



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบผิวโมลิบดีนัมคาร์ไบด์

ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

A study the Optimization of Molybdenum Carbide Coating
by Sputtering

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอรีส มณีสาย

นาย ปริญญา ศรีสัตยกุล

วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดินปี ๒๕๕๗



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบผิวโมลิบดีนัมคาร์ไบด์

ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

A study the Optimization of Molybdenum Carbide Coating
by Sputtering

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส มณีสาย

นาย ปริญญา ศรีสัตยกุล

วิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณแผ่นดินปี ๒๕๕๗

บทคัดย่อ

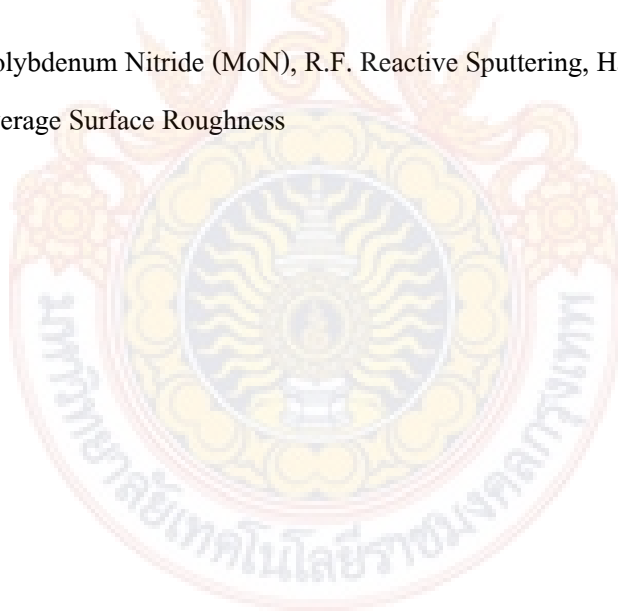
สมบัติทางกลบนผิวเคลือบด้วยเทคโนโลยีฟิล์มบางมีความสำคัญมากต่อการนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรม ได้แก่ สมบัติด้านความแข็ง และสมบัติด้านความหยาบผิว เป็นต้น โมลิบดีนัม (Mo) ถูกนำมาใช้กับงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายในงานด้านการหล่อลื่นในสภาวะที่อุณหภูมิสูง การควบคุมพารามิเตอร์ที่มีผลต่อคุณภาพผิวเคลือบ โมลิบดีนัมไนไตรด์ (MoN) นั้น เป็นการปรับปรุงอย่างมีระบบที่สามารถยืนยันความถูกต้องเกี่ยวกับผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อกระบวนการเคลือบผิว MoN ด้วยวิธีการกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอกทีฟสเปตเตอริงโดยการออกแบบการทดลองพารามิเตอร์ทั้ง 3 ในกระบวนการเคลือบผิว MoN ได้แก่ กระแสไฟฟ้า, แรงดัน และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน พารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อค่าความแข็งสูงสุดและค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) น้อยที่สุด ภายหลังการดำเนินการทดลองเชิงสถิติ พบว่า พารามิเตอร์ทั้ง 3 มีผลกระทบต่อค่าความแข็งและค่า Ra บทสรุปงานวิจัยเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบผิว MoN ด้วยวิธีการกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอกทีฟสเปตเตอริงที่สามารถทำให้ได้มาซึ่งค่าความแข็งสูงสุดและค่า Ra น้อยที่สุด ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.450 A, แรงดัน (Pressure) ที่ 0.010 mbar และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน (Ar/C₂H₂) ที่ 0.50

คำสำคัญ : โมลิบดีนัมไนไตรด์ (MoN), อาร์.เอฟ.รีแอกทีฟสเปตเตอริง, ความแข็ง, ความหยาบผิวเฉลี่ย

Abstract

Mechanical properties of coating surface from thin film technology were important industrial using e.g. hardness property and surface roughness property etc. Molybdenum (Mo) was used popular industrial working in lubricant of high temperature condition, Quality molybdenum carbide (MoN) coating controlled from coating parameters was improved by systematically investigating the influence of MoN r.f. reactive sputtering using experimental design. Three parameters of MoN coating including DC current, pressure, and Ar/N₂ were analyzed and optimized for maximum hardness and minimum average surface roughness (Ra). After conducting statistical experiment, it was found that the three coating parameters influenced the hardness and Ra. In conclusion, the optimal operating condition for MoN r.f. reactive sputtering that produced the maximum hardness and minimum Ra was obtained at DC of 0.450 A, pressure of 0.010 mbar, and Ar/N₂ ratio of 0.50.

Keyword : Molybdenum Nitride (MoN), R.F. Reactive Sputtering, Hardness,
Average Surface Roughness



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ.2557 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงสุด คือ บิดา มารดา ซึ่งคอยเป็นกำลังใจให้ในทุกโอกาส และให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างสูง จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

คณะผู้จัดทำโครงการ

ดลธรรม เอพกานนท์

ปริญญา ศรีสัตยกุล



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ซ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (Thin Film Process)	5
2.2 สเป็ตเตอริง (Sputtering)	5
2.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ^k	7
2.4 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง	8

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 การวางแผนงานวิจัย	13
3.2 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติสำหรับการเคลือบ MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสเป็ตเตอริง	13

บทที่ 4 สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบ

4.1 สถานะที่เหมาะสมเชิงสถิติ	22
4.2 กราฟพื้นผิวตอบสนอง	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	28
5.2 ข้อเสนอแนะ	29
บรรณานุกรม	30



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2 ^k	9
3.1	แผนงานวิจัยในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปีดเตอริง	13
3.2	การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปีดเตอริง	14
3.3	การทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2 ^k เพื่อใช้สำหรับการเก็บข้อมูล	15
3.4	ข้อมูลค่าความแข็ง (Hardness)	15
3.5	ข้อมูลค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra)	16
3.6	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียล 2 ^k กับค่าความแข็ง (Hardness)	17
4.1	ผลลัพธ์เชิงสถิติเกี่ยวกับการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม	22
5.1	พารามิเตอร์ในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปีดเตอริง	28



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริง	2
2.1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	5
2.2 กระบวนการสปัตเตอริงเชิงฟิสิกส์	6
2.3 ระบบการเคลือบแบบสปัตเตอริง : A , แอโนด ; T, เป้า ; S, ชิ้นงาน ; P, พลาสมา	6
3.1 กราฟอิทธิพลหลักของพารามิเตอร์ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ	18
3.2 กราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ	18
4.1 ผลลัพธ์เชิงสถิติเกี่ยวกับการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม	23
4.2 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันต่อค่าความแข็ง	24
4.3 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างแรงดันกับอัตราส่วน Ar/N ต่อค่าความแข็ง	24
4.4 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราส่วน Ar/N ต่อค่าความแข็ง	25
4.5 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันต่อค่าความหยาบผิว (Ra)	26
4.6 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างแรงดันกับอัตราส่วน Ar/N ต่อค่าความหยาบผิว (Ra)	26
4.7 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราส่วน Ar/N ต่อค่าความหยาบผิว (Ra)	27

บทที่ 1

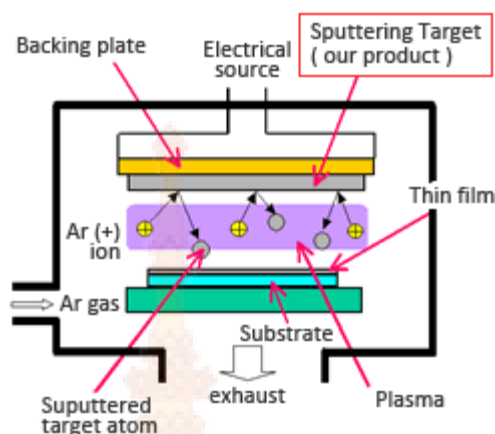
บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การเคลือบผิวด้วยเทคโนโลยีฟิล์มบาง เป็นการทำให้ชั้นอะตอมหรือกลุ่มอะตอมจับรวมตัวกันเป็นชั้นบางๆ บนผิวของวัสดุ วัตถุประสงค์หลักของการเคลือบผิวด้วยเทคโนโลยีฟิล์มบางนี้ เพื่อปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุให้เป็นไปตามที่ต้องการ ได้แก่ การเพิ่มความต้านทานการสึกหรอ และการเปลี่ยนสมบัติการนำไฟฟ้า เป็นต้น เทคโนโลยีฟิล์มบางนี้แบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพแก๊สและเกิดปฏิกิริยาเคมีเป็นสารใหม่เคลือบบนผิววัสดุ เรียกว่า Chemical Vapor Deposition (CVD) และกลุ่มที่อาศัยการทำให้อะตอมสารเคลือบหลุดออกจากผิวสารเคลือบด้วยความร้อนหรือการถ่ายเทโมเมนตัมแล้วฟุ้งกระจายเข้าจับและยึดติดกับผิววัสดุรองรับ เรียกว่า Physical Vapor Deposition (PVD) ซึ่งกระบวนการ PVD นี้ เป็นที่นิยมมากกว่า [1] และหากเคลือบแบบหลายชั้น (Multi-layer) ความต้านทานการสึกหรอจะเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า [2] ทั้งนี้ความแข็งของผิวเคลือบขึ้นอยู่กับวัสดุที่เคลือบและผิวเดิมของชิ้นงานด้วย [3] กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบ PVD แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ การทำให้เป็นไอโดยความร้อน (Thermal Evaporation) การเคลือบด้วยไอจากการอาร์ก (Arc Vapor Deposition) และการสปัตเตอร์ริง (Sputtering) ซึ่งกระบวนการทำให้เป็นไอโดยความร้อนและการเคลือบด้วยไอจากการอาร์กนั้นยังมีข้อจำกัดคือใช้ได้กับโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเท่านั้น และการยึดติดกับผิวทำได้ไม่ดีมากนัก [4] และกระบวนการเคลือบด้วยไอจากการอาร์ก ก็มีข้อจำกัดเช่นเดียวกัน นั่นคือ จะต้องใช้กระแสไฟฟ้าค่อนข้างสูง และการจัดวางตำแหน่งของการหลอมเหลวในระบบค่อนข้างจำกัด [5] ดังนั้น กระบวนการเคลือบผิวด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงจึงเป็นที่นิยมและมีการใช้งานกันแพร่หลาย

พารามิเตอร์ในการเคลือบผิวด้วยวิธีสปัตเตอร์ริงนั้น มีอยู่มากมายหลายพารามิเตอร์ด้วยกัน แต่ละพารามิเตอร์ก็จะมีอิทธิพลที่แตกต่างกันออกไป Kazamanli, Urgan และ Cakir [7] ได้ศึกษาผลกระทบของความดันของไนโตรเจน ความต่างศักย์ไบแอส (Bias Voltage) และอุณหภูมิของชิ้นงาน ที่มีต่อโครงสร้างของผิวเคลือบ ผลการศึกษาพบว่า พารามิเตอร์ทั้ง 3 สามารถทำให้เกิดโครงสร้างของผิวเคลือบที่แตกต่างกัน คือ เกิดโครงสร้างแบบ Hexagonal และ Cubic โดยความดันของไนโตรเจนที่ระดับสูงจะมีอิทธิพลเสริมให้เกิดโครงสร้างแบบ Hexagonal และเมื่อความดันต่ำกว่า จะทำให้เกิดโครงสร้างแบบ Cubic และเมื่อพิจารณาความต่างศักย์ไบแอส พบว่า เมื่อความต่าง

ศักย์สูง จะเกิดโครงสร้างเป็นแบบ Cubic และเมื่อความต่างศักย์ต่ำก็จะเกิดโครงสร้างเป็นแบบ Hexagonal ซึ่งอิทธิพลของอุณหภูมิชิ้นงานก็มีลักษณะคล้ายคลึงกับความต่างศักย์



ภาพที่ 1.1 การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริง [6]

เทคโนโลยีการเคลือบผิวบางด้วยกระบวนการสปัตเตอริงในปัจจุบัน มีการนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายกับผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรม อาทิเช่น เครื่องมือตัด และชิ้นส่วนเครื่องจักรกลต่างๆ เป็นต้น โดยมีวัตถุประสงค์เดียวกัน นั่นคือ เพิ่มสมบัติทางกลให้ดียิ่งขึ้น ได้แก่ ความแข็งแรง, ความทนทานต่อการเสียดสี และความต้านทานต่อการสึกกร่อน เป็นต้น วัตถุประสงค์ที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการเลือกใช้วิธีการเคลือบโลหะด้วยวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering) นั้น คือ ผิวที่เคลือบวัสดุมีความหนาไม่มากนัก (ประมาณ $\leq 3 \mu\text{m}$) ทำให้การควบคุมความหนาภายหลังการเคลือบนั้น จำเป็นต้องทำให้มีความแม่นยำถูกต้องเพื่อความสอดคล้องต่อความต้องการใช้งานด้วยวัสดุโมลิบดีนัม (Mo) ถูกนำมาใช้กับงานอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลายในงานประเภทงานหล่อลื่นในสถานะที่อุณหภูมิสูง ดังนั้น จึงมีการนำเอาวัสดุ Mo มาเคลือบบนชิ้นส่วนงานกลต่างๆ เพื่อเพิ่มสมบัติด้านการหล่อลื่นในสถานะที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเทคโนโลยีกระบวนการสปัตเตอริงก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่อุตสาหกรรมนำมาใช้กันอย่างมาก

โมลิบดีนัมไนไตรด์ (MoN) เป็นวัสดุเคลือบที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในหลายๆ ปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบันเกี่ยวกับการช่วยเพิ่มสมบัติทางกล [8] การประยุกต์ใช้งานการเคลือบ MoN คือ การเพิ่มไนไตรด์ (Nitride) ให้กับชิ้นส่วนทางกลที่นำมาเคลือบ เพื่อเพิ่มความแข็ง (Hardness) หรือเป็นการลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (COF) ลง [9] เมื่อทำการเปรียบเทียบการแพร่ไนไตรด์กับโลหะแล้ว พบว่า ชิ้นส่วนทางกลที่นำมาเคลือบ MoN จะมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำมาก ทำให้ชิ้นส่วนทางกลที่ผ่านการเคลือบ MoN จะสามารถต้านทานการสึกหรอได้ดีในอุณหภูมิที่สูง [10]

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง (R.F. Reactive Sputtering) จึงมีความสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริงกับโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย เพื่อควบคุมคุณภาพผิวเคลือบชิ้นส่วนทางกลที่ได้ให้มีความเหมาะสมมากที่สุดกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (Electric Current), แรงดันก๊าซ (Gas Pressure) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N_2)

1.2.2 เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติเกี่ยวกับคุณภาพผิวเคลือบ MoN ของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษากระบวนการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง

1.3.2 ศึกษาสมบัติเกี่ยวกับคุณภาพผิวเคลือบ MoN ของชิ้นงานทดสอบที่ได้จากกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง

1.3.3 กำหนดสภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง โดยประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์เชิงสถิติ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์การเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง

1.4.2 กำหนดพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริงที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพผิวเคลือบ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า, แรงดันก๊าซ และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน

1.4.3 ออกแบบแผนการทดลอง (DOE) ด้วยเทคนิคพื้นผิวตอบสนอง (RSM)

1.4.4 ออกแบบชิ้นงานทดสอบสำหรับการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริงให้เหมาะสมต่อการวัดผลเกี่ยวกับคุณภาพผิวเคลือบ พร้อมทั้งจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ

1.4.5 จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ที่จะทำการทดลองเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง ได้แก่ แผ่นวัสดุเคลือบ และก๊าซกระตุ้นกระบวนการ เป็นต้น

1.4.6 ทำการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับคุณภาพผิวเคลือบของชิ้นงานทดสอบที่ได้

1.4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมทั้งค้นหาสภาวะที่เหมาะสมด้วยหลักการเชิงสถิติ

1.4.8 ออกแบบการทดลองสำหรับการทดสอบเพื่อพิสูจน์สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง

1.4.9 ดำเนินการทดลองตามแผนการทดลอง พร้อมทั้งบันทึกข้อมูล

1.4.10 วิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการดำเนินการก่อน-หลัง การตั้งค่าพารามิเตอร์การเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง

1.4.11 สรุปผลงานวิจัย และดำเนินการเผยแพร่ผลงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบแนวทางที่เหมาะสมในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง และใช้ข้อมูลจากการวิจัยเป็นแนวทางในการสนับสนุนในการตัดสินใจเลือกใช้การเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง

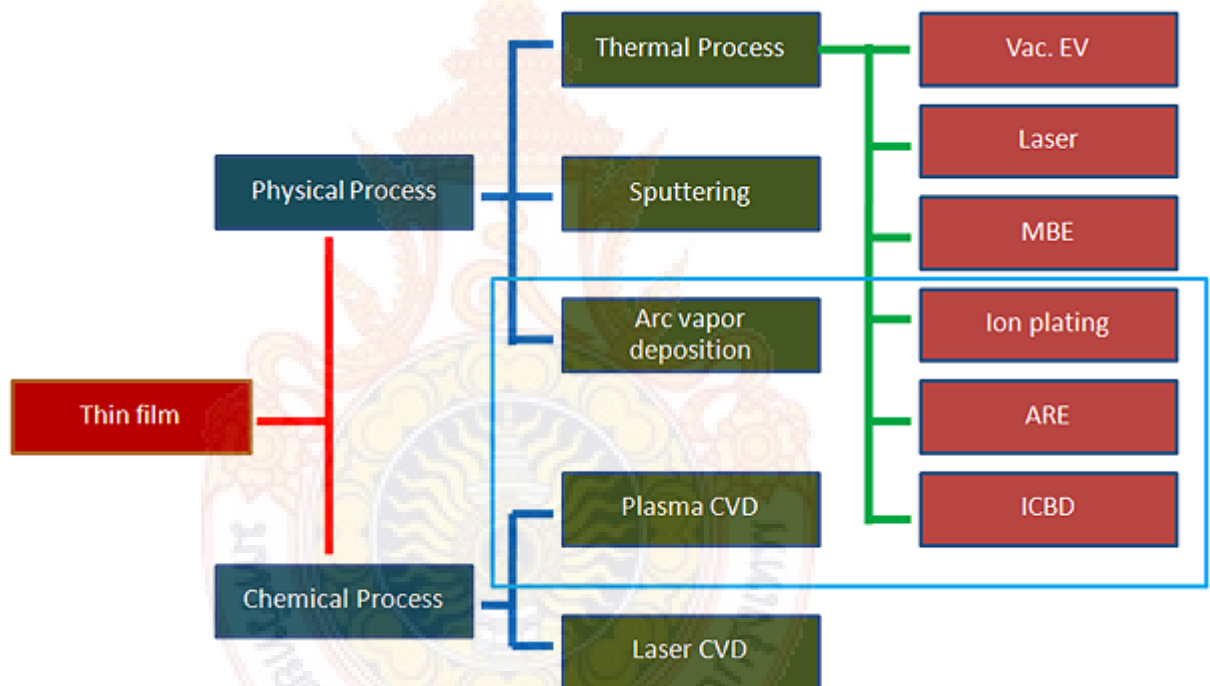
1.5.2 สามารถนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับสารเคลือบชนิดอื่นๆ ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพผิวเคลือบที่ดีในงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (Thin Film Process) [11]

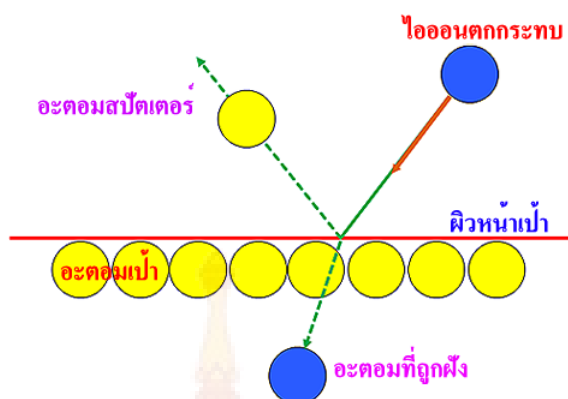
ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง วิธีการเคลือบฟิล์มบางพอจะแบ่งอย่างสังเขปได้ 2 แบบ ดังภาพที่ 2 คือ กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition Process : PVD) และกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงเคมี (Chemical Vapor Deposition Process : CVD) ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะวิธีการสปัตเตอริง (Sputtering)



ภาพที่ 2.1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบาง [11]

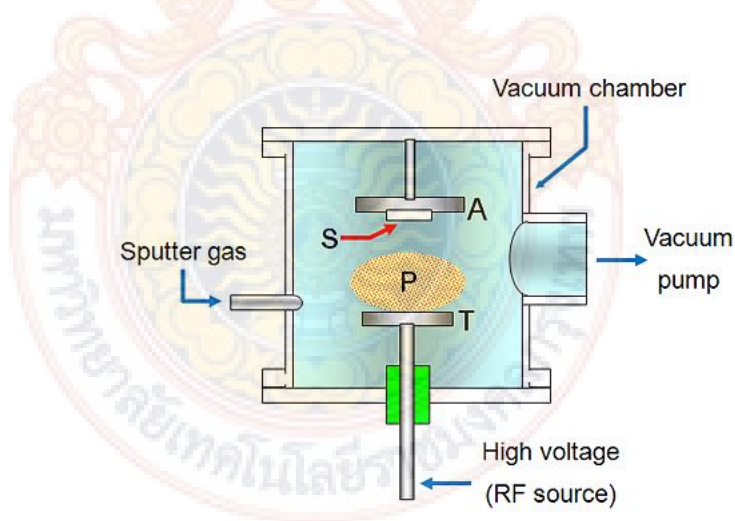
2.2 สปัตเตอริง (Sputtering) [11]

เมื่อผิวของแข็งถูกระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานเช่น ไอออนที่มีความเร่ง อะตอมที่ผิวของแข็งจะถูกกระเจิงออกมาเนื่องจากการชนระหว่างอะตอมที่ผิวและอนุภาคพลังงาน ดังแสดงดังภาพที่ 3 ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า สปัตเตอริงกลับ (Back Sputtering) หรือสปัตเตอริงเชิงเดี่ยว (Simple Sputtering) และอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวของแข็งนี้ จะไปก่อตัวบนชิ้นงานเกิดเป็นฟิล์มบางขึ้น



ภาพที่ 2.2 กระบวนการสปัตเตอร์เชิงฟิสิกส์ [11]

เมื่อแผ่นโลหะบางถูกระดมยิงด้วยอนุภาคพลังงาน ทำให้มีอะตอมกระเจิงส่งผ่านแผ่นโลหะบางออกมา ปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่า สปัตเตอร์ริง ส่งผ่าน (Transmission Sputtering) คำว่าสปัตเตอร์ริง (Sputtering), สปัตเตอร์ริง (Sputtering), แคโทดสปัตเตอร์ริง (Cathode Sputtering) หรือแคโทดดิไซน์ทีเกรชัน (Cathode Disintegration) และอิมแพกต์อีวาพอเรชัน (Impact Evaporation) ถูกใช้ในความหมายเดียวกันระบบสปัตเตอร์ริงหลายแบบถูกแนะนำมาใช้ในการเคลือบฟิล์มบาง



ภาพที่ 2.3 ระบบการเคลือบแบบสปัตเตอร์ริง : A , แอโนด ; T, เป้า ; S, ชิ้นงาน ; P, พลาสมา [11]

ระบบสปัตเตอร์ริงแบบที่ง่ายที่สุดคือ ระบบสปัตเตอร์ริงแบบไดโอด (Diode Sputtering) ซึ่งมีองค์ประกอบง่ายๆ คือ คู่ของขั้วไฟฟ้าแบบระนาบ โดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งเป็นแคโทดเย็น (Cold Cathode) และอีกขั้วหนึ่งเป็น แอโนด (Anode) ที่ผิวหน้าของแคโทดจะถูกปิดด้วยสารที่เป็นเป้าที่จะ

เป็นสารเคลือบ ส่วนชิ้นงานจะวางอยู่บนแอโนด ภายในแคมเบอร์สปัตเตอร์จะถูกเติมด้วยแก๊สสปัตเตอร์ โดยทั่วไปใช้แก๊สอาร์กอนที่ความดัน 0.1 Torr การโคโรนาดิสชาร์จจะถูกรักษาไว้ภายใต้การใช้โวลเตจดีซี (DC-Voltage) ระหว่างขั้วไฟฟ้า ไอออน Ar^+ ที่เกิดขึ้นในโคโรนาดิสชาร์จถูกเร่งที่แคโทดฟอลล์ (Cathode Fall) หรือชีท (Sheath) ไปสู่เป้าและสปัตเตอร์เป้าเป็นผลให้ได้อะตอมเป้าหลุดออกไปสู่ชิ้นงาน และก่อตัวเป็นฟิล์มบางบนชิ้นงาน ในระบบดีซีสปัตเตอร์ เป้าจะต้องเป็นโลหะเนื่องจากโคโรนาดิสชาร์จ (การไหลของกระแส) จะต้องอยู่ได้ระหว่างขั้วไฟฟ้าด้วยการแทนที่เป้าโลหะด้วยเป้าที่เป็นฉนวนในระบบดีซีสปัตเตอร์ การดิสชาร์จสปัตเตอร์ไม่สามารถคงไว้ได้ เพราะจะเกิดการสร้างผิวประจุของไอออนบวกในทันใดบริเวณด้านหน้าของเป้าฉนวน จึงต้องใช้แหล่งกำเนิดอาร์เอฟ (RF-Source) กับเป้าฉนวน ระบบเช่นนี้เรียกว่า อาร์เอฟไดโอดสปัตเตอร์ (RF-Diode Sputtering) ในระบบอาร์เอฟสปัตเตอร์ ฟิล์มบางของฉนวนสามารถสร้างได้จากการสปัตเตอร์จากเป้าฉนวนโดยตรง เมื่อใส่แก๊สไวทริยา เช่น ออกซิเจน หรือ ไนโตรเจน เข้าไปในแคมเบอร์ จะสามารถสร้างฟิล์มบางสารประกอบตระกูลออกไซด์ และไนไตรด์ได้ เมื่อสปัตเตอร์เป้าโลหะที่เหมาะสมระบบเช่นนี้ถูกเรียกว่า รีเอกทีฟสปัตเตอร์ (Reactive Sputtering) ซึ่งจะใช้ดีซี หรือ อาร์เอฟสปัตเตอร์ก็ได้

2.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k (2^k Factorial Experiment) จัดเป็นกรณีพิเศษที่มีความสำคัญมากที่สุดนั่นคือกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบไปด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” และ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” และ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นๆ ก็ได้ใน 1 เปรกติ (Replicate) ที่ปริบูรณ์สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบไปด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k สำหรับลักษณะเฉพาะของการออกแบบดังกล่าวนี้คือ ปัจจัยทั้งหมดมีค่าตายตัว การออกแบบเป็นแบบเชิงสุ่มปริบูรณ์ และสมมติฐานเกี่ยวกับความเป็นปกติเป็นที่ยอมรับได้

การออกแบบ 2^k มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการทำการตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองที่น้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ปัจจัยได้อย่างปริบูรณ์ โดยการใช้การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล ดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย

เพื่อทำการกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงเนื่องจากแต่ละปัจจัยของการออกแบบ 2^k ประกอบด้วย 2 ระดับ

การวิเคราะห์การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ในรูปแบบต่างๆ ไปคือการออกแบบที่มี k ปัจจัยแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ แบบจำลองทางสถิติสำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบด้วยผลหลัก k ปัจจัย $\left(\frac{k}{3}\right)$ เทอมความสัมพันธ์ร่วมกันของ 2 ปัจจัย $\left(\frac{k}{3}\right)$ เทอมความสัมพันธ์ร่วมกันของ 3 ปัจจัย,....., และ 1 เทอมความสัมพันธ์ร่วมกันของ k ปัจจัย นั่นคือ แบบจำลองบริบูรณ์สำหรับการออกแบบ 2^k จะประกอบไปด้วยผลลัพธ์ทั้งสิ้น $2^k - 1$ ปัจจัยวิธีการทั่วไปในการวิเคราะห์เชิงสถิติของการออกแบบ 2^k ได้ทำการสรุปเอาไว้ดังนี้คือ การกำหนดปัจจัยที่มีอิทธิพล การกำหนดแบบทดลองเบื้องต้นของการทดลอง การดำเนินการทดสอบทางสถิติการปรับแบบทดลองให้เหมาะสม การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของแบบทดลองและการอธิบายผลลัพธ์ที่ได้จากแบบการทดลอง

รายละเอียดของบทสรุปที่เกี่ยวกับขั้นตอนในการวิเคราะห์ผลสำหรับการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k คือในขั้นแรกจะทำการประมาณค่าผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ และตรวจสอบเครื่องหมายและขนาดของผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้น ข้อมูลเหล่านี้จะทำให้ผู้ทำการทดลองทราบเบื้องต้นว่าปัจจัยและเทอมความสัมพันธ์ร่วมกันตัวใดที่มีความสำคัญ และปัจจัยเหล่านี้ควรจะถูกรับให้อยู่ในทิศทางใดเพื่อที่จะปรับปรุงผลลัพธ์ตอบสนองในการสร้างแบบจำลองเบื้องต้น ควรที่จะเลือกแบบจำลองแบบเต็มรูปแบบ ซึ่งประกอบด้วยปัจจัยหลักและเทอมความสัมพันธ์ร่วมกันทั้งหมดในขั้นตอนที่สองจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อที่จะทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยหลัก ขั้นตอนที่สามจะเป็นการจัดเกลาแบบจำลอง ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกี่ยวกับการดึงเอาปัจจัยที่ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญออกจากแบบจำลองเต็มรูปแบบ ขั้นตอนที่จะเป็นการวิเคราะห์ส่วนตกค้างเพื่อที่จะตรวจสอบความเพียงพอของแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานที่สร้างขึ้น มีบางครั้งเช่นกันที่การจัดเกลาแบบจำลองเกิดขึ้นภายหลังจากการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง ทั้งนี้เนื่องจากพบว่าแบบจำลองเกิดความไม่เพียงพอหรือสมมติฐานที่กำหนดให้มันไม่ถูกต้องอย่างมากและในขั้นตอนสุดท้ายจะทำการวิเคราะห์ด้วยกราฟโดยจะทำการสร้างกราฟปัจจัยหลัก และเทอมความสัมพันธ์ร่วมกันขึ้นมา

ตารางที่ 2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบ 2^k

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom
K Main Effect		
A	SS_A	1
B	SS_B	1
K	SS_K	1
$\binom{k}{2}$ Two –Factor Interactions		
AB	SS_{AB}	1
AC	SS_{AC}	1
JK	SS_{jk}	1
$\binom{k}{3}$ Tree-Factor Interactions		
ABC	SS_{ABC}	1
ABD	SS_{ABD}	1
IJK	SS_{ijk}	1
$\binom{k}{3} = 1$ k-Factor Interactions		
ABC...K	$SS_{ABC...k}$	1
Error	SS_E	$2^k(n-1)$
Total	SS_T	$n2^k - 1$

สำหรับการประมาณค่าของผล หรือค่าผลรวมของกำลังสองของผลจะต้องทำการคำนวณหา ค่า Contrast ที่เกี่ยวข้องกับผลปัจจัยและเทอมของความสัมพันธ์ร่วมกันนั้นๆ ก่อน โดยใช้สมการที่ 2.1 ดังนี้

$$Contrast_{AB...K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1) \quad (2.1)$$

เมื่อทำการคำนวณหาค่า Contrast สำหรับผลปัจจัยหลักและทอมของความสัมพันธ์ร่วมกันต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้วก็จะสามารถที่จะทำการประมาณค่าผลต่างๆ ดังกล่าวและสามารถทำการประมาณค่าของผลรวมกำลังสองได้ ดังแสดงในสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 ดังนี้

$$AB \dots K = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB \dots K}) \quad (2.2)$$

$$SS_{AB \dots K} = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB \dots K})^2 \quad (2.3)$$

วัตถุประสงค์ของการทดลองแบบแฟกทอเรียล

(1) เพื่อศึกษาอิทธิพลร่วม (Interaction) ของปัจจัยต่างๆ (Factors) ถ้าปัจจัยไม่เป็นอิสระต่อการทดลองปัจจัยเดียวจะให้ภาพที่ไม่สมบูรณ์

(2) ในการศึกษาเบื้องต้นเพื่อดูอิทธิพลของหลายๆ ปัจจัยอย่างรวดเร็ว ก่อนที่จะศึกษาในเชิงลึก อาจใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียลเพื่อหาว่าปัจจัยใดบ้างที่เป็นอิสระต่อกัน และอาจจัดการทดลองแยกเป็นอิสระได้

(3) ในการทดลองที่วางแผนเพื่อที่จะหาคำแนะนำสำหรับสภาพที่หลากหลาย เราอาจเพิ่มปัจจัยเสริม เช่น ชนิดของดินเพื่อให้คำแนะนำจากผลการทดลองใช้ได้กับสถานการณ์ที่กว้างขึ้น ข้อดีการทดลองแบบเชิงแฟกทอเรียลเหนือ Single Factor Experiment เมื่อปัจจัย (Factors) เป็นอิสระจากกัน (Independent)

(4) ประหยัดเวลาและทรัพยากร ใช้เพียง Main Effects - Main Effects มี Precision เท่ากับการทดลองทดสอบแต่ละปัจจัย (Factor) แยกออกจากกันในขนาดการทดลองที่เท่ากัน การทดสอบ Factor แยกเป็นสองการทดลองต้องใช้จำนวน Plots และทรัพยากรอื่นๆ เป็นสองเท่า ถ้ามี n ปัจจัย ก็ต้องใช้เป็น n เท่า

2.4 ฟังก์ชันความพึงพอใจ

ฟังก์ชันความพึงพอใจ (Desirability Function) เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการพิจารณาภาวะของผลตอบสนอง ซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวแปรอิสระโดยค่าของความพึงพอใจของผลตอบสนอง (Desirability : D) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 เมื่อ D มีค่าเท่ากับ 0 หมายถึง ผลตอบสนองนั้นอยู่นอกขอบเขตของการยอมรับ แต่ถ้า D มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความพึงพอใจจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน และเมื่อ D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบสนองนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบสนอง

หาได้จากสมการดังนี้ กรณีผลตอบสนองที่ใช้ในการพิจารณามีเพียงผลตอบสนองเดียว ค่าความพึงพอใจหาได้จากสมการ 2.4

$$d_i = \begin{cases} 0 & y \leq L \\ \left[\frac{y-L}{U-L} \right] & L < y < U \\ 1 & y \geq U \end{cases} \quad (2.4)$$

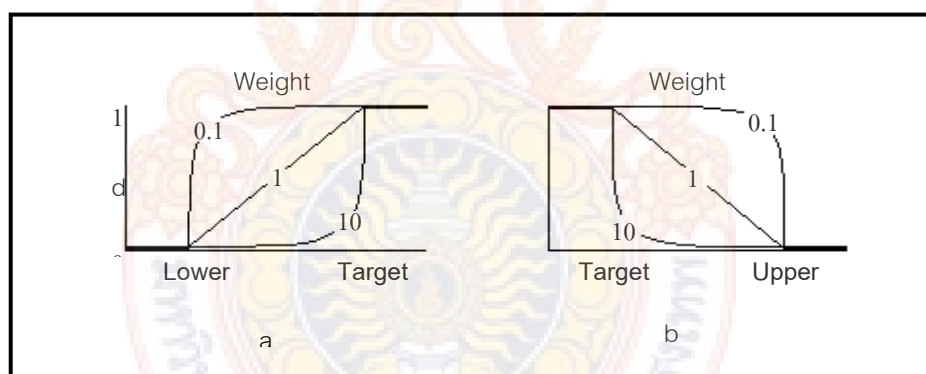
เมื่อ d_i คือ ความพึงพอใจของผลตอบสนอง

Y คือ ค่าของผลตอบสนอง

L คือ ค่าในระดับต่ำของผลตอบสนอง (Lower)

U คือ ค่าในระดับสูงของผลตอบสนอง (Upper)

R คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบสนอง (Weight) ซึ่งการกำหนดค่าน้ำหนักของผลตอบสนองนี้ สามารถเลือกกำหนดค่าของน้ำหนักที่ต่ำสุดหรือสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 2.4 (a) และ 2.4 (b) ตามลำดับ



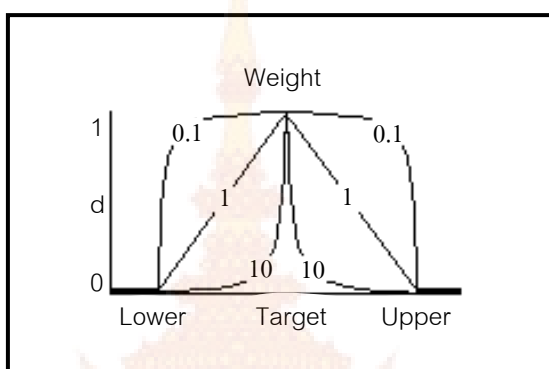
ภาพที่ 2.4 การกำหนดน้ำหนักของผลตอบสนองกรณีมีผลตอบสนองเดียว

กรณีผลตอบสนองที่ใช้ในการพิจารณามี 2 ผลตอบ ค่าความพึงพอใจของแต่ละผลตอบสนองหาได้จากสมการ 2.4

$$d_i = \begin{cases} 1 & \left[\frac{y-L}{T-L} \right]^2 & L \leq y \leq T \\ & T < y \leq U \\ 0 & \left[\frac{y-U}{T-U} \right]^2 & y < L \text{ or } y > U \end{cases} \quad (2.4)$$

- เมื่อ T คือ ค่าเป้าหมายของผลตอบสนอง (Target)
 s คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบสนองตัวที่ 1 ($Weight_1$)
 t คือ ค่าน้ำหนักของผลตอบสนองตัวที่ 2 ($Weight_2$)

ซึ่งการกำหนดน้ำหนักของผลตอบสนองทั้งสองนี้ สามารถเลือกกำหนดค่าของน้ำหนักดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 การกำหนดน้ำหนักของผลตอบสนองกรณีมี 2 ผลตอบสนอง

เมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองมีหลายค่า จะต้องทำการหาค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability : D) และเมื่อค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองมีเพียงค่าเดียว ค่าความพึงพอใจ โดยรวมของผลตอบสนองจะมีค่าความพึงพอใจของผลตอบสนองนั้น

2.5 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

Jianliang Li, Dangsheng Xiong, Hongyan Wu, Heguo Zhu, Jian Kong และ Rajnesh Tyagi (2011) [13] ทำการศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติการต้านทานการสึกหรอของผิว และสมบัติการหล่อลื่นในช่วงอุณหภูมิกว้างด้วยการเคลือบ MoN กับโลหะผสมเงิน-นิกเกิล โดยทำการทดสอบตามด้วยเครื่องทดสอบตามมาตรฐาน ball-on-disk ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่อุณหภูมิห้อง (20°C) ไปจนถึง 600°C กับวัสดุคูมูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) ผลการทดสอบพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานอยู่ในช่วง 0.3-0.7 นอกจากนี้ ยังพบว่าผิวเคลือบ MoN สามารถช่วยลดอัตราการสึกหรอและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลงได้ในอุณหภูมิที่สูง

Charnnarong Saikaew, Anurat Wisitsoraat และ Rangrit Sootticoon (2010) [14] การศึกษา นี้ เป็นการประยุกต์ใช้เทคนิค Central Composite Design (CCD) ในการวิเคราะห์กระบวนการ

เคลือบผิวโมลิบดีนัมออกไซด์ (MoO_x) ด้วยการกระตุ้นคาร์บอนในกระบวนการ Sputtering เพื่อควบคุมความแปรปรวนที่เกิดจาก 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ กำลังความถี่ของคลื่น (Radio Frequency Power), แรงดัน (Pressure), อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซออกซิเจน (Ar/O_2) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนต่อก๊าซออกซิเจน ($\text{C}_2\text{H}_2/\text{O}_2$) โดยมีอัตราการเคลือบผิว (Deposition Rate) และความเรียบของผิวเคลือบ (Surface Roughness) เป็นผลตอบสนองในการศึกษา จากนั้นจะเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิควิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) ในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Sputtering ที่ส่งผลให้ผลตอบสนองทั้ง 2 ดังกล่าวข้างต้น มีค่าสูงสุดในกระบวนการเดียวกัน ซึ่งรูปแบบของ Model จะได้จากการวิเคราะห์ Regression ในรูปแบบฟังก์ชันอันดับสอง ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วย RSM พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ Sputtering ที่ทำให้อัตราการเคลือบผิว = 8.4 mm/min และความเรียบของผิวเคลือบ = 41.7 mm จะได้มาจากการกำหนดค่าของกำลังความถี่ของคลื่น = 150 w, แรงดัน = 0.8 Pa, อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนต่อก๊าซออกซิเจน = 0.59 และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอะเซทิลีนต่อก๊าซออกซิเจน = 0.08 การกำหนดค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ สามารถสร้างความพึงพอใจ (Desirability : D) = 64%

Jennifer R. Mawdsley, Y. Jennifer Su, K.T. Faber และ Thomas F. Bernecki (2001) [15] ได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงสถิติร่วมกับมัลติ-รีเกรสชัน (Multiple Regression) ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่อ 3 คุณสมบัติของกระบวนการเคลือบผิวอลูมินาด้วยสเปรย์พลาสมา ได้แก่ ความสามารถในการเคลือบ, ความแข็ง และความหนาผิวเคลือบ ขั้นตอนแรกจะเป็นการกรองพารามิเตอร์ 6 พารามิเตอร์ คือ อัตราการไหลของแก๊ส (Total Plasma Gas Flow : TGF), กำลังส่งในการสเปรย์ (Plasma Gun Power : P), ระยะการสเปรย์ (Spray Distance : SD), เปอร์เซ็นต์ของไฮโดรเจนในแก๊สพลาสมา (%Hydrogen in Plasma Gas : %H), ระยะการฉีด (Powder Injector Offset : IO) และมุมการฉีด (Powder Injector Angle : A) ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k ผลการทดลองพบว่า มี 4 พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อ 3 คุณสมบัติของกระบวนการเคลือบผิวอลูมินาด้วยสเปรย์พลาสมา ได้แก่ อัตราการไหลของแก๊ส (Total Plasma Gas Flow : TGF), กำลังส่งในการสเปรย์ (Plasma Gun Power : P), ระยะการสเปรย์ (Spray Distance : SD) และระบบลำเลียงแก๊สอาร์กอน (Carrier Argon Gas Flow : CGF) ขั้นตอนที่ 2 ต่อมา จะใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 3^k ผลการวิเคราะห์มัลติ-รีเกรสชัน (Multiple Regression) เพื่อกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบผิวอลูมินาด้วยสเปรย์พลาสมา พบว่า สภาวะที่เหมาะสมของคุณสมบัติความสามารถในการเคลือบด้านนั้น ไม่สัมพันธ์กันกับค่าความแข็งที่สูง เพราะจะทำให้โครงสร้างเกิดการเสียเสียรูปในการชุบแข็ง หลักการวิเคราะห์

โครงสร้างเชิงวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับโครงสร้างบกพร่องที่พบนั้น สามารถสรุปได้ว่าโครงสร้างบกพร่องดังกล่าวที่พบจะไม่มีผลต่อรอยกดในการวัด แต่จะมีผลต่อความสามารถในการเคลือบ นอกจากนี้ โครงสร้างบกพร่องเล็กรูปเหล่านี้ยังมีผลต่อการเกิดการกระเด็นอย่างมากในกระบวนการเคลือบ ซึ่งจะส่งผลให้ผิวเคลือบที่ได้มีความหนาบางมากอีกด้วย

P. Villiger, Ch. Sprecher และ J.A. Peters (1999) [16] ได้ทำการศึกษาพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลของกระบวนการเคลือบผิว Ti-C:H ด้วยสเป็คเตอรืงจากการสร้างสนามแม่เหล็ก โดยการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองแฟรคชันนอลในการศึกษาพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย แรงเคลื่อนไฟฟ้าส่วนของฐานรองรับชิ้นงาน, อัตราการไหลแก๊สอะเซทิลีน, แรงดันก๊าซอาร์กอน และแรงดันก๊าซไนโตรเจน ผลการทดลองพบว่า ช่วงแรงเคลื่อนไฟฟ้าส่วนของฐานรองรับชิ้นงาน -20 โวลต์ ถึง -60 โวลต์ มีอิทธิพลเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลเลย ส่วนอัตราการไหลแก๊สอะเซทิลีนนั้น จำเป็นต้องมีการควบคุมเนื่องจากมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติทางกลในกระบวนการเคลือบผิว Ti-C:H ด้วยสเป็คเตอรืงจากการสร้างสนามแม่เหล็กอย่างมีนัยสำคัญในเชิงสถิติ บทสรุปของการศึกษานี้ คือ ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของผิวเคลือบกับจุดวิกฤตของความสามารถในการรับแรงได้นั้น มีผลต่อคุณสมบัติทางกลของกระบวนการเคลือบผิว Ti-C:H ด้วยสเป็คเตอรืงจากการสร้างสนามแม่เหล็ก



บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ในการเคลือบผิวสแตนเลสด้วยสารเคลือบ โมลิบดีนัมไนไตรด์ (MoN) ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง (R.F. Reactive Sputtering) ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (Current), แรงดัน (Pressure) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอน กับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) พร้อมทั้งกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์เหล่านี้ในการเคลือบ ผิว MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง

3.1 การวางแผนงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 แผนงานวิจัยในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง

รายการ	เดือน								
	0-2	2-3	4-6	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12
1. ศึกษาข้อมูลการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการอาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง									
2. ออกแบบแผนการทดลอง (DOE) พร้อมทั้งทำการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง									
3. ออกแบบแผนการทดลองเพื่อพิสูจน์ พร้อมทั้งทำการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลอง									
4. ถ่ายทอดผลการวิจัยสู่เป้าหมาย									
6. สรุปผล และจัดทำรายงาน									

3.2 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติสำหรับการเคลือบ MoN

ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ.รีแอคทีฟสเปตเตอริง

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ จะเป็นการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment : DOE) ในขั้นตอนแรกจะเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการ

เคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปีดเตอริง ซึ่งแต่ละพารามิเตอร์ก็จะมีอิทธิพลที่แตกต่างกันออกไป พารามิเตอร์ในการเคลือบ MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปีดเตอริงมีความสำคัญต่อการกำหนดคุณภาพผิวงานเคลือบที่ดี รวมไปถึงสมบัติเชิงกลต่างๆ (Mechanical Properties) ที่ต้องการของผิวงานเคลือบด้วย เพื่อประสิทธิภาพสูงสุดในการใช้งาน ดังนั้น การควบคุมพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อระบบการเคลือบ MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปีดเตอริงจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยพารามิเตอร์สำคัญดังกล่าวเหล่านี้ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ระดับ 0.35 A, 0.40 A, 0.45 A, แรงดัน (Pressure) ที่ระดับ 0.004 mbar, 0.007 mbar, 0.010 mbar และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ที่ระดับ 0.5, 1.0, 1.5 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปีดเตอริง

พารามิเตอร์	ระดับพารามิเตอร์ 3 ระดับ		
กระแสไฟฟ้า (A)	0.35	0.40	0.45
แรงดัน (mbar)	0.004	0.007	0.010
อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน	0.5	1.0	1.5

การดำเนินการทดลองเชิงสถิติเกี่ยวกับการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปีดเตอริงนั้น จะใช้วัสดุสแตนเลสขนาด 20 x 25 x 1 mm เพื่อความสะดวกในการวัดสมบัติเชิงกลต่างๆ ในการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (DOE) จะเลือกใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k (2^k Factorial Experiment) โดยกำหนดให้ค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) เป็นผลตอบสนอง (Response) ของการทดลองเชิงสถิติ เพื่อบ่งชี้ถึงคุณภาพผิวเคลือบ MoN ของชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปีดเตอริง ซึ่งตารางที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงสถิติสำหรับเทคนิคการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k เพื่อใช้สำหรับการเก็บข้อมูล สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 3.3

การเก็บข้อมูลค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ตามแผนการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ ซึ่งในการเก็บข้อมูลแต่ละลำดับการทดลอง (Run Order) นั้น จะดำเนินการวัดค่าชิ้นงานทดสอบซ้ำ (Replicate) 4 ครั้ง เพื่อเป็นการยืนยันความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 3.3 การทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k เพื่อใช้สำหรับการเก็บข้อมูล

ลำดับ	พารามิเตอร์			เวลา (นาทีก)
	กระแสไฟฟ้า (A)	แรงดัน (mbar)	อัตราส่วนระหว่าง ก๊าซอาร์กอน กับก๊าซไนโตรเจน	
1	0.35	0.004	0.5	60
2	0.45	0.004	0.5	40
3	0.35	0.010	0.5	60
4	0.45	0.010	0.5	40
5	0.35	0.004	1.5	60
6	0.45	0.004	1.5	40
7	0.35	0.010	1.5	60
8	0.45	0.010	1.5	40

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลค่าความแข็ง (Hardness)

ชิ้นงาน	ค่าความแข็ง (GPa)			
	1	2	3	4
1	30.1084	29.0432	28.4329	23.3068
2	26.3961	27.7205	26.7821	28.6060
3	26.9943	31.7245	32.4890	29.8745
4	31.2068	32.8444	33.7557	33.7176
5	24.9593	20.0731	23.2141	25.7471
6	12.0255	13.4509	13.2667	11.7129
7	15.2505	16.6545	16.0558	15.5306
8	14.4923	15.5590	14.1444	15.8959

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra

ชิ้นงาน	ค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra (μm)			
	1	2	3	4
1	0.002622	0.002443	0.002898	0.002976
2	0.003793	0.003922	0.003552	0.003124
3	0.010990	0.011023	0.010569	0.010275
4	0.003168	0.003267	0.003585	0.003826
5	0.002497	0.002896	0.002113	0.002664
6	0.002283	0.002453	0.002123	0.002687
7	0.003380	0.003564	0.003978	0.003224
8	0.004674	0.004264	0.004975	0.004611

ผลลัพธ์เชิงสถิติในการวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k เกี่ยวกับค่าความแข็ง (Hardness) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลหลัก (Main Effect) นั้นคือ พารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ เนื่องจากค่า P-Value ของพารามิเตอร์ทั้ง 2 มีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงของ $\alpha = 0.05$ นั่นคือ ค่าน้อยกว่า 0.001 และ 0.001 ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ เนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่าค่าอ้างอิงของ $\alpha = 0.05$ นั่นคือ 0.274 เมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ (Interaction) พบว่า ทุกเทอมพารามิเตอร์ทั้งที่มีผลกระทบร่วมกันระหว่าง 2 พารามิเตอร์ และ 3 พารามิเตอร์นั้น มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ เนื่องจากค่า P-Value ของทุกเทอมพารามิเตอร์ มีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงของ $\alpha = 0.05$ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่า $R^2 = 95.55\%$ นั้นแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าที่น่าพอใจมาก บ่งชี้ว่าข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติ นั้น มีความน่าเชื่อถือเกี่ยวกับผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลมากถึง 95.55% ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียล 2^k กับค่าความแข็ง (Hardness)

Factorial Fit: Hardness versus DC current, Pressure, Ar/N2

Estimated Effects and Coefficients for Hardness (coded units)

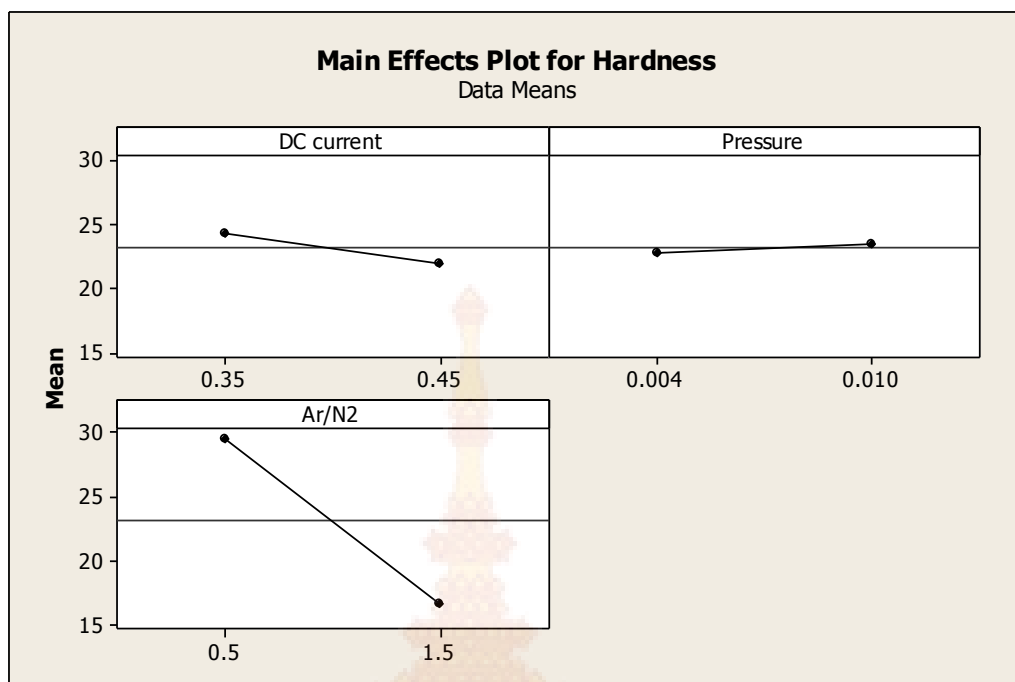
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		23.157	0.3169	73.08	0.000
DC current	-2.368	-1.184	0.3169	-3.74	0.001
Pressure	0.709	0.355	0.3169	1.12	0.274
Ar/N2	-12.811	-6.405	0.3169	-20.21	0.000
DC current*Pressure	3.248	1.624	0.3169	5.12	0.000
DC current*Ar/N2	-3.500	-1.750	0.3169	-5.52	0.000
Pressure*Ar/N2	-3.317	-1.659	0.3169	-5.23	0.000
DC current*Pressure*Ar/N2	1.769	0.885	0.3169	2.79	0.010

S = 1.79258 PRESS = 137.103
R-Sq = 95.55% R-Sq(pred) = 92.09% R-Sq(adj) = 94.26%

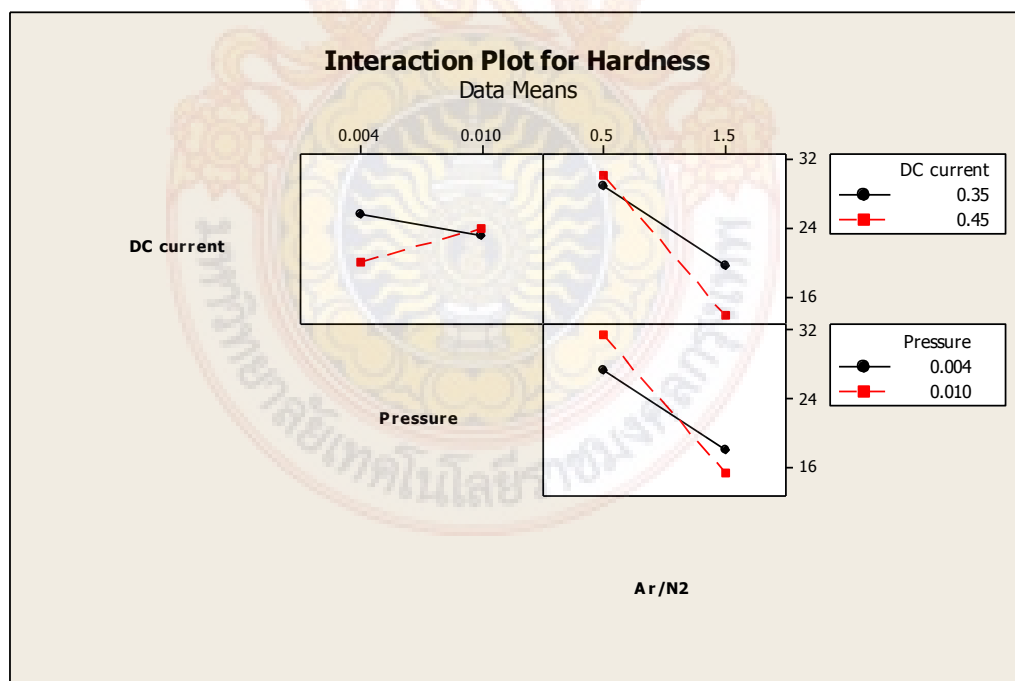
Analysis of Variance for Hardness (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Main Effects	3	1361.77	1361.77	453.92	141.26	0.000
DC current	1	44.84	44.84	44.84	13.96	0.001
Pressure	1	4.02	4.02	4.02	1.25	0.274
Ar/N2	1	1312.90	1312.90	1312.90	408.58	0.000
2-Way Interactions	3	270.40	270.40	90.13	28.05	0.000
DC current*Pressure	1	84.39	84.39	84.39	26.26	0.000
DC current*Ar/N2	1	97.98	97.98	97.98	30.49	0.000
Pressure*Ar/N2	1	88.04	88.04	88.04	27.40	0.000
3-Way Interactions	1	25.04	25.04	25.04	7.79	0.010
DC current*Pressure*Ar/N2	1	25.04	25.04	25.04	7.79	0.010
Residual Error	24	77.12	77.12	3.21		
Pure Error	24	77.12	77.12	3.21		
Total	31	1734.33				

เมื่อทำการพิจารณากราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect Plot) ของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ในการเคลือบผิว MoN กับชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รี แอคทีฟสเป็คเตอรिंग ดังแสดงในภาพที่ 3.1 พบว่าเส้นกราฟของพารามิเตอร์ทั้ง 2 คือ พารามิเตอร์ กระแสไฟฟ้า (DC) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) จะไม่ขนานการเส้นอ้างอิง (Reference Line) ในแนวแกนนอน แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ส่วนเส้นกราฟของพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) จะขนานการเส้นอ้างอิง (Reference Line) ในแนวแกนนอน แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ดังกล่าว มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลลัพธ์ที่ได้จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์กราฟอิทธิพลหลักของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบนี้ มีความสอดคล้องสัมพันธ์กับผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมเชิงสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 3.6



ภาพที่ 3.1 กราฟอิทธิพลหลักของพารามิเตอร์ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ



ภาพที่ 3.2 กราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ

เมื่อทำการพิจารณารูปภาพอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ (Interaction Plot) ของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 พบว่า เส้นกราฟของอิทธิพลร่วมกันทุกเทอมพารามิเตอร์ทั้งที่มีผลกระทบร่วมกันระหว่าง 2 พารามิเตอร์ และ 3 พารามิเตอร์นั้น มีเส้นกราฟที่ไขว้กันอย่างชัดเจน และไม่มีแนวโน้มขนานไปทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจะเห็นได้จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์กราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบนี้ มีความสอดคล้องสัมพันธ์กับผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมเชิงสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเชิงแฟกทอเรียล 2^k กับค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a

Factorial Fit: R_a versus DC current, Pressure, Ar/N2

Estimated Effects and Coefficients for R_a (coded units)

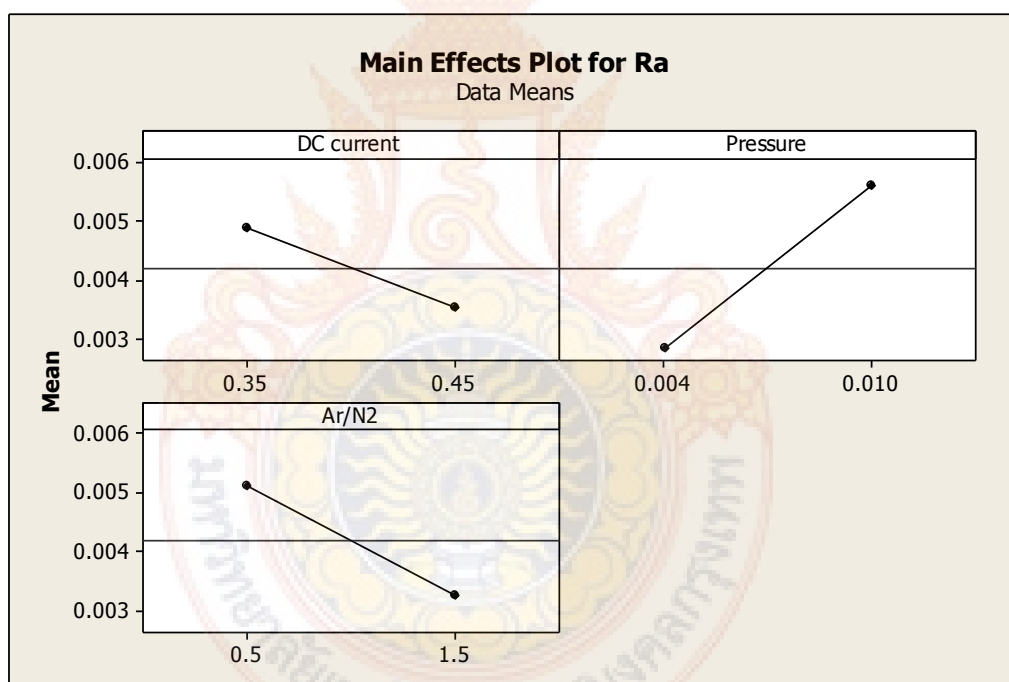
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		0.004201	0.000055	77.02	0.000
DC current	-0.001363	-0.000681	0.000055	-12.49	0.000
Pressure	0.002770	0.001385	0.000055	25.40	0.000
Ar/N2	-0.001853	-0.000926	0.000055	-16.99	0.000
DC current*Pressure	-0.001716	-0.000858	0.000055	-15.74	0.000
DC current*Ar/N2	0.001832	0.000916	0.000055	16.80	0.000
Pressure*Ar/N2	-0.001151	-0.000576	0.000055	-10.55	0.000
DC current*Pressure*Ar/N2	0.002342	0.001171	0.000055	21.47	0.000

S = 0.000308504 PRESS = 4.060793E-06
R-Sq = 98.92% R-Sq(pred) = 98.07% R-Sq(adj) = 98.60%

Analysis of Variance for R_a (coded units)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F
Main Effects	3	0.00010373	0.00010373	0.00003458	363.29
DC current	1	0.00001486	0.00001486	0.00001486	156.11
Pressure	1	0.00006140	0.00006140	0.00006140	645.16
Ar/N2	1	0.00002747	0.00002747	0.00002747	288.60
2-Way Interactions	3	0.00006102	0.00006102	0.00002034	213.71
DC current*Pressure	1	0.00002357	0.00002357	0.00002357	247.61
DC current*Ar/N2	1	0.00002685	0.00002685	0.00002685	282.13
Pressure*Ar/N2	1	0.00001060	0.00001060	0.00001060	111.39
3-Way Interactions	1	0.00004386	0.00004386	0.00004386	460.87
DC current*Pressure*Ar/N2	1	0.00004386	0.00004386	0.00004386	460.87
Residual Error	24	0.00000228	0.00000228	0.00000010	
Pure Error	24	0.00000228	0.00000228	0.00000010	
Total	31	0.00021089			

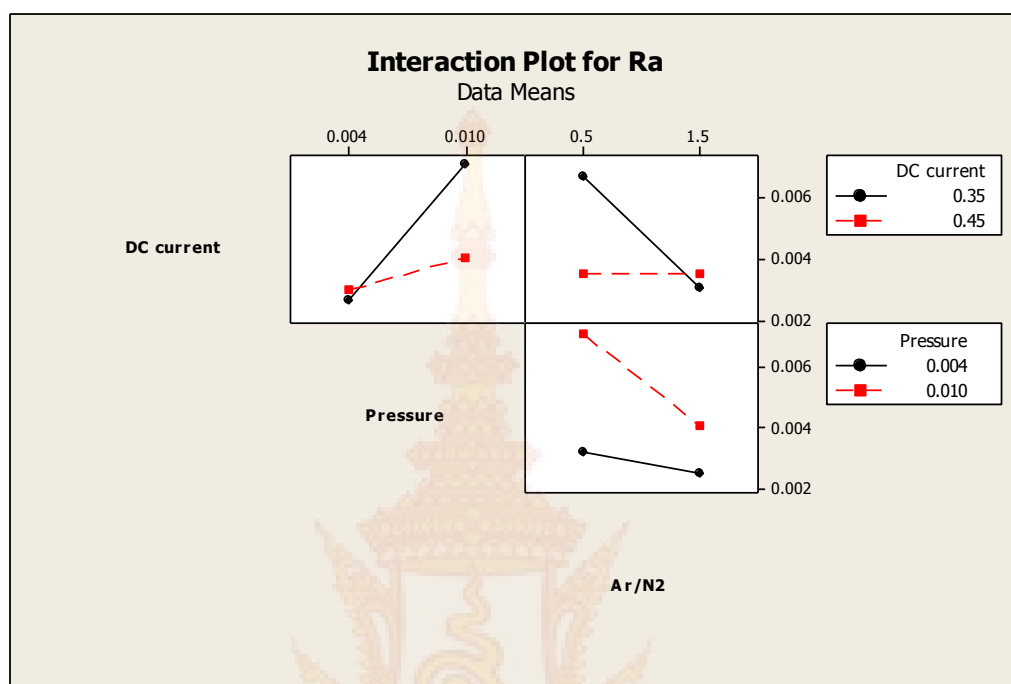
ผลลัพธ์เชิงสถิติในการวิเคราะห์การทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k เกี่ยวกับค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลหลัก (Main Effect) นั้น คือ พารามิเตอร์ทั้ง 3 พารามิเตอร์ มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เนื่องจากค่า P-Value ของ พารามิเตอร์ทั้ง 3 มีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงของ $\alpha = 0.05$ นั่นคือ ค่าน้อยกว่า 0.001 เมื่อทำการพิจารณา อิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ (Interaction) พบว่า ทุกเทอมพารามิเตอร์ทั้งที่มีผลกระทบ ร่วมกันระหว่าง 2 พารามิเตอร์ และ 3 พารามิเตอร์นั้น มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra เนื่องจากค่า P-Value ของทุกเทอมพารามิเตอร์ มีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงของ $\alpha = 0.05$ นอกจากนี้ เมื่อ พิจารณาค่า $R^2 = 98.92\%$ นั้นแสดงให้เห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่าที่น่าพอใจมาก บ่งชี้ว่าข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์เชิงสถิติ นั้น มีความน่าเชื่อถือเกี่ยวกับ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลมากถึง 98.92% ดังแสดงในตารางที่ 3.7



ภาพที่ 3.3 กราฟอิทธิพลหลักของพารามิเตอร์ต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra

เมื่อทำการพิจารณากราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect Plot) ของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ในการเคลือบผิว MoN กับชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ.รี แอคทีฟสปัตเตอริง ดังแสดงในภาพที่ 3.3 พบว่า เส้นกราฟของพารามิเตอร์ทั้ง 3 พารามิเตอร์ จะไม่ขนานการเส้นอ้างอิง (Reference Line) ในแนวแกนนอน แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย Ra ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จากผลลัพธ์ที่ได้จากการพิจารณาผลการ

วิเคราะห์กราฟอิทธิพลหลักของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a นี้ มีความสอดคล้องสัมพันธ์กับผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมเชิงสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 3.7



ภาพที่ 3.4 กราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a

เมื่อทำการพิจารณากราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ (Interaction Plot) ของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a ดังแสดงในภาพที่ 3.4 พบว่า เส้นกราฟของอิทธิพลร่วมกันทุกเทอมพารามิเตอร์ทั้งที่มีผลกระทบร่วมกันระหว่าง 2 พารามิเตอร์ และ 3 พารามิเตอร์นั้น มีเส้นกราฟที่ไขว้กันอย่างชัดเจน และไม่มีแนวโน้มขนานไปทางเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า มีอิทธิพลต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจะเห็นได้จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์กราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ต่อค่าความหยาบผิวเฉลี่ย R_a นี้ มีความสอดคล้องสัมพันธ์กับผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมเชิงสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 3.7

บทที่ 4

สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบ

การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม (Optimization Analysis) ด้วยเทคนิควิธีการเชิงสถิติ (Statistical) เกี่ยวกับค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบในการเคลือบผิว MoN กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลสด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ.รีแอกทีฟสเปตเตอริง จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลสในการเคลือบ MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ.รีแอกทีฟสเปตเตอริง

4.1 สถานะที่เหมาะสมเชิงสถิติ

ผลลัพธ์เชิงสถิติเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC), แรงดัน (Pressure) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์เชิงสถิติเกี่ยวกับการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Hardness	Maximum	25	30	30	1	1
Ra	Minimum	0	0	1	1	1

Global Solution

DC current	=	0.45
Pressure	=	0.01
Ar/N2	=	0.5

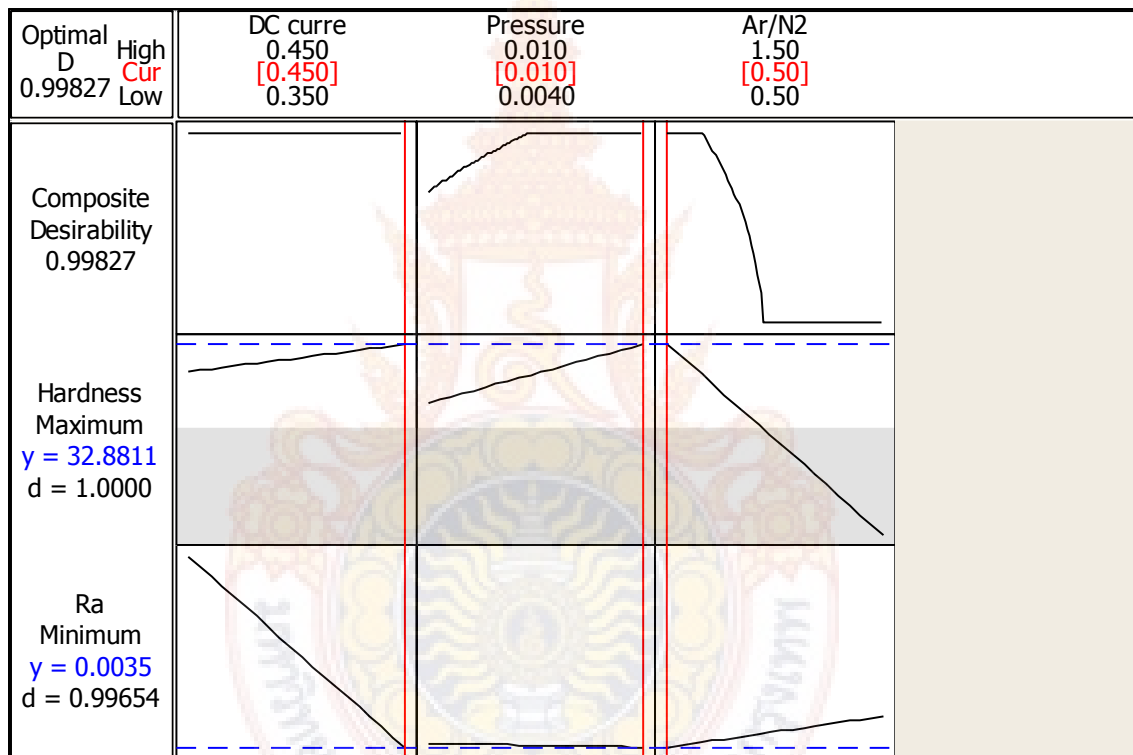
Predicted Responses

Hardness	=	32.8811	,	desirability =	1.000000
Ra	=	0.0035	,	desirability =	0.996538

Composite Desirability = 0.998268

การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม (Optimization) ด้วยเทคนิควิธีการเชิงสถิติ (Statistical) เกี่ยวกับค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบในการเคลือบผิว MoN กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลสด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ.รีแอกทีฟสเปตเตอริง โดยกำหนดสมมติฐานในการทดลองเป็นพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ของผิว

เคลือบในการเคลือบผิว MoN กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลสกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง คือ กระแสไฟฟ้า (DC), แรงดัน (Pressure) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) สามารถสรุปได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมมากที่สุดในการปรับระดับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.45 A, แรงดัน (Pressure) ที่ 0.01 mbar และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/C₂H₂) ที่ 0.50 จะทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) มากที่สุด และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) น้อยที่สุด ของผิวเคลือบในการเคลือบผิว MoN กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลสกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง ค่าความแข็ง (Hardness) มากที่สุด คือ 32.8811 และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) น้อยที่สุด คือ 0.0035 และเมื่อพิจารณาค่าความพึงพอใจเชิงสถิติ (Desirability) แล้ว พบว่า มีค่าความพึงพอใจเชิงสถิติสูงสุดถึง 99.8268% ซึ่งถือว่ามากจนเกือบ 100%



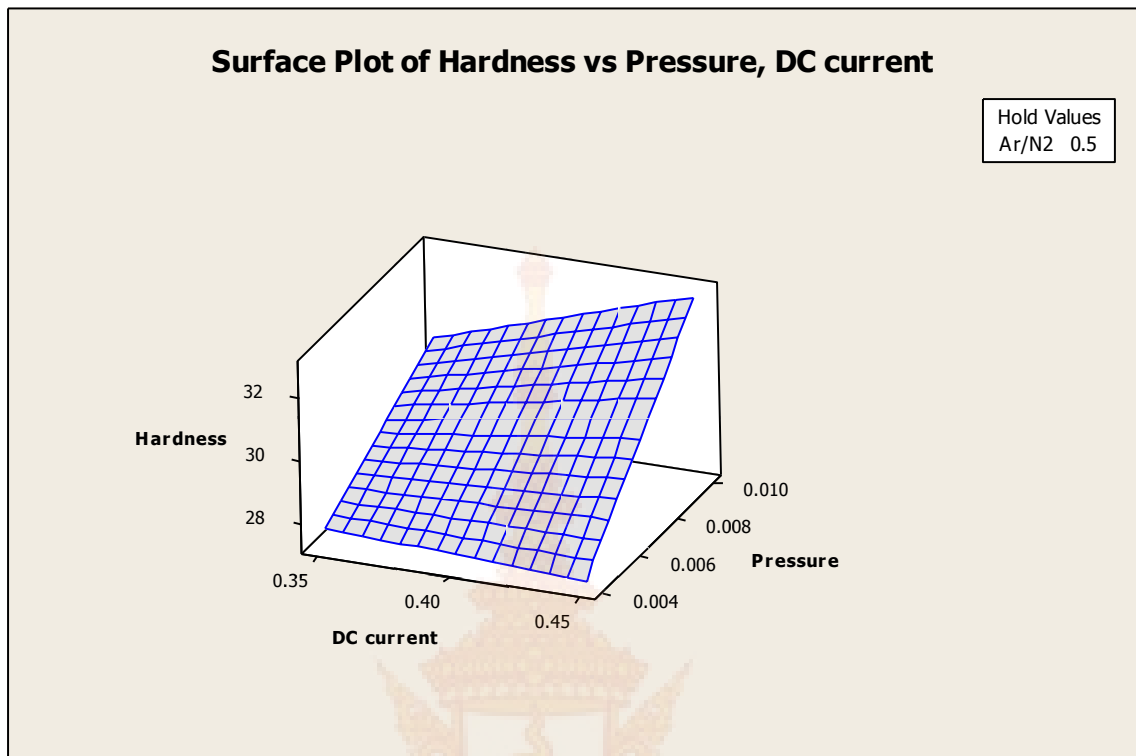
ภาพที่ 4.1 ผลลัพธ์เชิงสถิติเกี่ยวกับการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม

4.2 กราฟพื้นผิวตอบสนอง

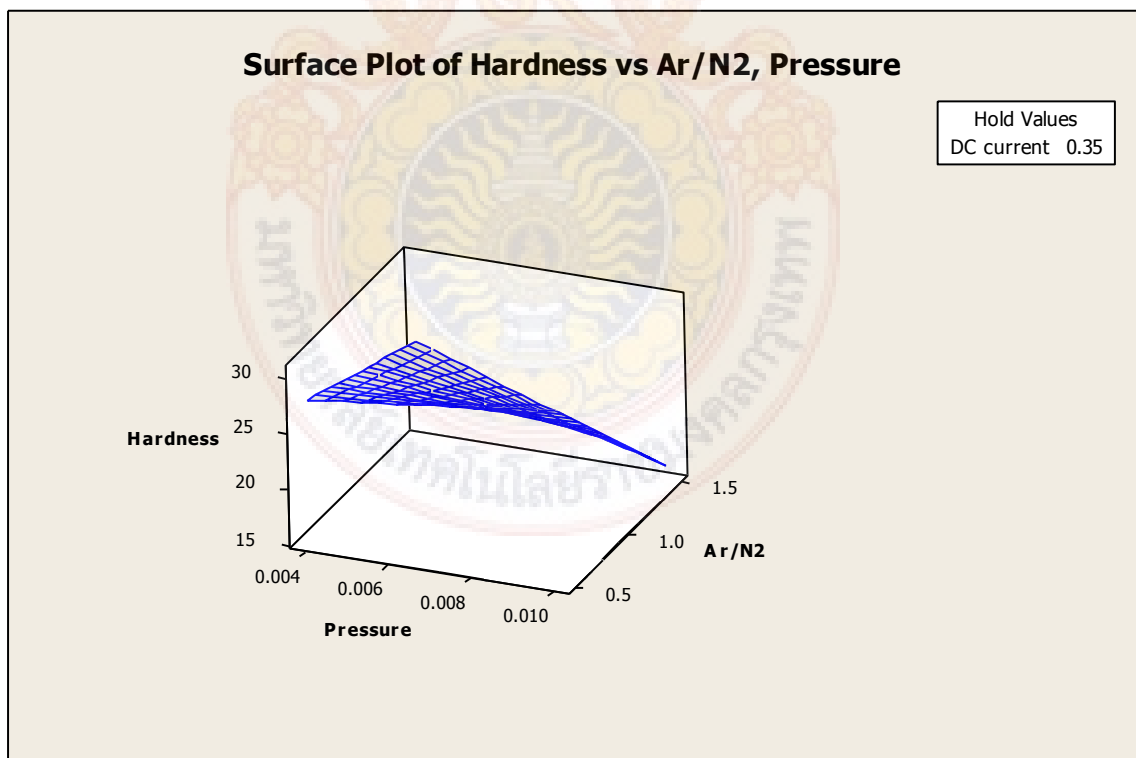
การวิเคราะห์จากกราฟพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Plot) จะเป็นการยืนยันความถูกต้องร่วมกับผลลัพธ์จากการวิเคราะห์สภาวะที่เหมาะสม (Optimization Analysis) โดยดำเนินการวิเคราะห์เปรียบเทียบพารามิเตอร์เป็นคู่ สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ กระแสไฟฟ้า (DC) กับแรงดัน (Pressure) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่า ค่าความแข็ง (Hardness) สูงสุด

จะได้อามาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.45 A, แรงดัน (Pressure) ที่ 0.01 mbar โดย
การคงที่ค่าพารามิเตอร์อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ที่ 0.5

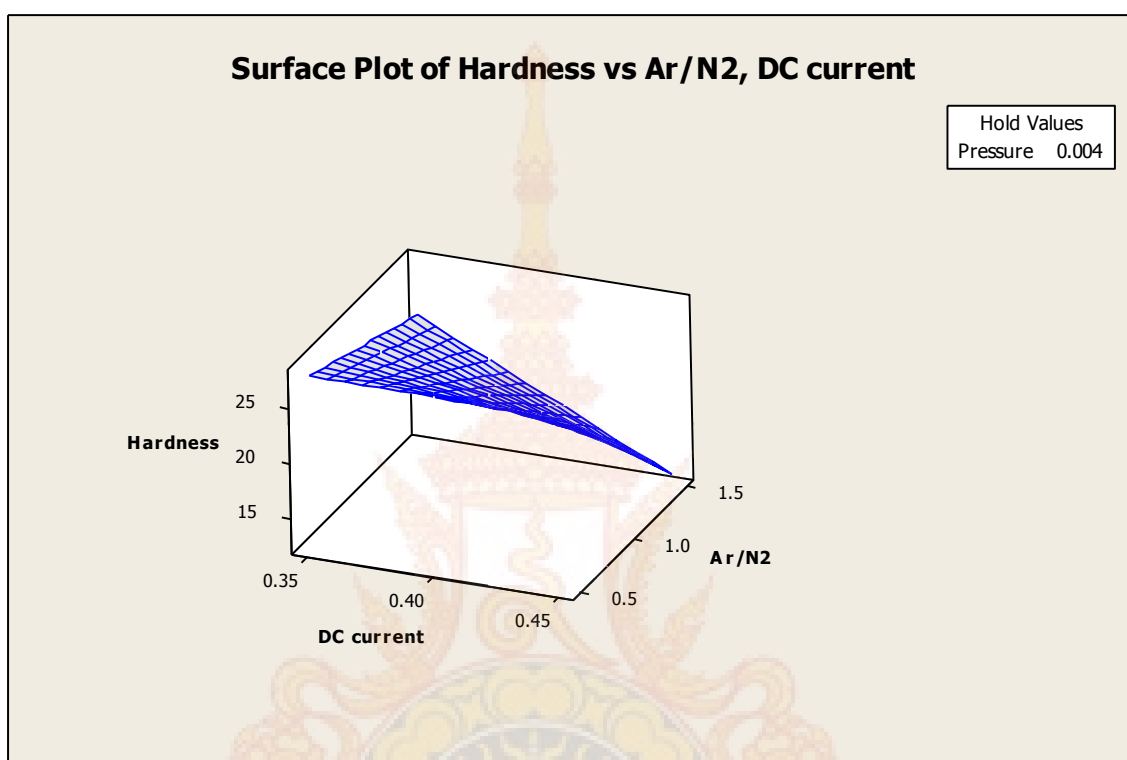


ภาพที่ 4.2 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันต่อค่าความแข็ง



ภาพที่ 4.3 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างแรงดันกับอัตราส่วน Ar/N ต่อค่าความแข็ง

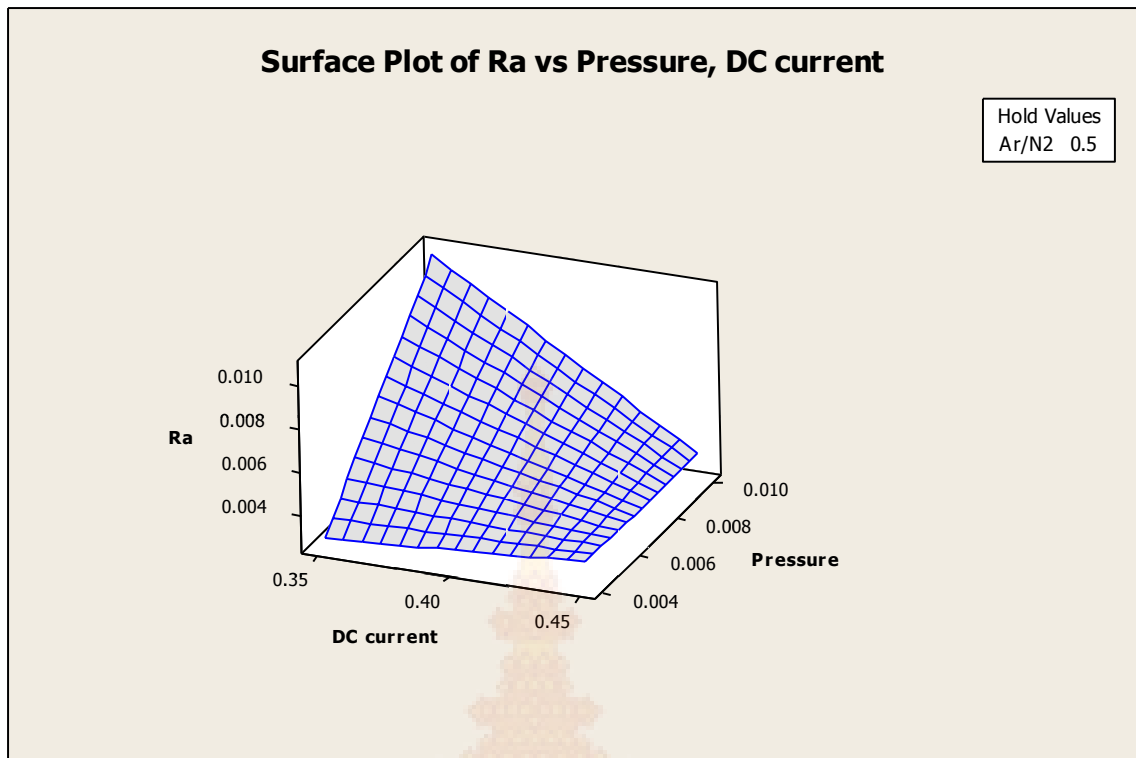
เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) กับอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่า ค่าความแข็ง (Hardness) สูงสุด จะได้มาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) ที่ 0.01 mbar, อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ที่ 0.50 โดยการคงที่ค่าพารามิเตอร์ กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.40 A



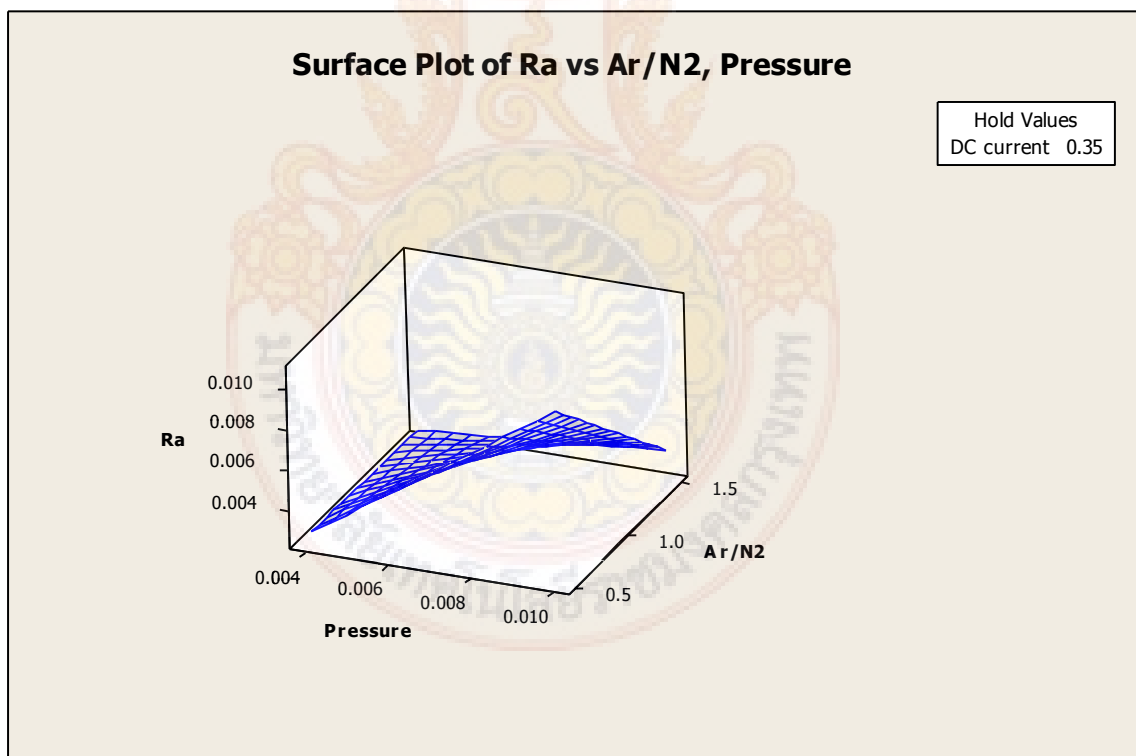
ภาพที่ 4.4 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราส่วน Ar/N ต่อค่าความแข็ง

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ กระแสไฟฟ้า (DC) กับอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่า ค่าความแข็ง (Hardness) สูงสุด จะได้มาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.45 A, อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ที่ 0.5 โดยการคงที่ค่าพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) ที่ 0.004 mbar

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ กระแสไฟฟ้า (DC) กับแรงดัน (Pressure) ดังแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่า ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) ต่ำสุด จะได้มาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.45 A, แรงดัน (Pressure) ที่ 0.01 mbar โดยการคงที่ค่าพารามิเตอร์อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ที่ 0.5



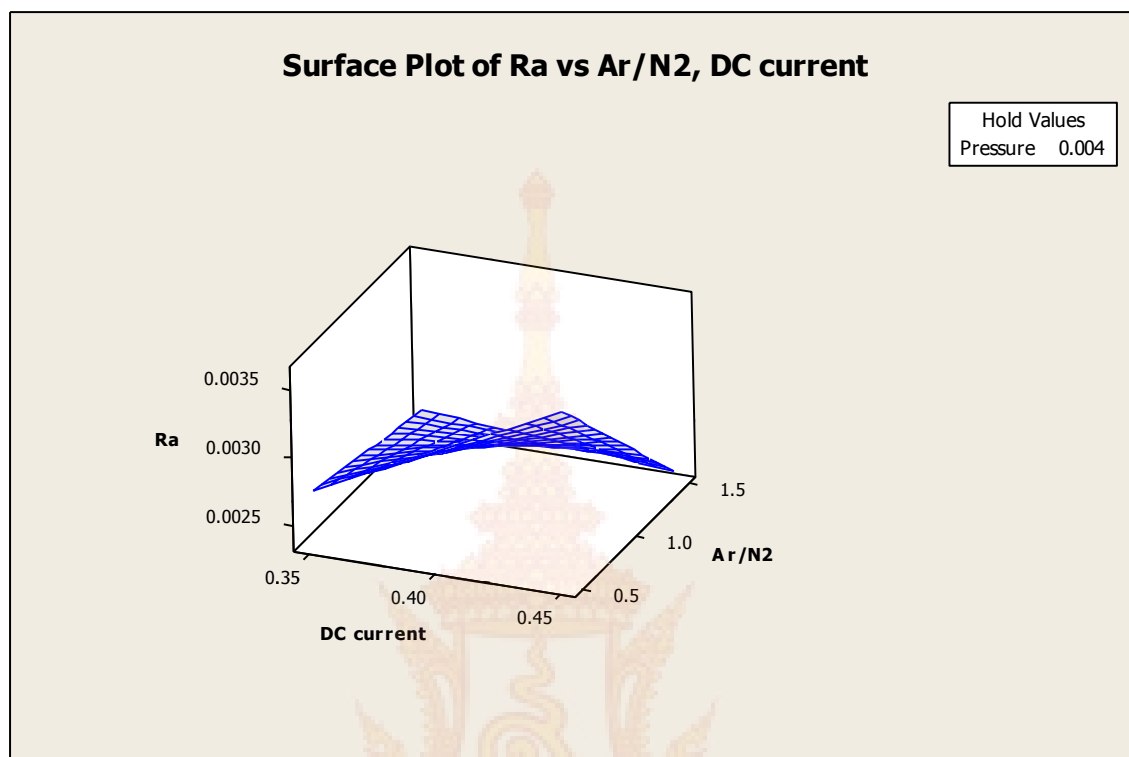
ภาพที่ 4.5 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันต่อค่าความหยาบผิว (Ra)



ภาพที่ 4.6 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างแรงดันกับอัตราส่วน Ar/N ต่อค่าความหยาบผิว (Ra)

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) กับอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ดังแสดงในภาพที่ 4.6 พบว่า

ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) ต่ำสุด จะได้มาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) ที่ 0.01 mbar, อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ที่ 0.50 โดยการคงที่ค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.40 A



ภาพที่ 4.7 กราฟพื้นผิวดตอบสนองระหว่างกระแสไฟฟ้ากับอัตราส่วน Ar/N ต่อค่าความหยาบผิว (Ra)

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวดตอบสนองระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) กับอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ดังแสดงในภาพที่ 4.7 พบว่า ค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) ต่ำสุด จะได้มาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.45 A, อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ที่ 0.5 โดยการคงที่ค่าพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) ที่ 0.004 mbar

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบผิวโมลิบดีนัมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องการการศึกษา ได้แก่ พารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ระดับ 0.35 A, 0.40 A, 0.45 A พารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) ที่ระดับ 0.004 mbar, 0.007 mbar, 0.010 mbar และพารามิเตอร์อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ที่ระดับ 0.5, 1.0, 1.5 ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง (Hardness) และค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) จึงได้ทำการศึกษาถึงระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของทั้ง 3 พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ ที่จะส่งผลให้ตะขोให้มีค่าความแข็ง (Hardness) มากที่สุด และค่าความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) ต่ำที่สุด โดยประยุกต์ใช้การทดลองเชิงสถิติตามหลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment : DOE)

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ในการเคลือบผิว MoN ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริง

พารามิเตอร์	ระดับพารามิเตอร์ 3 ระดับ		
กระแสไฟฟ้า (A)	0.35	0.40	0.45
แรงดัน (mbar)	0.004	0.007	0.010
อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน	0.5	1.0	1.5

สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดค่าความแข็ง (Hardness) มากที่สุด และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ต่ำที่สุด ได้แก่ ในการปรับระดับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.45 A, แรงดัน (Pressure) ที่ 0.01 mbar และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซไนโตรเจน (Ar/N) ที่ 0.50 จะทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) มากที่สุด และค่าความหยาบผิวเฉลี่ย (Ra) ต่ำที่สุด คือ 32.8811 และ 0.0035 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการดำเนินการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการเคลือบชิ้นงานรูปร่างลักษณะอื่นๆ ด้วยกระบวนการ อาร์.เอฟ. รีแอคทีฟสปัตเตอริงนั้น

จำเป็นต้องมีการศึกษาพารามิเตอร์อื่นๆ ที่อาจจะมีผลกระทบต่อค่าความแข็ง (Hardness) และความหยาบผิวโดยเฉลี่ย (Ra) เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด

นอกจากนี้แล้ว ในการพัฒนางานวิจัยนี้ ยังมีความน่าสนใจอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของวัสดุชนิดอื่นๆ ที่นำมาเคลือบ หรือการศึกษาในส่วนของสมบัติเชิงกลอื่นๆ ที่จะช่วยให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านอุตสาหกรรม



บรรณานุกรม

- [1] M. Polok-Rubinić, L.A. Dobrzański and M. Adamiak. 2009. **Comparison of the PVD coatings.** Archives of Materials Science and Engineering. 38, 2 August 2009.
- [2] C. Mendibide, J. Fontaine, P. Steyer and C. Esnouf. 2004. **Dry sliding wear model of nanometer scale multilayered TiN/CrN PVD hard coatings.** Tribology Letters, vol. 17, No. 4, November 2004.
- [3] M. Polok – Rubinić, K. Łukaszewicz, L.A. Dobrzański and M. Adamiak. 2007. **Comparison of the PVD coating deposited onto hot work tool steel and brass substrates.** Archives of Materials Science and Engineering. 24, 2 October 2007.
- [4] Pavithra Prashanth. 2012. **Thermal Evaporator.** Equipment technologist, Center for excellence in Nanoelectronics, Indian Institute of science. India.
- [5] D.M. Mattox. 1998. **Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing.** Noyes Publication, Westwood, NJ. USA.
- [6] <http://www.kobelcokaken.co.jp/target/english/index.html>
- [7] M.K. Kazmanli, M. Urgan and A.F. Cakir. 2003. **Effect of nitrogen pressure, bias voltage and substrate temperature on the phase structure of Mo – N coating produced by cathodic arc PVD.** Surface and Coating Technology, 167 : 77-82.
- [8] K. Inumaru, K. Baba and S. Yamanaka. 2006. Physica B 383 : 84–85.
- [9] J.F. Yang, Z.G. Yuan, Q. Liu, X.P. Wang and Q.F. Fang, Mater. 2009. Res. Bull 44 : 86–90.
- [10] Xiaodong Zhu, Di Yue, Chen Shang, Mingtao Fan and Bin Hou. 2012. **Phase Composition and Tribological Performance of Molybdenum Nitride Coatings Synthesized by IBAD.** Surface & Coatings Technology.
- [11] <http://www.vts.vtsun.com>
- [12] Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery. 2002. “Response Surface Methodology”. 2nd ed. United States of America. John Wiley & Sons.
- [13] Jianliang Li, Dangsheng Xiong, Hongyan Wu, Heguo Zhu, Jian Kong และ Rajnesh Tyagi. 2011. **Tribological properties of MoN layer on silver-containing nickel-base alloy at high temperatures.** Wear 271 : 987-993.

- [14] Charnnarong Saikaew, Anurat Wisitsoraat, Rangrit Sootticoon. 2010. **Optimization of carbon doped molybdenum oxide thin film coating process using designed experiments.** Surface & Coatings Technology, 204 : 1493–1502.
- [15] Jennifer R. Mawdsley, Y. Jennifer Su, K.T. Faber, Thomas F. Bernecki. 2001. **Optimization of small-particle plasma-sprayed alumina coatings using designed experiments.** Journal of Materials Science and Engineering, 308 : 189–199.
- [16] P. Villiger, Ch. Sprecher, J.A. Peters. **Parameter optimisation of Ti-DLC coatings using statistically based methods.** Journal of Surface and Coatings Technology 116–119 (1999) 585–590.

