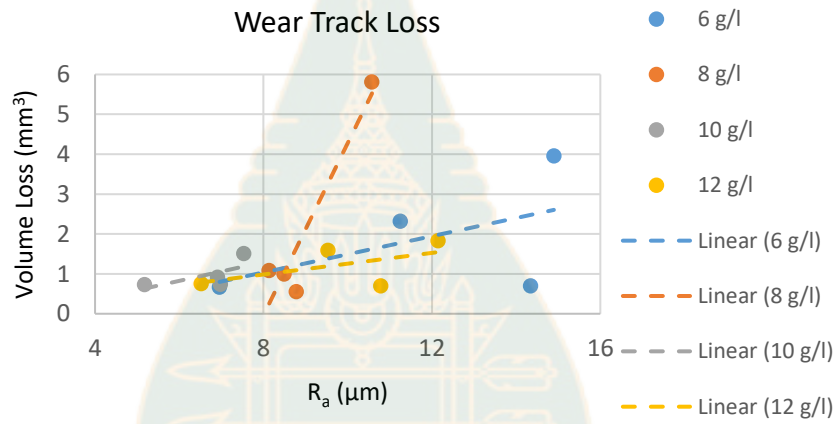
8	6	1.09
	8	1.00
	10	0.55
10	4	1.51
	6	0.74
	8	0.92
	10	0.74
12	4	1.83
	6	1.59
	8	0.76
	10	0.70

การสึกหรอขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมีและลักษณะพื้นผิวของชั้นเคลือบ [14, 15] สำหรับผิวเคลือบนิกเกิลผสมผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ ซึ่งผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์เป็นสารหล่อลื่นของแข็ง ดังนั้นหากมีปริมาณโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในชั้นเคลือบดังกล่าวมากจะยิ่งช่วยให้การสึกหรอน้อยลง [11, 16] อย่างไรก็ตามจากสมการที่ 5.1 เมื่อนำไปคำนวณค่าปริมาณการสึกหรอและสร้างกราฟด้วยข้อมูลจากตารางที่ 4.1 และ 5.2 ดังภาพที่ 5.4 พบว่าปริมาณการสึกหรอไม่มีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับส่วนผสมทางเคมีของชั้นเคลือบดังภาพที่ 5.4 (ก) ในขณะที่ความหยาบผิวมีแนวโน้มส่งผลกับปริมาณการสึกหรอโดยความหยาบผิวที่สูงขึ้นจะส่งผลให้การสึกหรอของผิวเคลือบเพิ่มมากขึ้นดังภาพที่ 5.4 (ข) นั่นคือการสึกหรอเกิดจากการกลไกการแตกหักของ Asperities หรือยอดปลายแหลมของ Nodule บนผิวชั้นเคลือบเมื่อสัมผัสกับลูกบอลอะลูมินาขณะเสียดสี [14]

นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่ได้จากทดสอบการสึกหรอไม่มีความสัมพันธ์อย่างชัดเจนกับปริมาณโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในชั้นเคลือบแม้ว่าโดยทั่วไปแล้วการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารหล่อลื่นของแข็งในชั้นเคลือบ จะช่วยให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำลงก็ตาม [14] แต่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายของชั้นเคลือบของชิ้นงานนี้ก็กลับมีแนวโน้มความสัมพันธ์แบบผกผันกับความหยาบผิว ดังภาพที่ 5.5 (ข) เนื่องจากผิวของลูกบอลอะลูมินาซึ่งมีค่าความหยาบผิวต่ำมาก ($0.01-0.03 \mu\text{m} R_a$ [17]) เมื่อสัมผัสกับชั้นเคลือบซึ่งมีความหยาบผิวสูงทำให้การสัมผัสระหว่าง Asperities ของ Nodule บนผิวชั้นเคลือบกับผิวลูกบอลอะลูมินามีพื้นที่สัมผัสน้อย ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายต่ำ

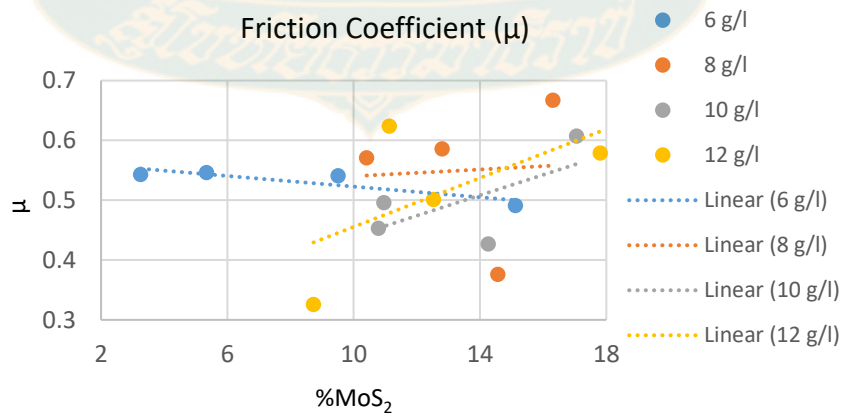


(ก)

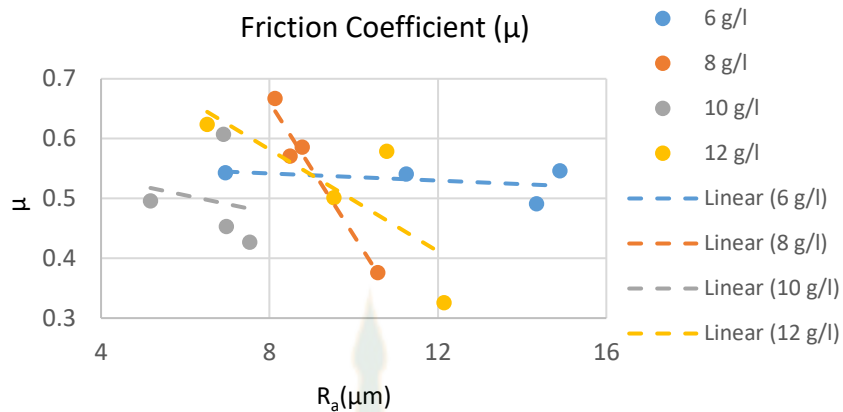


(ข)

ภาพที่ 5.4 ปริมาณการสึกหรอจากการทดสอบด้วยเครื่อง Ball-On-Disc สัมพันธ์กับ (ก) ปริมาณ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในชั้นเคลือบ (ข) ความหยาบผิวของชั้นเคลือบ



(ค)



(ข)

ภาพที่ 5.5 ปริมาณการสึกหรอจากการทดสอบด้วยเครื่อง Ball-On-Disc สัมพันธ์กับ (ก) ปริมาณ โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในชั้นเคลือบ (ข) ความหยาบผิวของชั้นเคลือบ

5.5 การหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ปริมาณการสึกหรอต่ำสุด

เพื่อทำการหาค่าของความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ทำให้ชั้นเคลือบสึกหรอต่ำที่สุด โดยทำการพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อการสึกหรอของชั้นเคลือบด้วยวิธีแฟคทอเรียล (Factorial) จากนั้นทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ที่ทำให้ปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุดด้วยวิธี 2^k แฟคทอเรียล (2^k Factorial) โดยวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยโปรแกรม Minitab version 19

5.5.1 การหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอ

จากการทดสอบการสึกหรอด้วยเครื่อง Ball-On-Disk ความกว้างของรอยสึกทั้ง 3 ค่าของชิ้นงานแต่ละชิ้นได้มาจากวัดด้วยเครื่อง Profilometer นำมาใช้ในการคำนวณหาปริมาณการสึกหรอทั้ง 3 ค่าด้วยสมการที่ 5.1 ซึ่งแสดงในตารางที่ 5.3 เพื่อพิจารณาว่าปัจจัยด้านความเข้มข้นของ MoS_2 ในสารละลาย ปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และปัจจัยจากอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ของความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบอย่างไรด้วยวิธีแฟคทอเรียล โดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้โปรแกรม Minitab version 19 ดังภาพที่ 5.6

ตารางที่ 5.3 ปริมาณการสึกหรอของผิวเคลือบจากการทดสอบด้วยเครื่อง Ball-On-Disc จากการวัดความกว้างของรอยสึกทั้ง 3 ค่าของแต่ละชิ้นงาน

ปัจจัย	ความกว้างของรอยสึก (mm)			ปริมาณการสึกหรอ (mm^3)		
	1	2	3	1	2	3

ความเข้มข้นผง MoS ₂ ใน สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (g/l)	ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้าไฟฟ้า (A/dm ²)						
6	4	1.67	2.37	2.69	1.63	4.66	6.85
	6	1.21	1.28	0.86	0.61	0.73	0.22
	8	2.48	1.26	1.91	5.29	0.70	2.43
	10	1.08	1.39	1.32	0.44	0.94	0.79
8	4	2.75	2.46	2.46	7.25	5.19	5.17
	6	1.71	1.36	1.31	1.75	0.87	0.78
	8	1.60	1.51	1.15	1.43	1.20	0.53
	10	1.00	1.23	1.27	0.35	0.64	0.72
10	4	1.61	1.18	2.10	1.46	0.57	3.24
	6	1.08	1.60	1.17	0.44	1.44	0.56
	8	1.11	1.35	1.68	0.48	0.85	1.66
	10	1.19	1.64	1.01	0.59	1.54	0.36
12	4	1.77	1.67	1.77	1.94	1.64	1.93
	6	1.56	1.90	1.52	1.32	2.38	1.22
	8	1.02	1.87	1.00	0.37	2.27	0.35
	10	1.60	1.02	1.16	1.47	0.37	0.54

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	100.57	6.705	5.57	0.000
Linear	6	65.13	10.856	9.02	0.000
MoS ₂	3	10.55	3.516	2.92	0.049
Current	3	54.59	18.195	15.11	0.000
2-Way Interactions	9	35.44	3.938	3.27	0.006
MoS ₂ *Current	9	35.44	3.938	3.27	0.006
Error	32	38.53	1.204		
Total	47	139.10			

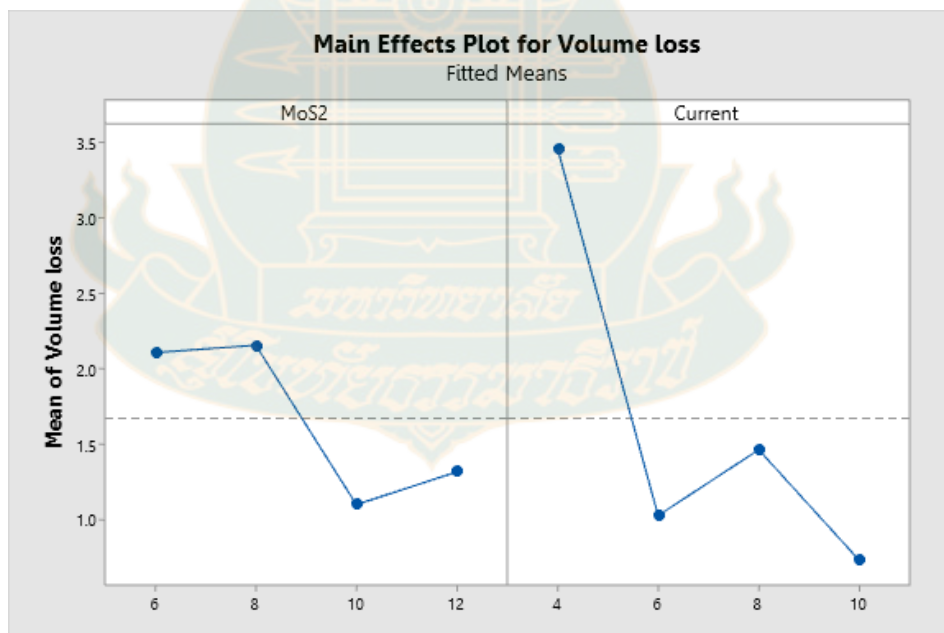
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
1.09728	72.30%	59.32%	37.68%

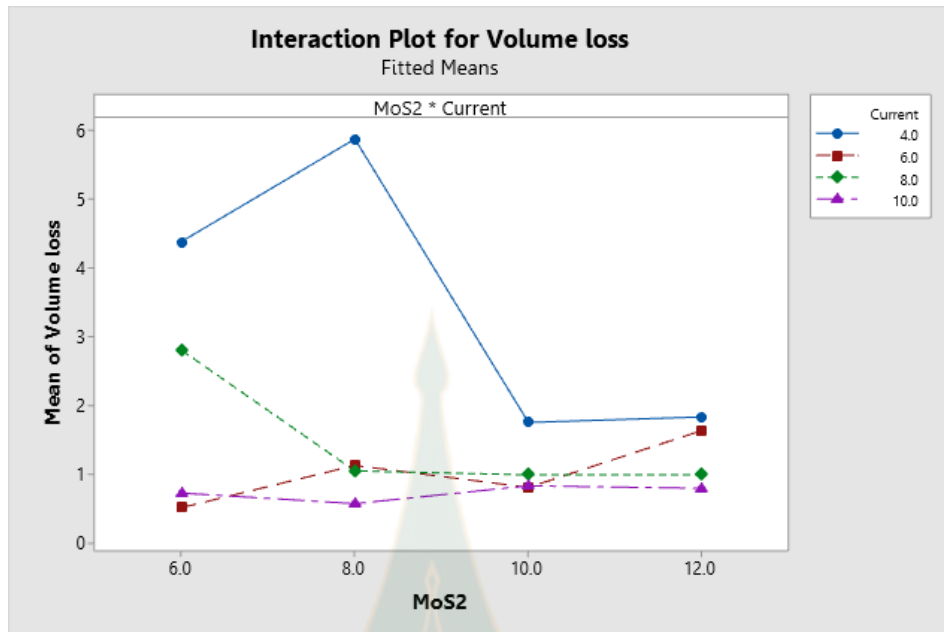
ภาพที่ 5.6 การพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบ โดยกำหนดค่า α (ความผิดพลาดที่ยอมรับได้) เท่ากับ 0.05

ในภาพที่ 5.6 นี้ ปัจจัยด้านความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลาย แทนด้วย “MoS2” ปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แทนด้วย “Current” และปัจจัยจากอิทธิพลร่วมของความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แทนด้วย “MoS2*Current” ซึ่งพบว่า ทุกปัจจัยดังกล่าวนี้ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบ เนื่องจากค่า P-Value น้อยกว่าค่า α ถึงแม้ว่าปัจจัยด้านความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายจะมีค่า P-Value มากกว่าค่า α ก็ตาม แต่เนื่องจากปัจจัยจากอิทธิพลร่วมของความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (“MoS2*Current”) มีค่า P-Value น้อยกว่าค่า α ดังนั้นปัจจัยด้านความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลาย จึงยังเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบเช่นกันกับปัจจัยอื่นตามหลักการ อาวุโสของอิทธิพล (Hierarchical Principle) [18] ดังนั้นปัจจัยทั้งหมดนี้จะถูกนำไปใช้หาค่าของสถานะเหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่ทำให้ปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุดด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองต่อไป

เมื่อนำค่าของปัจจัยความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลาย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และปริมาณการสึกหรอ มาสร้างกราฟดังภาพที่ 5.7 พบว่าความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอไปในทิศทางเดียวกัน คือค่าของปัจจัยทั้งสองมีแนวโน้มแปรผกผันกับปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ของปัจจัยความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลาย ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบ (ก) อิทธิพลของปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัย (ข) อิทธิพลร่วมของปัจจัยทั้งสอง

5.5.2 การหาสถานะเหมาะสมที่สุดของปัจจัย

จากข้อที่ 5.5.1 นำปัจจัยที่ส่งผลต่อการสึกหรอมาหาสถานะเหมาะสมที่สุด (Optimization) ของปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุดด้วยวิธี 2^k แฟคทอเรียล โดยใช้โปรแกรม Minitab version 19 นำค่าสูงสุดและต่ำสุดของปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัยรวมถึงปริมาณการสึกหรอจากตารางที่ 5.3 คือ ความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลาย (g/l) ได้แก่ 6 กับ 12 และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (A/dm^2) ได้แก่ 4 กับ 10 มาเป็นระดับของปัจจัยเพื่อหาความสัมพันธ์ของทั้งสองปัจจัยที่มีต่อปริมาณการสึกหรอในรูปแบบของสมการคณิตศาสตร์หรือสมการการถดถอย (Regression) โดยดำเนินการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

จากค่าสูงสุดและต่ำสุดของปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัยและค่าปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบ มาทำการวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อสถานะเหมาะสมที่สุดด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังภาพที่ 5.8 โดยกำหนดค่า α เท่ากับ 0.05 พบว่าค่า P-Value ของปัจจัยด้านความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลาย (“MoS2”) และ P-Value ของปัจจัยร่วมจากอิทธิพลร่วมของความเข้มข้นของผงโมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ในสารละลายกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (“MoS2*Current”)

มีค่ามากกว่าค่า α ดังนั้นจึงไม่นำปัจจัยดังกล่าวมาพิจารณาในการส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบ ดังนั้นจึงเหลือเพียงปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	26.278	8.759	4.79	0.034
Linear	2	21.156	10.578	5.78	0.028
MoS2	1	4.588	4.588	2.51	0.152
Current	1	16.567	16.567	9.06	0.017
2-Way Interactions	1	5.122	5.122	2.80	0.133
MoS2*Current	1	5.122	5.122	2.80	0.133
Error	8	14.633	1.829		
Total	11	40.910			

ภาพที่ 5.8 การพิจารณาปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบ โดยกำหนดค่า α (ความผิดพลาดที่ยอมรับได้) เท่ากับ 0.05

จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยอีกครั้งหนึ่งโดยพิจารณาเพียงปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ดังภาพที่ 5.9 ได้สมการการถดถอยคือสมการ (5.2) โดยค่า Lack-of-Fit มีค่า P-Value มากกว่าค่า α นั่นคือ

$$\text{ปริมาณการสึกหรอ (Volume Loss)} = 4.67 - 0.392 \times \text{ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current)} \quad (5.2)$$

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	1	16.567	16.567	6.81	0.026
Linear	1	16.567	16.567	6.81	0.026
Current	1	16.567	16.567	6.81	0.026
Error	10	24.343	2.434		
Lack-of-Fit	2	9.710	4.855	2.65	0.131
Pure Error	8	14.633	1.829		
Total	11	40.910			

Regression Equation in Uncoded Units

$$\text{Volume loss} = 4.67 - 0.392 \text{ Current}$$

Multiple Response Prediction

Variable	Setting				
Current	10				
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI	
Volume loss	0.758	0.637	(-0.661, 2.178)	(-2.997, 4.513)	

ภาพที่ 5.9 พิจารณาผลของปัจจัยด้านความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีต่อปริมาณการสึกหรอต่ำสุดของชั้นเคลือบ

จากสมการ (5.2) ปริมาณการสึกหรอของชั้นเคลือบจะมีค่าต่ำสุดเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด โดยความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดในการทดลองนี้คือ 10 A/dm^2 จะทำให้ชั้นเคลือบมีปริมาณการสึกหรอต่ำที่สุดคือ 0.758 mm^3 นั่นคือสภาวะเหมาะสมที่สุดคือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงที่สุดซึ่งทำให้ปริมาณการสึกหรอชั้นเคลือบต่ำที่สุดนั่นเอง

