



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

สถานะที่เหมาะสมเป็นสิ่งที่มีความสำคัญต่องานเคลือบผิวโมลิบดีนัมคาร์ไบด์ (MoC) ที่มีคุณภาพ ซึ่งได้จากการควบคุมพารามิเตอร์งานเคลือบผิวโดยการปรับปรุงผ่านระบบการวิเคราะห์ความถูกต้องเกี่ยวกับอิทธิพลของกระบวนการเคลือบผิว MoC ด้วยวิธีการสปัตเตอริงโดยการออกแบบการทดลอง ซึ่งพารามิเตอร์ทั้ง 3 พารามิเตอร์ในกระบวนการเคลือบผิว MoC ได้แก่ กระแสไฟฟ้า, แรงดัน และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน จะถูกนำมาทำการศึกษาเพื่อหาสถานะที่เหมาะสมของค่าความแข็งสูงสุด ภายหลังการดำเนินการทดลองเชิงสถิติ พบว่า พารามิเตอร์ทั้ง 3 พารามิเตอร์ มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง บทสรุปงานวิจัย คือ สถานะที่เหมาะสมของกระบวนการเคลือบผิว MoC ด้วยวิธีการสปัตเตอริงที่สามารถทำให้ได้มาซึ่งค่าความแข็งสูงสุด ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC) ที่ 0.4 A, แรงดัน (Pressure) ที่ 0.0040 mbar และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ที่ 0.50

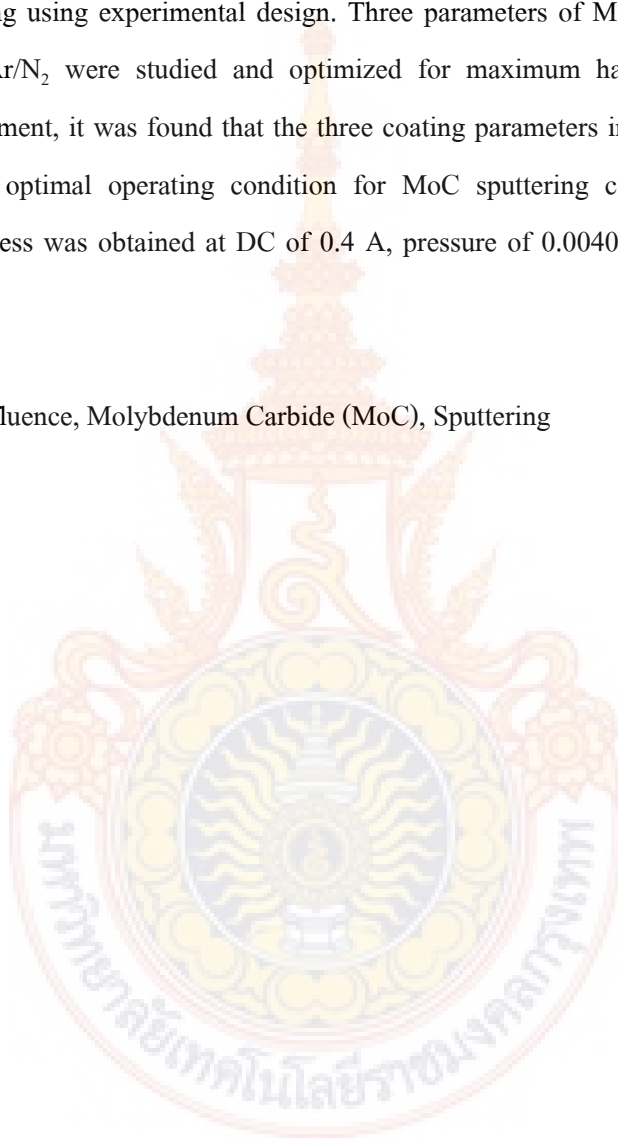
คำสำคัญ : อิทธิพล, โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ (MoC), กระบวนการสปัตเตอริง



Abstract

Optimized condition, an important quality molybdenum nitride (MoC) coating controlled from coating parameters, was improved by systematically investigating the influence of MoC sputtering coating using experimental design. Three parameters of MoC coating including DC, pressure, and Ar/N₂ were studied and optimized for maximum hardness. After conducting statistical experiment, it was found that the three coating parameters influenced the hardness. In conclusion, the optimal operating condition for MoC sputtering coating that produced the maximum hardness was obtained at DC of 0.4 A, pressure of 0.0040 mbar, and Ar/N₂ ratio of 0.50.

Keyword : Influence, Molybdenum Carbide (MoC), Sputtering



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ได้รับทุนอุดหนุนงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ.2557 จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

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

คณะผู้จัดทำโครงการ

โอริส มณีสาย

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	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการสเปตเตอริง (Sputtering Process)	4
2.2 อัตราการเคลือบผิว (Coating Rate)	5
2.3 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM)	6
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	11

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

3.1 การวางแผนงานวิจัย	13
3.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการเคลือบ MoC ด้วยกระบวนการสเปตเตอริง	14
3.3 การดำเนินงานวิจัย	14

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมเชิงสถิติ	
4.1 การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม	18
4.2 การวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนอง	19
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลงานวิจัย	22
5.2 ข้อเสนอแนะ	23
บรรณานุกรม	24



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การเคลือบผิวชิ้นส่วนโลหะในงานอุตสาหกรรม มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะสมบัติความทนทานต่อการสึกหรอ การเคลือบผิวด้วยสารเคลือบโลหะผสมโคบอลต์-ทังสเตน สามารถช่วยทำให้อัตราการสึกหรอลดลงจากการเสียดสีแบบลื่นไถล ซึ่งสูงกว่าสูงกว่า โครเมียม 2–3 เท่า [1] การเคลือบผิวด้วยทังสเตนคาร์ไบด์-โคบอลต์ เมื่อมีการแรงกระทำที่อุณหภูมิ 900°C จะมีความแข็งที่สูงกว่าโครเมียม และในสภาวะปกติจะมีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าโครเมียมอีกด้วย [2] ปัจจุบันกระบวนการเคลือบผิวโลหะในงานอุตสาหกรรมมีการใช้วิธีการสเปกโตรอิเล็กโทรไลต์อย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความถูกต้องแม่นยำในการเคลือบผิวสูง และไม่มีมลพิษแบบงานเคลือบผิวที่ใช้น้ำยาเคลือบทางเคมีแบบเดิม การเคลือบผิวด้วยเทคโนโลยีสเปกโตรอิเล็กโทรไลต์ซึ่งงานที่ได้มีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าวิธี HVOF (High-velocity oxy-fuel) ประมาณ 2 เท่า ทั้งนี้เป็นการเคลือบด้วยไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) และ โครเมียมไนไตรด์ (CrN) แต่ถ้าหากเป็นการเคลือบแบบ DLC (Diamond Like Coating) จะมีความต้านทานการสึกหรอดีกว่าการเคลือบแบบ HVOF ประมาณ 1,000 เท่าเลยทีเดียว [3] การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกลของผิวเคลือบมีความสำคัญอย่างมากต่อการควบคุมคุณภาพผิวของชิ้นงานที่ได้จากการเคลือบ การประยุกต์ใช้วิธีการเชิงสถิติเพื่อหาค่าที่เหมาะสมมากที่สุดในการเคลือบผิวจึงถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำคัญ Villiger, Sprecher และ Peters [4] ใช้เทคนิควิธีการ Fractional Factorial Design ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อการเคลือบผิวด้วยวิธีการ Magnetron Sputtering พบว่า อัตราการไหลของก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2) มีผลต่อความหนาของผิวเคลือบ ดังนั้นผิวเคลือบที่ได้จากกระบวนการสเปกโตรอิเล็กโทรไลต์นั้น จะมีความแม่นยำถูกต้องตามความต้องการใช้งาน จำเป็นต้องมีการควบคุมปัจจัยของกระบวนการสเปกโตรอิเล็กโทรไลต์ให้มีความเหมาะสม วัสดุโมลิบดีนัม (Mo) มีสมบัติที่สำคัญเหมาะสมสำหรับใช้ในสภาวะที่มีความกดดันและอุณหภูมิสูง เมื่อผสมโมลิบดีนัม 2%-4% จะช่วยทำให้การต้านทานการเกิดสนิมดีขึ้น แม้จะใช้ในอุณหภูมิสูงๆ ก็ตาม

โมลิบดีนัมคาร์ไบด์ (MoC) มีสมบัติที่สำคัญอย่างมากต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม ได้แก่ มีสมบัติด้านความแข็งแรงสูง และสมบัติด้านกระตุ้นปฏิกิริยากับส่วนผสมในการเคลือบฟิล์มบาง อย่างไรก็ตามในระบบการเคลือบฟิล์มบาง MoC ยังคงมีความซับซ้อนอยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นด้านเทคนิควิธีการ ด้านอิทธิพลของปัจจัยต่างๆ ของระบบ เป็นต้น [5] นอกจากนี้ C.C.

Tripathi, Mukesh Kumar และ Dinesh Kumar [6] ได้ทำการศึกษาการเคลือบฟิล์มบาง MoC พบว่าการเติมธาตุคาร์บอน (Carbon) ในการเคลือบฟิล์มบาง MoC ที่จะทำให้อะตอมของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาสมบูรณ์มากที่สุดจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 700°C จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาจะเป็นการศึกษาสภาวะของปัจจัยที่ละปัจจัย ทำให้การวิเคราะห์เกี่ยวกับผลกระทบร่วมกันระหว่างปัจจัย (Interaction) ที่สำคัญถูกมองข้าม ส่งผลให้การควบคุมคุณภาพของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริงไม่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้น ในการศึกษางานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมจริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของปัจจัยต่างๆ ในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC), แรงดัน (Pressure) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$)

1.2.2 เพื่อกำหนดค่าของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง ได้แก่ กระแสไฟฟ้า, แรงดัน และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน

1.2.3 เพื่อศึกษาสมบัติและโครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบฟิล์มบาง MoN ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง ได้แก่ กระแสไฟฟ้า, แรงดัน และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน

1.3.2 ศึกษาสมบัติและโครงสร้างของชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง

1.3.3 ประยุกต์ใช้หลักการเชิงสถิติในการวิเคราะห์พฤติกรรมของปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ทบทวนทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปีดเตอริง

1.4.2 กำหนดปัจจัย (Factors) และระดับของปัจจัย (Level of Factors) การเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปีดเตอริงที่ต้องการทำการศึกษา ได้แก่ กระแสไฟฟ้า, แรงดัน และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน

1.4.3 ออกแบบแผนการทดลอง (DOE) ด้วยเทคนิคที่มีความเหมาะสมมากที่สุด

1.4.4 ออกแบบชิ้นงานทดสอบสำหรับการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปีดเตอริง พร้อมทั้งจัดเตรียมชิ้นงานทดสอบ (Substrate)

1.4.5 จัดเตรียมแผ่นวัสดุเคลือบโมลิบดีนัม (Mo) และก๊าซกระตุ้นกระบวนการ ได้แก่ ก๊าซอาร์กอน (Ar) และก๊าซอะเซทิลีน (C_2H_2)

1.4.6 ดำเนินการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปีดเตอริงตามแผนการทดลอง พร้อมทั้งบันทึกข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติของชิ้นงานทดสอบที่ได้

1.4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมทั้งค้นหาสถานะที่เหมาะสมด้วยหลักการเชิงสถิติ

1.4.8 ออกแบบการทดลองสำหรับการทดสอบเพื่อพิสูจน์สถานะที่เหมาะสมของปัจจัยต่างๆ ในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปีดเตอริง

1.4.9 ดำเนินการเคลือบตามแผนการทดลอง พร้อมทั้งบันทึกข้อมูล

1.4.10 วิเคราะห์ผลการทดลอง พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการดำเนินการ ก่อน-หลัง การตั้งค่าปัจจัยต่างๆ ในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปีดเตอริง

1.4.11 สรุปผลงานวิจัย และจัดทำรายงาน

1.4.12 เผยแพร่งานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบแนวทางที่เหมาะสมในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปีดเตอริง และใช้ข้อมูลจากการวิจัยเป็นแนวทางในการสนับสนุนในการตัดสินใจเลือกใช้การเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปีดเตอริง

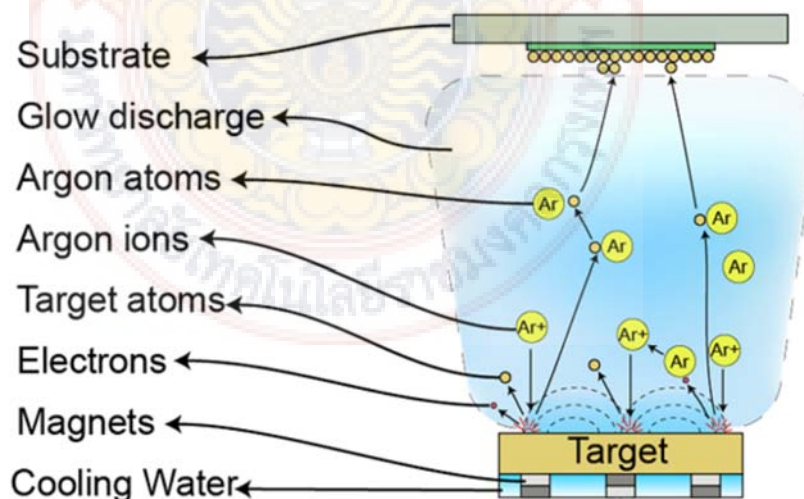
1.5.2 สามารถนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้กับสารเคลือบชนิดอื่นๆ ด้วยกระบวนการสปีดเตอริง เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีคุณภาพผิวเคลือบที่ดีในงานอุตสาหกรรม

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process)

กระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering Process) เป็นกระบวนการที่ทำให้อะตอม หรือกลุ่มของอะตอมบริเวณผิวหน้าของวัสดุของแข็งหลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคที่มีพลังงานสูง อนุภาคที่ใช้เป็นตัวชนนี้ อาจเป็นกลางทางไฟฟ้า หรือมีประจุก็ได้ แต่เนื่องจากการทำอนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงเพื่อใช้ในกระบวนการสปัตเตอริงทำได้ค่อนข้างยาก จึงนิยมใช้วิธีเร่งอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามไฟฟ้า ซึ่งยังสามารถควบคุมระดับพลังงานของไอออนได้ตามต้องการ อนุภาคพลังงานสูงนี้จะต้องถูกผลิตขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้กระบวนการเคลือบสารเกิดขึ้นได้ต่อเนื่องจนได้ความหนาฟิล์มสารเคลือบตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ลำอนุภาคจากปืนไอออน (Ion Gun) ที่มีปริมาณการผลิตไอออนในอัตราสูง หรือการใช้กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ (Glow Discharge) ซึ่งนำไปใช้ในกระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยวิธี ดีซี-แมกนีตรอนสปัตเตอริง (DC-magnetron Sputtering) เป็นต้น เนื่องจากปืนไอออนมีราคาค่อนข้างสูงและให้ไอออนในพื้นที่แคบ กระบวนการสปัตเตอริงทั่วไปในระดับอุตสาหกรรมจึงนิยมใช้กระบวนการโกลว์ดิสชาร์จ



ภาพที่ 2.1 การเคลือบผิวด้วยกระบวนการ Magnetron Sputtering [7]

ในกระบวนการสเป็คเตอรืง มีปัจจัยที่สำคัญของการดำเนินการ คือ อัตราของการเคลือบผิว หรือความหนาของผิวเคลือบ และสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าว เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะของการเคลือบดังนี้

2.2 อัตราการเคลือบผิว (Coating Rate)

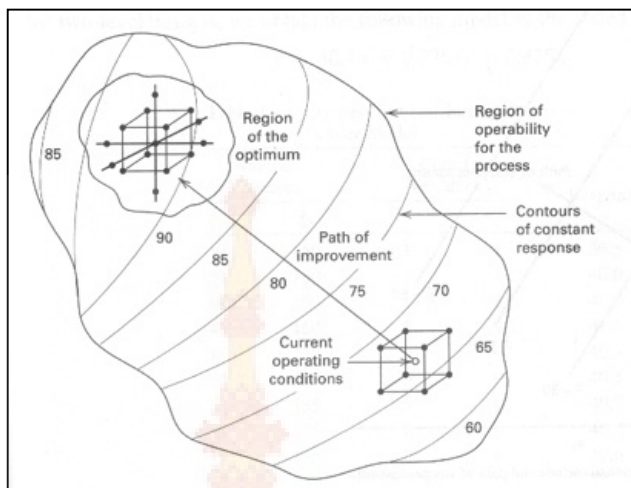
ปัจจัยเกี่ยวกับอัตราการเคลือบผิว คือ การเพิ่มความหนาของผิวเคลือบต่อหนึ่งหน่วยเวลา เมื่อพิจารณาจากกลไกและสภาพแวดล้อมของการเคลือบ อัตราการเคลือบด้วยวิธีสเป็คเตอรืงนี้ ขึ้นกับปริมาณของอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบและสภาพการขนส่งอะตอมเหล่านี้ไปยังฐานรองรับ อัตราการเคลือบสูงถ้าอะตอมของเป้าถูกสเป็คเตอรืงออกมาได้มากและสามารถเคลื่อนที่ไปยังฐานรองรับได้สะดวก ดังนั้นอัตราการเคลือบจึงขึ้นกับกระแสไฟฟ้า ความต่างศักย์ และความดันก๊าซของการดิสชาร์จ และลักษณะของระบบการเคลือบฟิล์มบาง เช่น ระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ ซึ่งสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$R \propto \frac{IV}{Pd} \quad \dots (2.1)$$

โดยที่ R คือ อัตราการเคลือบผิว
 IV คือ กระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ของการดิสชาร์จ
 Pd คือ ความดันก๊าซและระยะห่างระหว่างเป้ากับฐานรองรับ

สมบัติเชิงกลของผิวเคลือบ (Mechanical Properties) ปัจจัยเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของผิวเคลือบขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบที่นำมาใช้เคลือบ เช่น ไทเทเนียมไนไตรด์ (TiN) มีความแข็งแรงสูง ความต้านทานการสึกหรอ และความต้านทานการกัดกร่อนสูง นิยมนำมาเคลือบผิวเครื่องมือตัดหรือชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ต้องการความต้านทานสูง ส่วน hBN (Hexagonal Boron Nitride) เคลือบเพื่อป้องกันความร้อนและเพื่อเป็นฉนวนทางไฟฟ้า และ a-Si: H (Hydrogenated Amorphous Silicon) เคลือบเพื่อใช้งานเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semi conductor) เป็นต้น

2.3 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) [9]



ภาพที่ 2.2 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (RSM) เป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่อยู่จุดบนพื้นผิวผลตอบสนองที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ณ เงื่อนไขการทำงานปัจจุบัน ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้ง และแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ว วัตถุประสงค์ คือ การนำการทดลองไปใช้เป็นแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุด และอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะเป็นการค้นพบกับจุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อค้นพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง เป็นต้น เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้สามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากภาพพบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองเปรียบเสมือนการปีนภูเขา ซึ่งยอดของมักจะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด หรือกรณีถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าต่ำที่สุดในที่นี้ จะคิดเสมือนการเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา วัตถุประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจที่สุด

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology : RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad \dots (2.2)$$

โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เกิดมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวตอบสนองได้ดังนี้

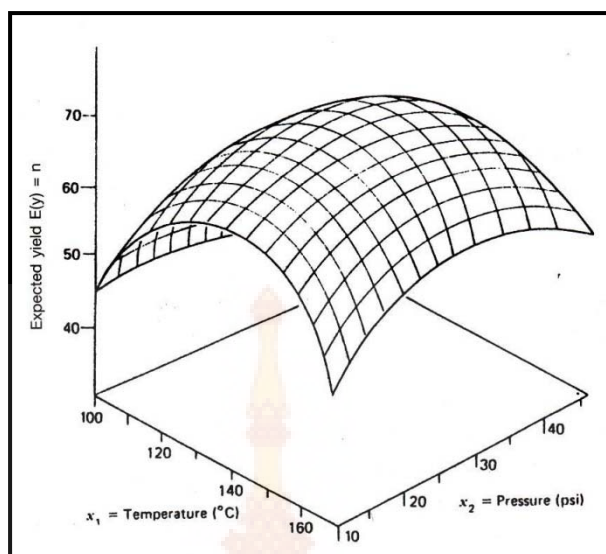
$$\eta = f(x_1, x_2) \quad \dots (2.3)$$

ซึ่งอาจจะเรียกว่า “พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface)” โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปของกราฟิก โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ อาจจะเป็นแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่ง ดังสมการที่ 2.5

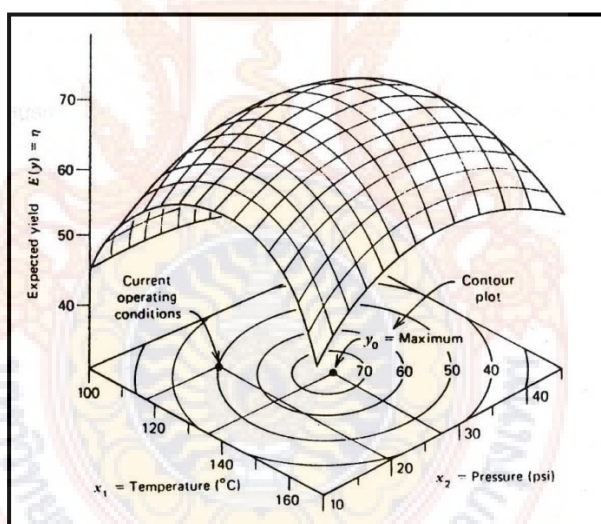
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad \dots (2.4)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องกับระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดังสมการที่ 2.5

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{i+1} x_i^2 + \dots + \sum_{i=1}^k \beta_{2i} x_i x_i + \varepsilon \quad \dots (2.5)$$



ภาพที่ 2.3 พื้นผิวตอบสนองแบบ 3 มิติ

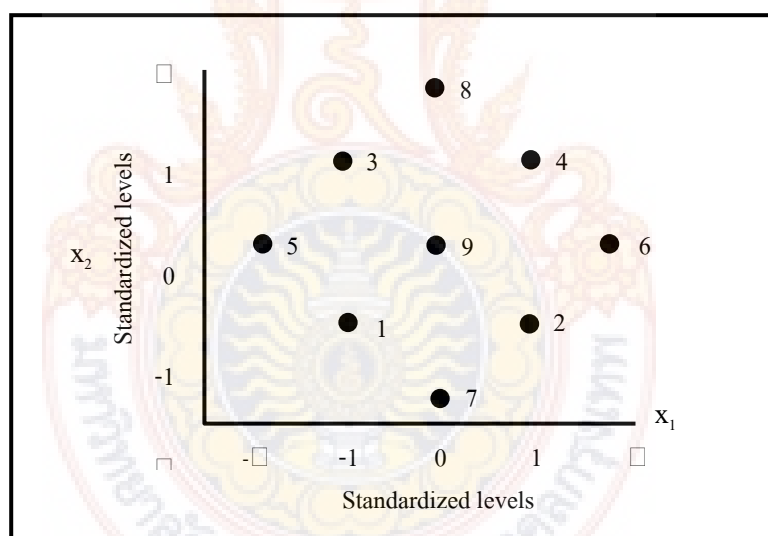


ภาพที่ 2.4 กราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผลตอบสนอง แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่มีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวตอบสนองมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด การป็นด้วยทางชัน การออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่งและการออกแบบสำหรับ

การฟิตแบบจำลองอันดับสอง ซึ่งการออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองอันดับสองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองควอดราติกของผลตอบ มีวิธีการที่น่าสนใจอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ

2.3.1 การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม หลักการพื้นฐานของการออกแบบส่วนประสมกลางเป็นการขยายการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k ดังแสดงในภาพที่ 2.5 ซึ่งในรูปแบบนี้เป็นชนิดแฟกทอเรียล 2^k ที่ประกอบด้วย $2k$ หรือจุดที่ 1-4 และเพิ่มจำนวนการทดลองที่จุดศูนย์กลาง (Center Runs) ในรูป คือ จุดที่ 9 กับแนวแกน (Axial Point) ที่เรียกว่าแนวรูปดาว (Star Runs) ซึ่งกำหนดให้เป็นค่า α ในรูป คือ จุดที่ 5-8 ค่า α นี้จะเป็นตัวบอกให้ทราบถึงระยะปลายสุดของระดับของปัจจัยที่สนใจทั้งทางต่ำ (Low) และด้านสูง (High) เพื่อให้สามารถพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณตามระยะทางจากจุดกึ่งกลางของการออกแบบ ซึ่งคุณสมบัตินี้เรียกว่า การออกแบบการหมุน (Rotation Design) คือ ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลมซึ่งเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งที่ใช้ในแบบจำลองกำลังสองเพื่อหาพื้นผิวตอบสนอง



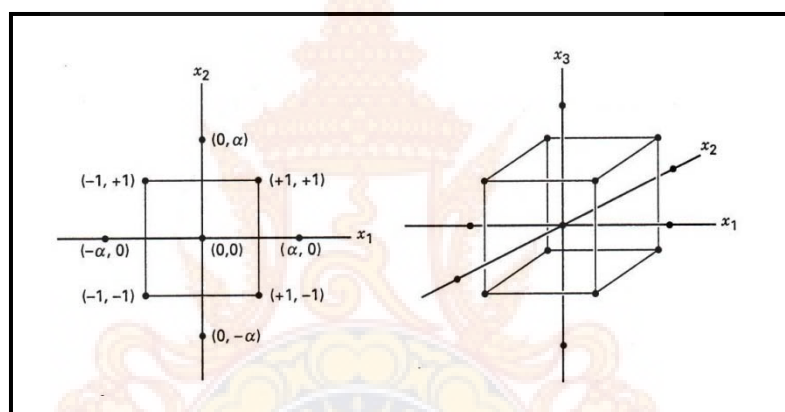
ภาพที่ 2.5 จุดของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^2 ที่มีการขยายจุด

โดยทั่วไปตำแหน่งของการออกแบบส่วนประสมกลางจะประกอบด้วยแฟกทอเรียล 2^k ที่มี n_f รัน , 2^k รันในแนวแกนหรือรูปดาว (Star) และ n_c รันที่จุดศูนย์กลาง ดังภาพที่ 2.6 แสดงการออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$ ปัจจัย

การพัฒนาของการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ 2^k ถูกนำมาใช้เพื่อฟิตแบบจำลองอันดับ

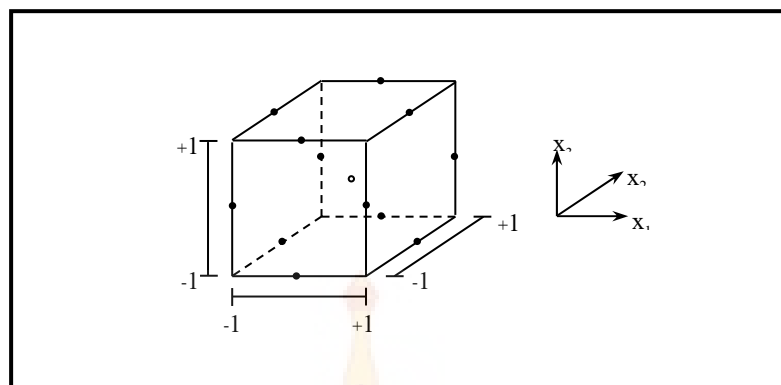
หนึ่งแล้วพบว่าแบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับข้อมูล ดังนั้น จึงมีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อให้สามารถใส่พจน์วอดดราติก (Quadratic) ลงในแบบจำลองได้ออกแบบส่วนประสมกลางเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการฟิตแบบจำลองอันดับสอง โดยต้องกำหนดการออกแบบพารามิเตอร์ 2 ตัว นั่นคือ ระยะทาง α ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบและจำนวนของจุดศูนย์กลาง n_c

การออกแบบส่วนประสมกลางสามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ α ค่าของ α สำหรับความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนแกนของแฟกทอเรียลของการออกแบบหมายความว่า $\alpha = (n_f)^{1/4}$ จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประสมกลางที่สามารถหมุนได้ โดยที่ n_f คือ จำนวนของจุดที่ถูกใช้ในส่วนแกนแฟกทอเรียลของการออกแบบ



ภาพที่ 2.6 การออกแบบส่วนประสมกลาง สำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$

2) การออกแบบบ็อกซ์-เบนเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการและการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย



ภาพที่ 2.7 การออกแบบบล็อกซ์-เบนเคน สำหรับ $k = 3$

เนื่องจากการออกแบบบล็อกซ์-เบนเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงรัศมี 2 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ ดังแสดงในภาพที่ 2.8 ซึ่งการกระทำเช่นนี้มีประโยชน์มากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมเอาปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S. Kacim, L. Binst, F. Reniers และ F. Bouillon (1996) ทำการศึกษาโครงสร้างการเคลือบผิวโมลิบดีนัมคาร์ไบด์ (MoC) ด้วยกระบวนการ D.C. Reactive Sputtering ในบรรยากาศระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซมีเทน (Ar/CH_4) กับชั้นงานแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) พบว่า คาร์บอน (Carbon) ที่ผิวเคลือบจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อแรงดันก๊าซมีเทน (CH_4) เพิ่มขึ้น และขนาดของเกรนจะลดลงเมื่อแรงดันก๊าซในระบบเพิ่มขึ้น

Mutschall และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาการตอบสนองก๊าซ NH_3 ของฟิล์มบางโมลิบดีนัมไตรออกไซด์ ซึ่งทำการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีการ RF-Planer Magnetron Reaction Sputtering โดยมีเป้าเคลือบเป็นโมลิบดีนัม 99.95% ภายใต้ความดัน 0.9 Pa สัดส่วนก๊าซ O_2/Ar อยู่ระหว่าง 20-100% พลังงานในการเคลือบ 360 watt โดยมีฐานรองรับเป็นซิลิกอน จากการศึกษาในการทดสอบการตอบสนองต่อก๊าซ H_2 , CH_4 ที่ 1000 ppm และก๊าซ NH_3 , NO_2 , CO , SO_2 ที่ 100 ppm ภายใต้อุณหภูมิการทำงาน 250-470°C ก๊าซ CO , SO_2 , CH_4 มีการตรวจจับไม่ดี ขณะที่ NH_3 มีการตรวจจับได้ดีที่สุดอุณหภูมิสูงสุด 425°C

Montgomery (1999) ได้ศึกษาการใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistically Designed Experiments) ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่และปรับปรุงผลิตภัณฑ์เดิมให้มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งยกตัวอย่างการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตสารกึ่งตัวนำ แผนการทดลองที่ใช้ คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) โดยปัจจัยที่สนใจมี 3 ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ (Level) และมีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) 2 ปัจจัย วัตถุประสงค์ในการศึกษา คือ ให้ค่าผลตอบแทนที่สนใจนั้นใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ตั้งไว้มากที่สุด จากการศึกษาพบว่า การใช้การออกแบบการทดลองเชิงสถิติสามารถปรับปรุงกระบวนการผลิตและทำให้ได้ผลผลิตตรงตามเป้าหมายที่กำหนด ซึ่งสามารถลดความแปรปรวนที่เกิดจากการผลิต ลดเวลาในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนทั้งหมดที่ใช้ในการผลิตได้

Montgomery (2000) ได้ใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงสถิติและวิธีการพื้นผิวตอบสนองในการพัฒนาและปรับปรุงการผลิต โดยแบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการกำหนดคุณลักษณะ (Characterization) ขั้นตอนการควบคุม (Control) และขั้นตอนการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) พร้อมทั้งยกตัวอย่าง กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้แผนการทดลองแฟร็กชันนอลแบบครึ่งหนึ่งของวิธีการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (One-half Fractional Factorial Design) ปัจจัยที่ทำการศึกษามี 5 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และมีปัจจัยรบกวน 2 ปัจจัย โดยผลตอบแทนที่สนใจมี 2 รูปแบบ วัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ ลดความแปรปรวนในการบัดกรีให้น้อยที่สุด ในขณะที่ปริมาณการบัดกรีได้ตรงตามเป้าหมายที่วางไว้ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถทำให้หาเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดของแต่ละปัจจัย โดยทำให้ได้ปริมาณการบัดกรีโดยเฉลี่ยตรงตามเป้าหมาย และเกิดความแปรปรวนในการบัดกรีน้อยที่สุด

Hung และคณะ (2002) ได้ประยุกต์แผนการออกแบบการทดลองในการพัฒนาการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำมาจากพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่เรียกว่า Polypyrrole ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นอุปกรณ์เซนเซอร์ได้ แผนการทดลองแฟร็กชันนอลแฟกทอเรียล (Fractional Factorial Design) ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในกรณีที่มีจำนวนปัจจัยมากๆ และวิธีการพื้นผิวตอบสนองด้วยการออกแบบส่วนผสมกลางถูกนำมาใช้ในการเก็บข้อมูล และทำการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า อีกทั้งยังสามารถหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

การดำเนินงานวิจัย

3.1 การวางแผนงานวิจัย

[illegible]

3.2 พารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการเคลือบ MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

พารามิเตอร์ในการเคลือบผิวด้วยวิธีสปัตเตอริงนั้น มีอยู่มากมายหลายพารามิเตอร์ด้วยกัน แต่ละพารามิเตอร์ก็จะมีอิทธิพลที่แตกต่างกันออกไป พารามิเตอร์ในการเคลือบ MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอริงมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อคุณภาพผิวงานเคลือบที่ดี รวมไปถึงสมบัติเชิงกลต่างๆ ของผิวงานเคลือบ สิ่งนี้มีผลต่อประสิทธิภาพในการใช้งานเมื่อมีการนำเอาชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งาน ดังนั้น ผิวงานที่ได้จากการเคลือบ MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอริงจะมีคุณภาพที่ดีได้นั้น จำเป็นที่จะต้องทำการควบคุมพารามิเตอร์สำคัญต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อระบบการทำงานนี้ให้อยู่ในสถานะที่เหมาะสมมากที่สุด โดยพารามิเตอร์สำคัญที่ทำการศึกษากับชิ้นงานวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ซึ่งเป็นวัสดุประเภทสแตนเลสที่นิยมใช้งานกันโดยทั่วไปในอุตสาหกรรม ในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง 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 และพารามิเตอร์อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ที่ระดับ 0.5, 1.0, 1.5 ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

พารามิเตอร์ (Parameters)	ระดับพารามิเตอร์ (Level)		
กระแสไฟฟ้า (DC)	0.35 A	0.40 A	0.45 A
แรงดัน (Pressure)	0.004 mbar	0.007 mbar	0.010 mbar
อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$)	0.5	1.0	1.5

3.3 การดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับการเคลือบผิว MoC กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ด้วยกระบวนการสปัตเตอริงนั้น ชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 (Specimen) มีขนาด 25 x 25 x 6 mm เพื่อความสะดวกในการวัดสมบัติเชิงกลต่างๆ รวมไปถึงการวิเคราะห์โครงสร้างวัสดุด้วย การดำเนินงานวิจัยจะเป็นการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Design of Experiment : DOE) ด้วยเทคนิคการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design : CCD) โดยกำหนดให้ค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ เป็นผลตอบสนอง (Response) ของการทดลอง เพื่อบ่งชี้ถึงคุณภาพผิวเคลือบ MoC ของชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ด้วย

กระบวนการสเป็คเตอรืง ซึ่งตารางที่ได้จากการออกแบบการทดลองเชิงสถิติด้วยเทคนิค CCD เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลความแข็ง (Hardness) ในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสเป็คเตอรืง

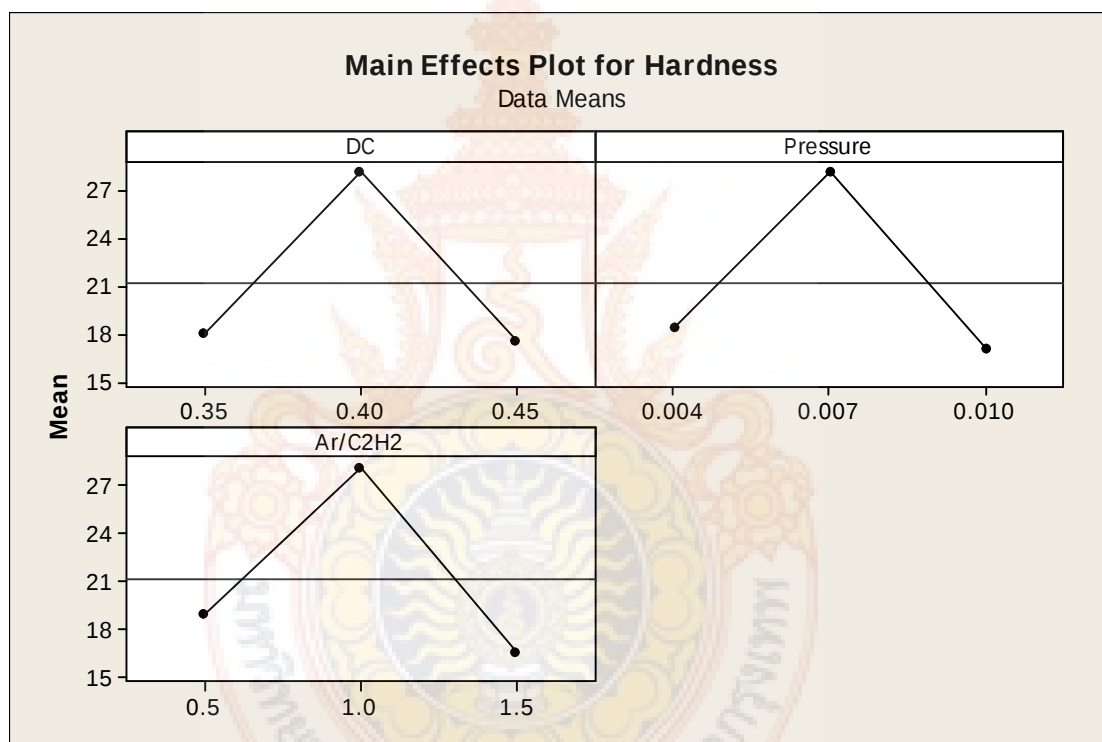
Run	DC	Pressure	Ar/C ₂ H ₂	Hardness
1	0.35	0.004	0.5	13.3068
2	0.45	0.004	0.5	26.3961
3	0.35	0.010	0.5	22.9943
4	0.45	0.010	0.5	13.1853
5	0.35	0.004	1.5	14.9593
6	0.45	0.004	1.5	19.0255
7	0.35	0.010	1.5	20.6545
8	0.45	0.010	1.5	11.4923
9	0.40	0.007	1.0	28.3840
10	0.40	0.007	1.0	29.4868
11	0.40	0.007	1.0	26.3961
12	0.40	0.007	1.0	28.0258

ผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมเชิงสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% พบว่า พารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลหลัก (Main Effect) นั้น พารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) และแรงดัน (Pressure) มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า P-Value ของพารามิเตอร์ทั้ง 2 มีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงของ $\alpha = 0.05$ นั่นคือ 0.001 และ 0.004 ตามลำดับ ส่วนพารามิเตอร์อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน (Ar/C₂H₂) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่าค่าอ้างอิงของ $\alpha = 0.05$ นั่นคือ 0.332 เมื่อทำการพิจารณาอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ (Interaction) พบว่า คู่พารามิเตอร์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (DC) และแรงดัน (Pressure) นั้น มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% เนื่องจากค่า P-Value ของพารามิเตอร์ทั้ง 2 มีค่าน้อยกว่าค่าอ้างอิงของ $\alpha = 0.05$ นั่นคือ 0.003 ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติเกี่ยวกับค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ

Response Surface Regression: Hardness versus DC, Pressure, Ar/C2H2

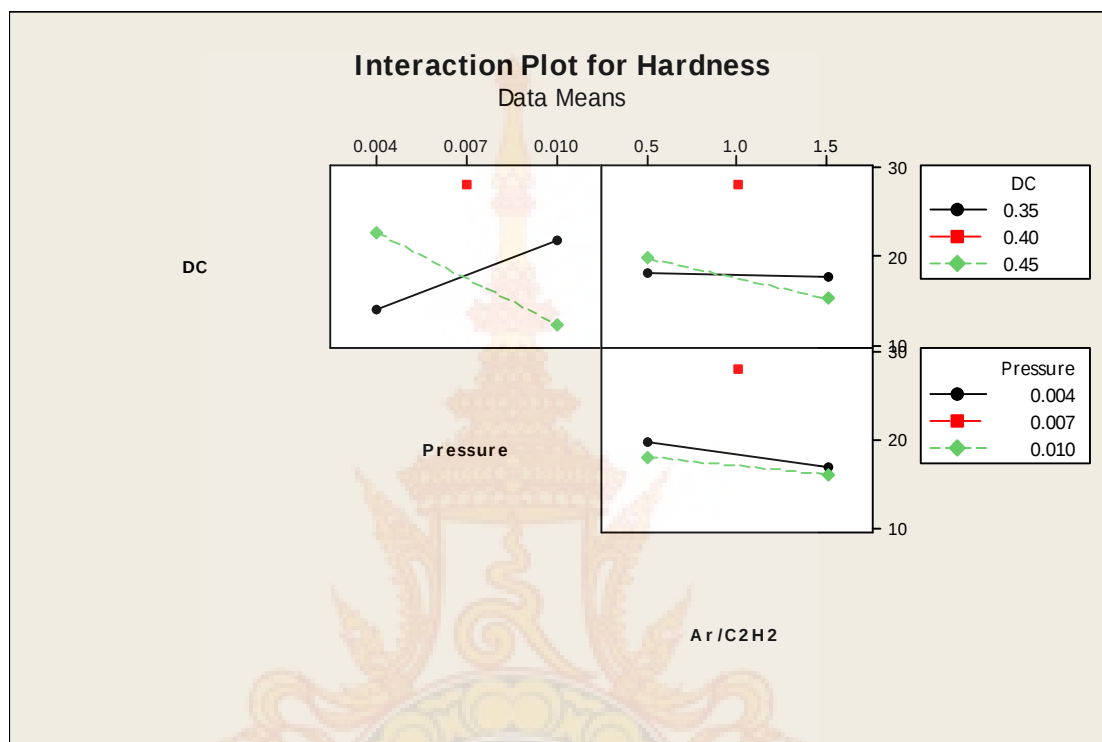
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-726.7	81.27	-8.942	0.001
DC	3550.9	401.88	8.836	0.001
Pressure	11678.4	1994.15	5.856	0.004
Ar/C2H2	13.3	12.09	1.103	0.332
DC*DC	-4128.6	498.97	-8.274	0.001
DC*Pressure	-30105.6	4801.35	-6.270	0.003
DC*Ar/C2H2	-41.9	28.81	-1.454	0.220
Pressure*Ar/C2H2	140.4	480.14	0.293	0.784



ภาพที่ 3.1 กราฟอิทธิพลหลักของพารามิเตอร์ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ

เมื่อทำการพิจารณากราฟอิทธิพลหลัก (Main Effect Plot) ของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ในการเคลือบผิว MoC กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง ดังแสดงในภาพที่ 3.1 พบว่า เส้นกราฟของพารามิเตอร์ทั้ง 2 คือ พารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC) และแรงดัน (Pressure) จะไม่ขนานการเส้นอ้างอิง (Reference Line) ในแนวแกนนอน แสดงให้เห็นว่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ในการเคลือบผิว MoC กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง ที่

ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจะเห็นได้จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์กราฟอิทธิพลหลักของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบนี้ มีความสอดคล้องสัมพันธ์กับผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมเชิงสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 3.4



ภาพที่ 3.2 กราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ

เมื่อทำการพิจารณากราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ (Interaction Plot) ของพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ดังแสดงในภาพที่ 3.2 พบว่า เส้นกราฟของอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ทั้ง 2 พารามิเตอร์ พบว่า คู่พารามิเตอร์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (DC) และแรงดัน (Pressure) มีเส้นกราฟที่ไขว้กันอย่างชัดเจน นั่นแสดงให้เห็นว่า คู่พารามิเตอร์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (DC) และแรงดัน (Pressure) นั้น มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบ ในการเคลือบผิว MoC กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ด้วยกระบวนการสเปคโตรริง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งจะเห็นได้จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์กราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบนี้ มีความสอดคล้องสัมพันธ์กับผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยโปรแกรมเชิงสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

บทที่ 4

การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสมเชิงสถิติ

การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม (Optimization Analysis) ด้วยเทคนิควิธีการเชิงสถิติ (Statistical) เกี่ยวกับค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบในการเคลือบผิว MoC กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง จะเป็นการวิเคราะห์เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งของชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

4.1 การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม

ผลลัพธ์เชิงสถิติเกี่ยวกับการวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC-Current), แรงดัน (Pressure) และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลลัพธ์เชิงสถิติเกี่ยวกับการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Hardness	Maximum	20	30	30	1	1

Global Solution

DC	=	0.412626
Pressure	=	0.004
Ar/C ₂ H ₂	=	0.5

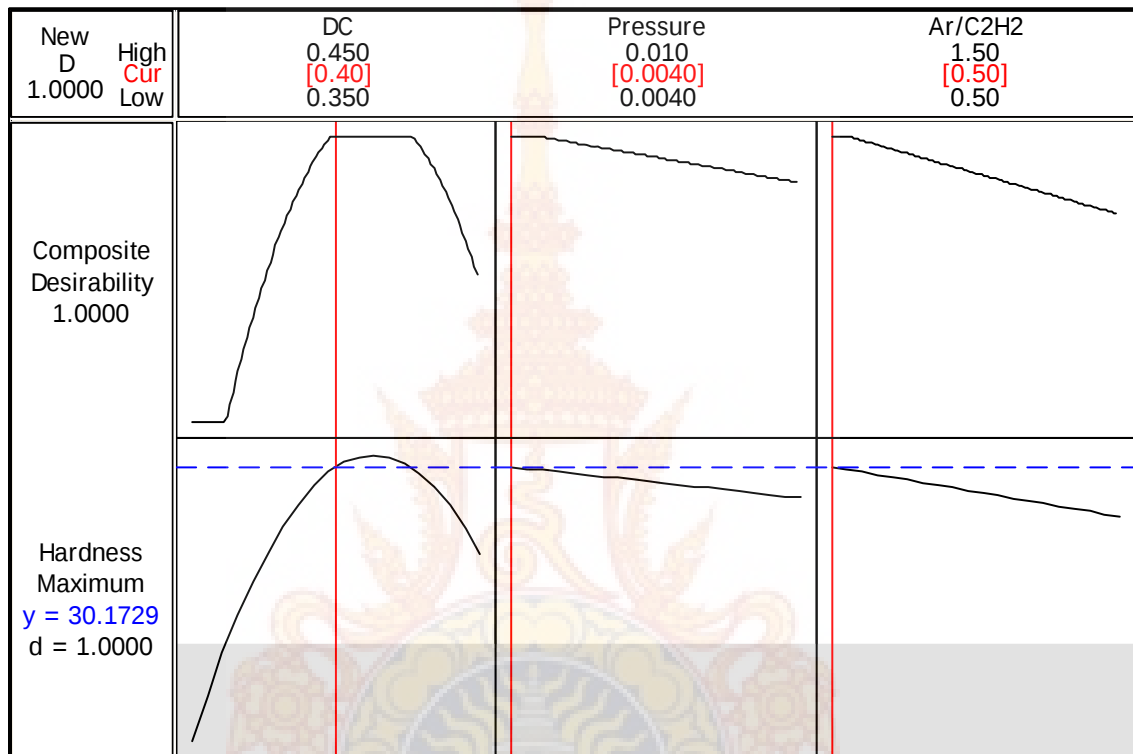
Predicted Responses

Hardness = 30.8621 , desirability = 1.000000

Composite Desirability = 1.000000

การวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม (Optimization) ด้วยเทคนิควิธีการเชิงสถิติ (Statistical) เกี่ยวกับค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบในการเคลือบผิว MoC กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง โดยกำหนดสมมติฐานในการทดลองเป็นพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบในการเคลือบผิว MoC กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง คือ กระแสไฟฟ้า (DC-Current), แรงดัน (Pressure) และ

อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) สามารถสรุปได้ว่าสถานะที่เหมาะสมมากที่สุดในการปรับระดับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC-Current) ที่ 0.4 A, แรงดัน (Pressure) ที่ 0.0040 mbar และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ที่ 0.50 จะทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบในการเคลือบผิว MoC กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลสเกรด 304 ด้วยกระบวนการสเป็คเตอรืงมากที่สุด คือ 30.1729 และเมื่อพิจารณาค่าความพึงพอใจเชิงสถิติ (Desirability) แล้ว พบว่า มีค่าความพึงพอใจเชิงสถิติสูงสุดถึง 100%

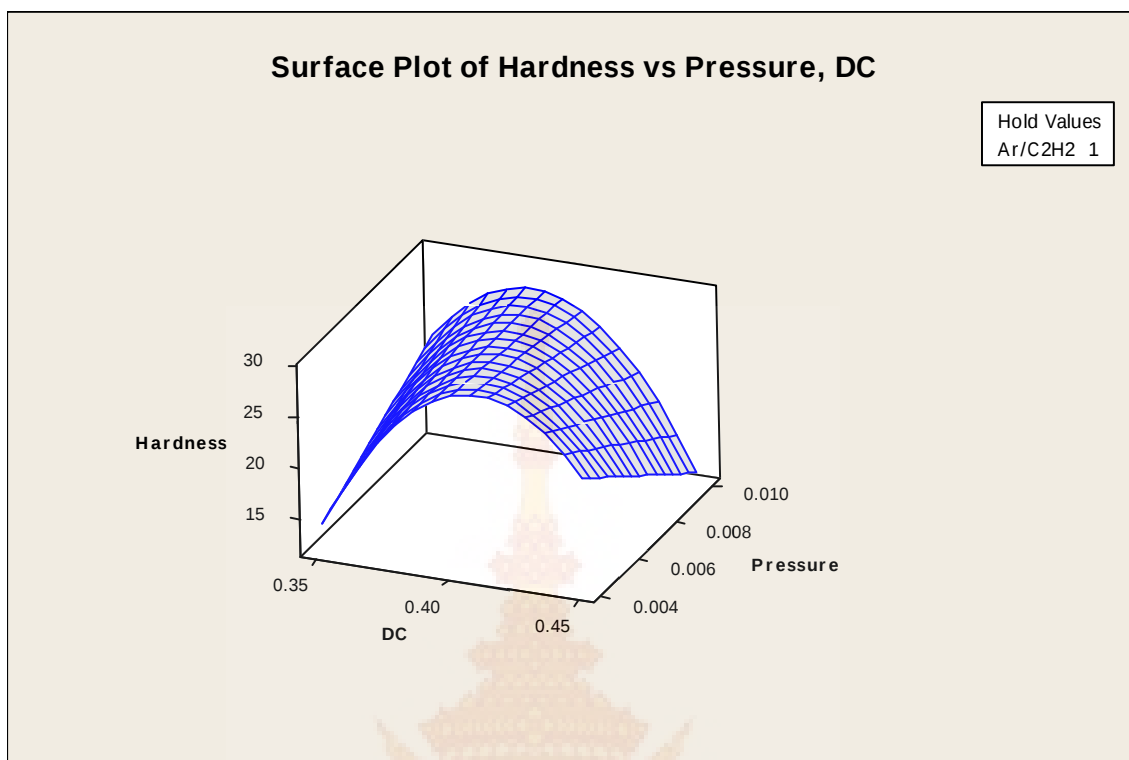


ภาพที่ 4.1 ผลลัพธ์เชิงสถิติเกี่ยวกับการวิเคราะห์สถานะที่เหมาะสม

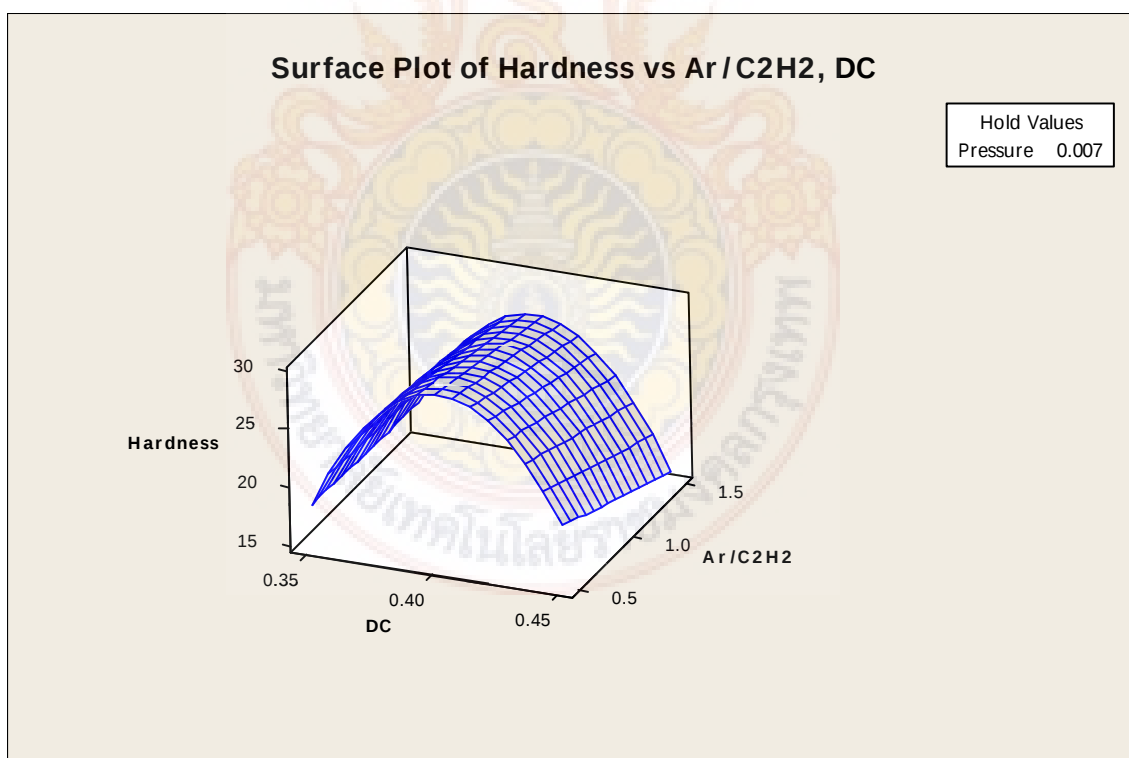
4.2 การวิเคราะห์กราฟพื้นผิวตอบสนอง

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

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ กระแสไฟฟ้า (DC-Current) กับแรงดัน (Pressure) ดังแสดงในภาพที่ 4.2 พบว่า ค่าความแข็งสูงสุด (Maximum Hardness) จะได้มาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC-Current) ที่ 0.4 A, แรงดัน (Pressure) ที่ 0.0040 mbar โดยการคงที่ค่าพารามิเตอร์อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ที่ระดับกลาง คือ 1.0

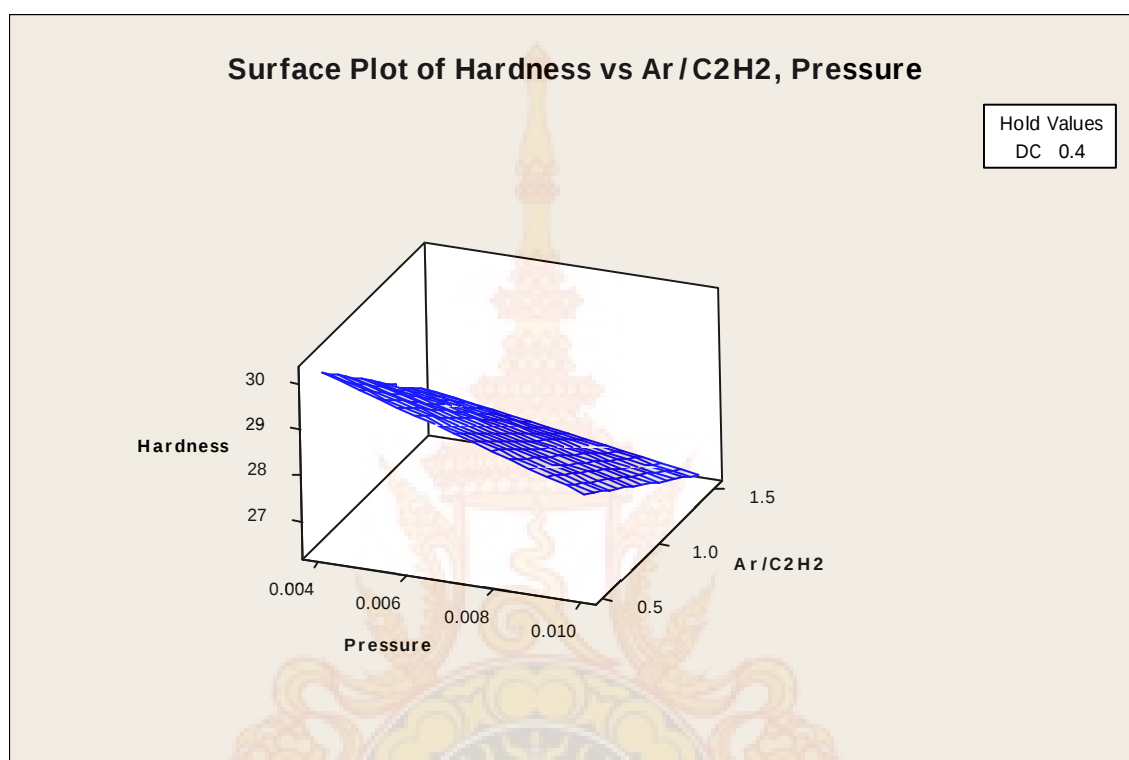


ภาพที่ 4.2 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดัน



ภาพที่ 4.3 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างแรงดันกับอัตราส่วน Ar/C₂H₂

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC-Current) กับอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ดังแสดงในภาพที่ 4.3 พบว่า ค่าความแข็งสูงสุด (Maximum Hardness) จะได้มาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC-Current) ที่ 0.4 A, อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ที่ 0.5 โดยการคงที่ค่าพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) ที่ระดับกลาง คือ 0.0070 mbar



ภาพที่ 4.4 กราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างแรงดันกับอัตราส่วน $\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$

เมื่อพิจารณากราฟพื้นผิวตอบสนองระหว่างผลกระทบร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) กับอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ดังแสดงในภาพที่ 4.4 พบว่า ค่าความแข็งสูงสุด (Maximum Hardness) จะได้มาจากการตั้งค่าพารามิเตอร์แรงดัน (Pressure) ที่ 0.0040 mbar, อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ที่ 0.5 โดยการคงที่ค่าพารามิเตอร์กระแสไฟฟ้า (DC-Current) ที่ 0.4 A

บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการเคลือบผิวโมลิบดีนัมคาร์ไบด์ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องการทำการศึกษา 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 และพารามิเตอร์อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ที่ระดับ 0.5, 1.0, 1.5 ดังแสดงในตารางที่ 5.1 ซึ่งถือเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง (Hardness) จึงได้ทำการศึกษาถึงระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของทั้ง 3 พารามิเตอร์ดังกล่าวนี้ ที่จะส่งผลให้ตะขอให้มีค่าความแข็ง (Hardness) มากที่สุด โดยประยุกต์ใช้การทดลองเชิงสถิติตามหลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiment : DOE)

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ในการเคลือบผิว MoC ด้วยกระบวนการสปัตเตอริง

พารามิเตอร์ (Parameters)	ระดับพารามิเตอร์ (Level)		
กระแสไฟฟ้า (DC)	0.35 A	0.40 A	0.45 A
แรงดัน (Pressure)	0.004 mbar	0.007 mbar	0.010 mbar
อัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$)	0.5	1.0	1.5

สภาวะที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ทำให้เกิดความสามารถในการต้านทานการสึกหรอเกี่ยวกับค่าความแข็ง (Hardness) มากที่สุด ได้แก่ ในการปรับระดับพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ กระแสไฟฟ้า (DC-Current) ที่ 0.4 A, แรงดัน (Pressure) ที่ 0.0040 mbar และอัตราส่วนระหว่างก๊าซอาร์กอนกับก๊าซอะเซทิลีน ($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2$) ที่ 0.50 จะทำให้ค่าความแข็ง (Hardness) ผิวเคลือบในการเคลือบผิว MoC กับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 ด้วยกระบวนการสปัตเตอริงมากที่สุด คือ 30.1729

5.2 ข้อเสนอแนะ

เงื่อนไขที่ได้จากการดำเนินการทดลองในงานวิจัยนี้ ถือเป็นสถานะที่เหมาะสมสำหรับชิ้นงานทดสอบวัสดุสแตนเลส เกรด 304 (Specimen) มีขนาด 25 x 25 x 6 mm เพื่อความสะดวกในการวัดสมบัติเชิงกลต่างๆ ซึ่งในการนำเอาสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวนี้ ไปประยุกต์ใช้กับการเคลือบชิ้นงานรูปร่างลักษณะอื่นๆ ด้วยกระบวนการสปีดเทอริงนั้น จำเป็นต้องพิจารณาด้วยความรอบคอบในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุด ซึ่งอาจจะทำการประยุกต์แนวความคิดจากงานวิจัยนี้ไปใช้งาน โดยการนำเอารูปในแบบแผนการทดลองเชิงสถิติของงานวิจัยนี้ไปใช้ได้



บรรณานุกรม

- [1] D.P. Weston, P.H. Shipway, S.J. Harris and M.K. Cheng. 2009. **Friction and sliding wear behavior of electrodeposited cobalt and cobalt–tungsten alloy coatings for replacement of electrodeposited chromium.** Wear 267 : 934-943.
- [2] M. Heydarzadeh Sohi and F.Ghadami. 2010. **Comparative tribological study of air plasma sprayed WC–12%Co coating versus conventional hard chromium electrodeposit.** Tribology 43 : 882-886.
- [3] M.Y.P. Costa, M.O.H.Cioffi, H.J.C.Voorwald, and V.A.Guimaraes. 2010. **An investigation on sliding wear behavior of PVD coatings.** Tribology 43 : 2196-2200.
- [4] P.Villiger, Ch.Sprecher, J.A.Peters. 1999. **Parameter optimization Of Ti –DLC coating using statistically based methods.** Surface and Coating Technology vol.116, NO.119 : 77-82.
- [5] J. Lua, H. Hugossonb, O. Erikssonb, L. NordstroÈmb and U. Janssona. 2000. **Chemical vapour deposition of molybdenum carbides: aspects of phase stability.** Thin Solid Films 370 : 203-212.
- [6] C.C. Tripathi, Mukesh Kumar and Dinesh Kumar. 2009. **Atom beam sputtered Mo₂C films as a diffusion barrier for copper metallization.** Applied Surface Science 255 : 3518-3522.
- [7] www.micromagnetics.com
- [8] Douglas C. Montgomery. 2001. “Design and Analysis of Experiments”. 5th ed. United States of America. John Wiley & Sons.
- [9] S. Kacim, L. Binst, F. Reniers and F. Bouillon. 1996. **Composition and structure of reactively sputter-deposited molybdenum-carbon films.** Thin Solid Films 287 : 25-31.
- [10] Raymond H. Myers and Douglas C. Montgomery. 2002. “Response Surface Methodology”. 2nd ed. United States of America. John Wiley & Sons.