

## บทที่ 2

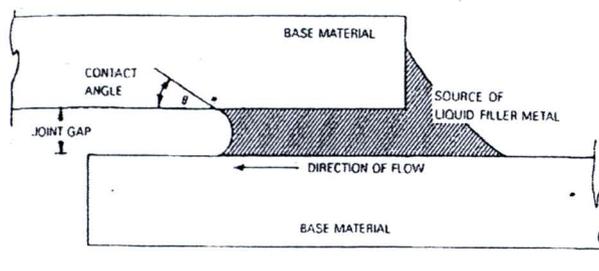
### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับการประสานรอยต่อแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี

แผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสีเป็นวัสดุที่มีความต้านทานการเกิดสนิม กระบวนการนี้เป็นการเคลือบสังกะสี ด้วยกรรมวิธีทางไฟฟ้าภายในอ่างชุบ โดยมีส่วนประกอบ คือ ขั้วบวก ขั้วลบ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งได้แก่ สารละลายสังกะสีซัลเฟต (Zinc Sulfate) โดยสังกะสีจะเคลือบลงบนแผ่นเหล็กในลักษณะเป็นไอออน ซึ่งจะต่างไปจากวิธีจุ่มร้อน ที่เป็นสารละลายของเหลวติดบนแผ่นเหล็ก ดังนั้นประสิทธิภาพในการเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้าจึงสูงกว่า ทำให้มีความสามารถป้องกันการเกิดสนิมได้ดีกว่า การประสานรอยต่อของเหล็กกล้าชุบสังกะสีนั้นทำได้ยาก [5] ส่วนใหญ่จะยึดด้วยหมุดย้ำหรือใช้กระบวนการเชื่อมทางไฟฟ้า ซึ่งก็จะพบปัญหาเมื่อทำการเชื่อม เนื่องจากสังกะสีมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเชื่อม ทำให้เกิดการสูญเสียของสังกะสีเคลือบ ดังนั้นกระบวนการ การเชื่อมโลหะด้วยเส้นลวดตันภายใต้แก๊สคลุมแบบพัลส์ (Pulsed Gas Metal Arc Welding : GMAW-P) จึงเริ่มมีบทบาทในการใช้งาน เนื่องจากอุณหภูมิในการเชื่อมต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของชิ้นงาน ทำให้เกิดการสูญเสียของสังกะสีเคลือบเป็นบางส่วนเท่านั้น ทำให้การแล่นประสานด้วยมิกพัลส์เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย [4]

#### 2.2 การแล่นประสาน

การแล่นประสาน (Brazing) [6] เป็นการประสานรอยต่อ โดยใช้ลวดเติมที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่า  $450^{\circ}\text{C}$  แต่ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะงาน โลหะเติมจะเกิดการแทรกตัวเข้าไปในช่องรอยต่อด้วยแรงปฏิกิริยาดึงดูด (Capillary Attraction) ปฏิกิริยา Capillary Attraction [7] เป็นความสามารถของของเหลวที่สามารถไหลเข้าไปในช่องแคบ ๆ หรือ รูเล็ก ๆ ในทิศทางต้านแรงโน้มถ่วงโลก ในการแล่นประสานรอยต่อนั้น ลวดเติมที่หลอมจะทำหน้าที่ไหลแทรกเข้าไปในช่องรอยต่อของชิ้นงานสองชิ้นดังปรากฏในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแทรกตัวของลวดเติมเข้าไปในช่องรอยต่อ

### 2.2.1 กระบวนการเชื่อมประสาน

กระบวนการเชื่อมประสาน สามารถแบ่งตามกระบวนการให้ความร้อน ออกเป็นหลายวิธี [6, 7] ซึ่งวิธีการที่นิยมใช้ประกอบด้วย

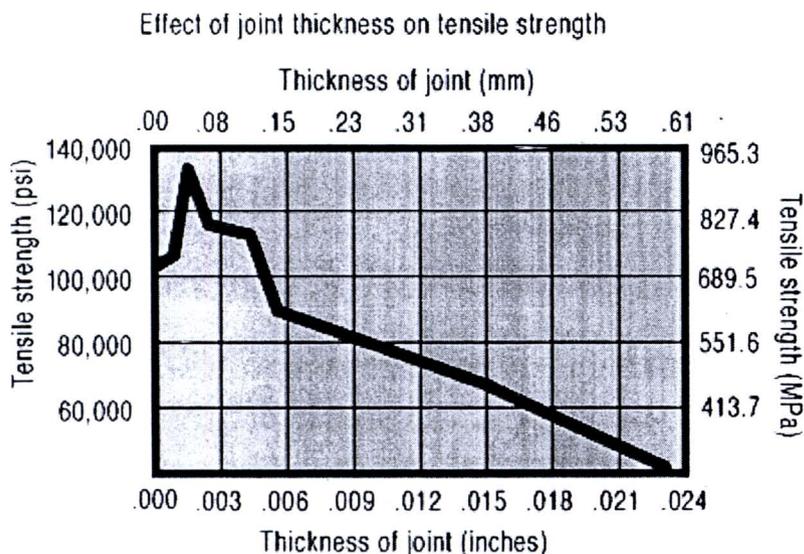
- 1) การเชื่อมประสานด้วยหัวเชื่อมแก๊ส (Torch Brazing)
- 2) การเชื่อมประสานในเตา (Furnace Brazing)
- 3) การเชื่อมประสานโดยการเหนี่ยวนำ (Induction Brazing)
- 4) การเชื่อมประสานด้วยการจุ่ม (Dip Brazing)
- 5) การเชื่อมประสานด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared Brazing)

สำหรับในที่นี้จะ ไม่ขอกล่าวถึงรายละเอียดในแต่ละวิธี โดยการเลือกใช้วิธีใดนั้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของชิ้นงาน

### 2.2.2 องค์ประกอบในการเชื่อมประสาน

ในการเชื่อมประสานแต่ละครั้งจะมีองค์ประกอบต่างๆที่ต้องพิจารณาคงนี้

- 1) การทำความสะอาดชิ้นงาน ก่อนการเชื่อมประสาน นับเป็นตัวแปรที่สำคัญ เนื่องจากถ้าผิวงานสะอาดจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Capillary Action ได้ดี และรอยประสานมีความแข็งแรง
- 2) การเว้นช่องรอยต่อ (Joint Clearance : Fit-Up) [8] การเว้นช่องรอยต่อ ควรเลือกให้เหมาะสมกับการเกิดปฏิกิริยา Capillary Action ได้ดี ถ้าระยะห่างไม่เหมาะสม จะทำให้ความแข็งแรงของรอยต่อลดลง และยังทำให้สิ้นเปลืองวัสดุเดิมมากเกินไป ดังนั้นค่าระยะห่างของช่องรอยต่อ จึงมีผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงทางการดึง (Tensile Strength) ดังผลเปรียบเทียบที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะห่างของช่องรอยต่อกับค่าความแข็งแรงทางการดึง [8]

จากรูปที่ 2.2 ระยะห่างของช่องรอยต่อที่แคบ จะมีค่าความแข็งแรงทางการดึง (Tensile Strength) มากกว่าระยะห่างของช่องรอยต่อที่กว้าง ซึ่งสามารถสังเกตได้ว่า เมื่อค่าระยะห่างของช่องรอยต่อมากขึ้นค่าความแข็งแรงทางการดึงจะลดลง

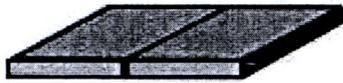
3) การเลือกขนาดเติมที่เหมาะสม มีสิ่งที่ควรพิจารณาดังต่อไปนี้

- ความเหมาะสมกับวัสดุงานและการออกแบบรอยต่อ
- สภาพการใช้งาน เช่น แรงกระทำ อายุการใช้งาน สภาพการกัดกร่อน
- อุณหภูมิที่ต้องการ การแล่นประสานต้องการอุณหภูมิต่ำเพื่อให้เกิดความร้อนน้อยที่สุด
- วิธีการให้ความร้อน ต้องเลือกวิธีการให้ความร้อน ให้เหมาะสมกับวัสดุงานเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับวัสดุงาน

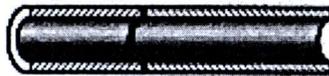
4) การออกแบบรอยต่อการแล่นประสาน โดยทั่วไปสามารถเตรียมได้ใน 2 ลักษณะ คือ

- รอยต่อชน (Butt Joint) รอยต่อชน ในการแล่นประสานจะเหมือนกับรอยต่อชนในงานเชื่อมทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3

*Butt joint - flat parts*



*Butt joint - tubular parts (cutaway)*



รูปที่ 2.3 ลักษณะของรอยต่อชน [8]

- Scarf Joint ประยุกต์ขึ้นจากรอยต่อชนธรรมดา โดยเตรียมผิวหน้าวัสดุให้เอียง ดังรูปที่ 2.4 เพื่อให้มีผิวสัมผัสในการประสานรอยต่อเพิ่มมากขึ้น

*Scarf joint - flat parts*

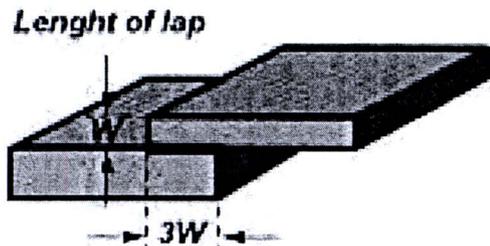


*Scarf joint - tubular parts (cutaway)*



รูปที่ 2.4 ลักษณะของรอยต่อ Scarf joint [9]

5) การกำหนดระยะรอยต่อเกย [9] การเตรียมรอยต่อเกยโดยทั่วไป กำหนดให้มีระยะเกยกันของชิ้นงานอย่างน้อย 3 เท่าของความหนาของชิ้นงาน ถ้าวัสดุงานมีความหนาไม่เท่ากัน ให้เลือกตามความหนาของงานชิ้นที่บางกว่า ดังตัวอย่างที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.5

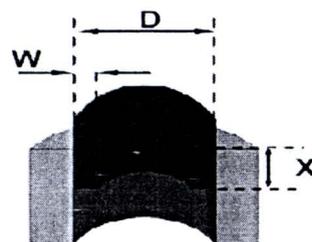


รูปที่ 2.5 ลักษณะของรอยเกยที่ใช้ในการเล่นประสาน [9]

การออกแบบรอยต่อ เพื่อให้ได้รอยต่อในการเล่นประสานที่แข็งแรงที่สุด โดยใช้ลวดเติมน้อยที่สุด สามารถคำนวณระยะเกยจากการคำนวณระยะเกยสำหรับงานแผ่นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$X = \frac{T \times W}{C \times L} \quad (2.1)$$

- X = Length of lap
- T = Tensile strength of the weakest member
- W = Thickness of the weakest member
- C = Joint integrity factor of 0.8
- L = Shear strength of brazed filler metal



$$X = \frac{W (D-W) T}{CLD} \quad (2.2)$$

X = Length of lap area

W = Wall thickness of the weakest member

D = Diameter of lap area

T = Tensile strength of the weakest member

C = Joint integrity factor of 0.8

L = Shear strength of brazed filler metal

6) ข้อดีของการแล่นประสานเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเชื่อมด้วยวิธีอื่นมีดังนี้

- อุณหภูมิต่ำ โลหะงานไม่หลอมละลาย ใช้พลังงานความร้อนต่ำ
- สามารถประสานรอยต่อของโลหะต่างชนิดกันได้
- สามารถเชื่อมได้รวดเร็ว
- โอกาสที่ชิ้นงานเสียหายมีน้อยกว่า เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิต่ำ
- อัตราการให้ความร้อนและการเย็นตัวต่ำ จึงเป็นการลดการเกิดความเค้นตกค้างภายใน
- สามารถประสานรอยต่องานหนาและงานบาง ๆ เข้าด้วยกันได้
- ง่ายต่อการปรับแต่งรอยต่อตำแหน่งใหม่

การแล่นประสานที่ใช้งานมากที่สุด คือการแล่นประสานด้วยหัวเชื่อมแก๊ส เนื่องจากไม่ยุ่งยาก แต่ในปัจจุบันวิธีการแล่นประสานอีกวิธีหนึ่ง ที่มักจะนำมาใช้งานต่าง ๆ คือ การแล่นประสานด้วยมิกโดยจะกล่าวในตอนต่อไป

## 2.3 การแล่นประสานด้วยมิก (Metal Inert Gas Brazing)

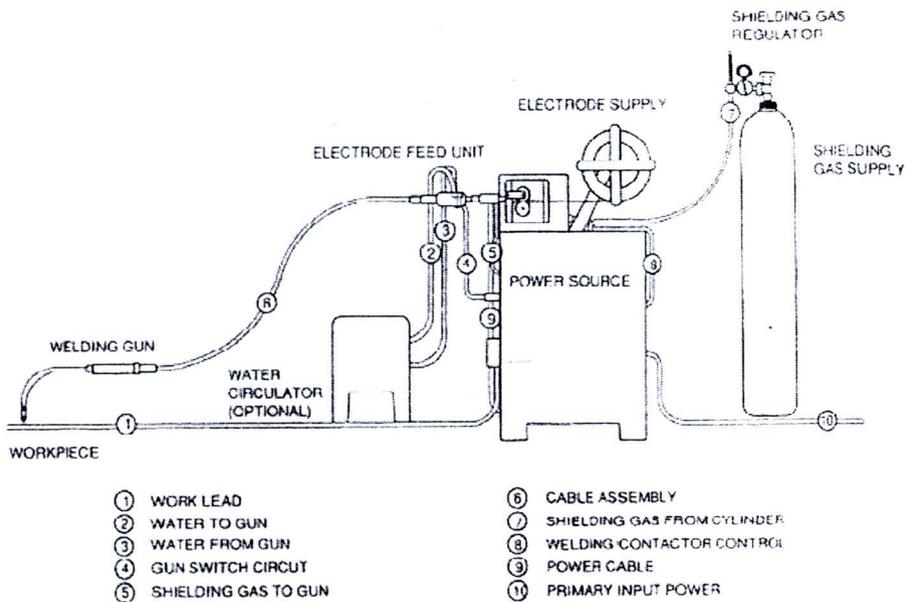
MIG-Brazing เป็นกระบวนการประสานโลหะที่อาศัยหลักการของกระบวนการเชื่อมมิก และการแล่นประสานรวมกัน โดยนำข้อดีของทั้งสองกระบวนการมารวมไว้ด้วยกัน MIG-Brazing ใช้หลักการพื้นฐานของการเชื่อมโลหะด้วยเส้นลวดตันภายใต้แก๊สคลุมแบบพัลส์ (Pulsed Gas Metal Arc Welding : GMAW-P) กระบวนการดังกล่าวถูกออกแบบ ให้กระแสเชื่อมมีพลังงานเพียงเปิดผิวเคลือบของโลหะงานตรงบริเวณรอยต่อ และหยดน้ำโลหะจากลวดเติมไหลแทรกเข้าไปประสานรอยต่อโดยที่ชิ้นงานไม่เกิดการหลอมละลาย ทำให้กระบวนการ GMAW-P สามารถนำมาใช้ในการประสานแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสีในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์ โดยกระบวนการดังกล่าวได้ถูกนำมาทดแทน Metal Active Gas Welding หรือ MAG-Welding เนื่องจากมีการทำลายผิวเคลือบที่น้อยกว่า ทำให้ชิ้นงานมีความต้านทานการกัดกร่อนได้ดีขึ้น และสามารถทำการเชื่อมได้เร็วกว่าการใช้หัวแก๊ส

### 2.3.1 การเชื่อมแบบ GMAW-P บนแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี

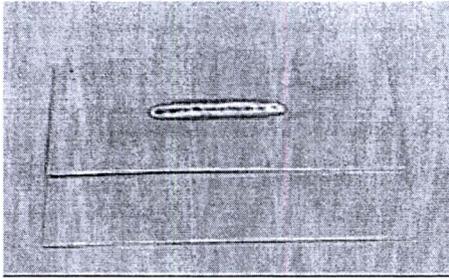
เป็นการเชื่อมโลหะด้วยเส้นลวดตันภายใต้แก๊สคลุม (Gas Metal Arc Welding) ซึ่งจะมีการเรียกชื่อแตกต่างกัน ตามแก๊สที่ใช้ปกคลุมรอยเชื่อม โดยการเชื่อมมิก (MIG: Metal Inert Gas Arc Welding) จะใช้แก๊สเฉื่อยใน

การปกคลุมรอยเชื่อมเช่น อาร์กอนและฮีเลียม การเชื่อมแมก (MAG: Metal Active Gas Arc Welding) จะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สคลุมในการเชื่อม

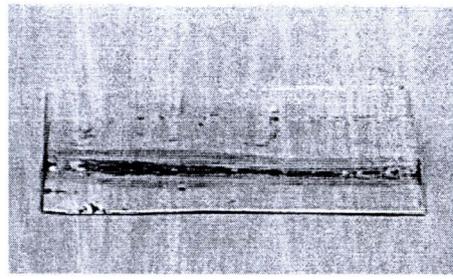
การเชื่อมมิก (MIG welding) [10] ลวดเติมจะหลอมเหลว และเติมเนื้อโลหะเชื่อม สร้างเป็นแนวเชื่อมเหมือนกับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ทั่วไป เพียงแต่กระบวนการเชื่อมมิกนั้น ใช้แก๊สปกป้องแทนฟลักซ์ ทำให้รอยเชื่อมที่ได้ไม่มีสแลก (Slag) ลวดเติมจะถูกป้อนไปตามท่อนำลวดผ่านไปยังหัวเชื่อม ที่หัวเชื่อมจะมีท่อนำกระแส (Contact Tip) เป็นตัวทำให้กระแสไฟฟ้าและลวดเติมสัมผัสกันทำให้ลวดเติมกลายเป็นตัวอาร์ค หลอมเหลวตัวเองกับชิ้นงานเป็นการเติมเนื้อโลหะ ชุดป้อนลวดจะขับเคลื่อนลวดเติมไปสู่บริเวณที่มีการอาร์คที่มีอัตราความเร็วสัมพันธ์กับการหลอมของลวดเติม แต่ในการเชื่อมแบบ MIG-Brazing [11] นั้น จะมีความเหมือนกับการเชื่อมมิกแบบธรรมดา โดยกระบวนการนี้ เป็นการเชื่อมโดยใช้แก๊สเฉื่อยคลุมแนวเชื่อม แต่จะแตกต่างจากการเชื่อมมิกธรรมดาที่อุณหภูมิของกระบวนการอยู่ระหว่าง 1,030 – 1,080 °C ซึ่งยังไม่ถึงอุณหภูมิหลอมละลายของโลหะ (1,500 °C) งานบริเวณแนวเชื่อมสังกะสีเคลือบ จะมีการระเหยไปบางส่วนเท่านั้น บริเวณขอบแนวเชื่อมสังกะสีเคลือบเกิดการระเหยไปมากเท่าไร โอกาสที่ชิ้นงานจะเกิดการสึกกร่อนก็มีมากขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของรอยต่อของชิ้นงาน (สังกะสีจะหลอมละลายที่อุณหภูมิ 420°C และระเหยที่อุณหภูมิ 907 °C) และในการเชื่อม MIG-Brazing นั้น ข้อควรระวังคือท่อนำลวดต้องเปลี่ยนเป็น Teflon โดยมีอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมมิก [12]



รูป ก



รูป ข

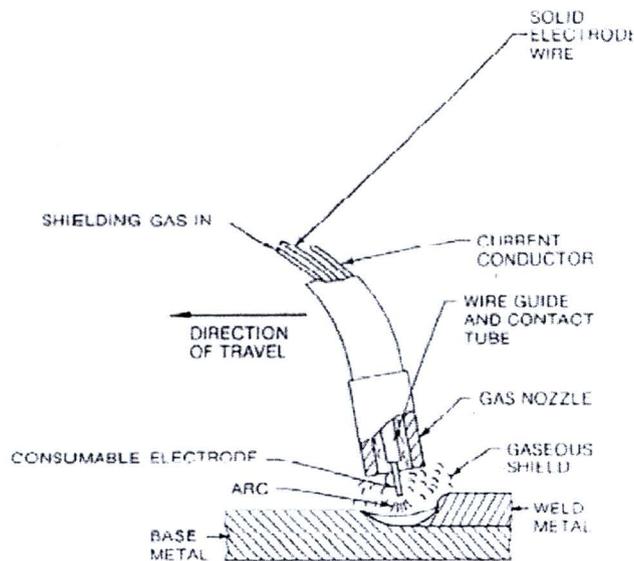
รูปที่ 2.7 แสดงแนวเชื่อมที่ใช้กระบวนการเชื่อมแบบ MIG-Brazing และ MIG [13]

ก. ใช้กระบวนการ MIG-Brazing

ข. ใช้กระบวนการ MIG

### 2.3.2 การเกิดอาร์ค

การเกิดอาร์คในการเชื่อมแบบ GMAW นั้น เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลผ่านกลุ่มอะตอมของก๊าซที่มีประจุไฟฟ้า ทำให้โมเลกุลและอะตอมของก๊าซแตกตัว และมีสภาพไม่เป็นกลางทางไฟฟ้า เนื่องจากสูญเสียอิเล็กตรอนไปเป็นประจุไฟฟ้าบวก อีออนก๊าซที่เป็นบวกจะไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ ส่วนอิเล็กตรอนจะไหลจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ปริมาณความร้อนประมาณ 95% จะถูกส่งผ่านโดยอิเล็กตรอน ความร้อนจากการอาร์ค จะทำให้ลวดเติมและโลหะชิ้นงานเกิดการหลอมเหลว ปลายของลวดเติมส่วนที่หลอมจะถูกถ่ายโอนผ่านการอาร์คเข้าสู่บ่อหลอมเหลว ซึ่งบ่อหลอมเหลวจะถูกปกป้องโดยแก๊สที่ออกจากหัวฉีดดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิดอาร์คของกระบวนการประสานด้วยมิก [14]

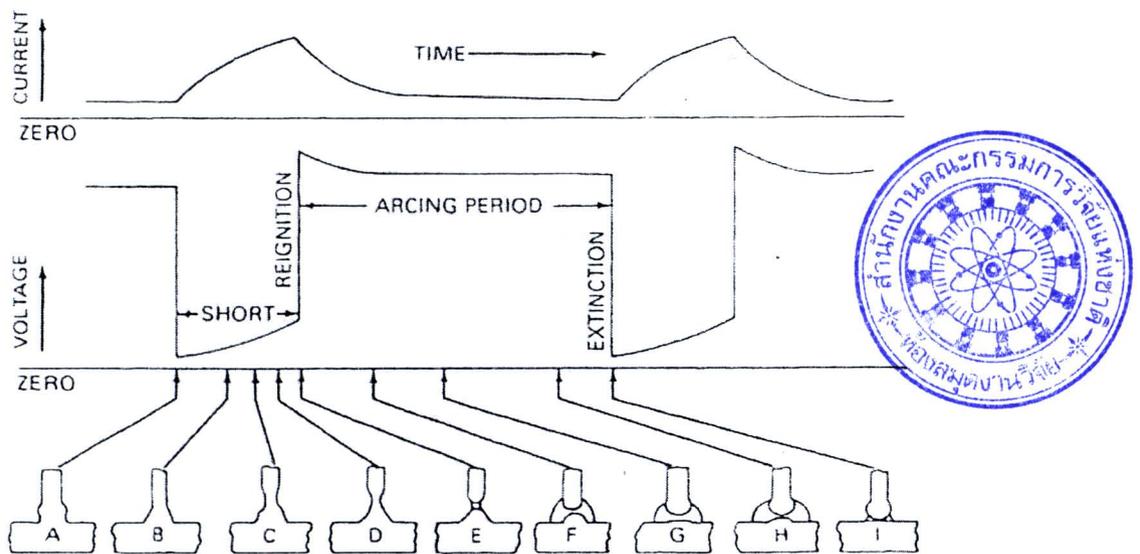
จากรูปที่ 2.8 พบว่าจะเกิดการเกิดอาร์คขึ้น ระหว่างปลายลวดเชื่อมกับชิ้นงาน ซึ่งลวดเชื่อมจะทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด ที่ป้อนเข้าสู่ชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็น โลหะประสาน

## 2.4 การถ่ายโอนน้ำโลหะ (Metal Transfer)

กระบวนการ GMAW [14, 15] สามารถแบ่งการถ่ายโอนน้ำโลหะหลอมเหลวได้หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบจะขึ้นอยู่กับตัวแปรต่าง ๆ เช่น ชนิดของแก๊สคลุม กระแสเชื่อม แรงตึงผิว แรงโน้มถ่วงและแรงจากแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งตัวแปรเหล่านี้เป็นตัวกำหนดการถ่ายโอนน้ำโลหะ ในที่นี้จะขอกล่าวถึงการถ่ายโอนน้ำโลหะ 4 ลักษณะ

### 2.4.1 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร (Short circuit transfer)

วัฏจักรการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร จะเริ่มต้นเมื่อปลายของลวดเติมและโลหะงานถูกทำให้เกิดการอาร์คและมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้ปลายลวดเติมเกิดการหลอมเหลวเป็นหยดน้ำโลหะขนาดเล็กขณะเดียวกันลวดเติมจะถูกป้อนเข้าสู่บ่อหลอมละลายด้วยอัตราเร็วสูง ทำให้หยดน้ำโลหะที่ปลายลวดเติมสัมผัสกับบ่อหลอมเหลวก่อนที่จะแยกออกจากปลายของลวดเติม และเกิดการลัดวงจร (Short Circuit) การอาร์คจะดับไปชั่วขณะ ในจังหวะที่เกิดการลัดวงจร กระแสจะเพิ่มสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ปลายของลวดเติมที่หลอมเป็นหยด จะถูกตัดออกแล้วถ่ายโอนสู่บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วง และแรงตึงผิว

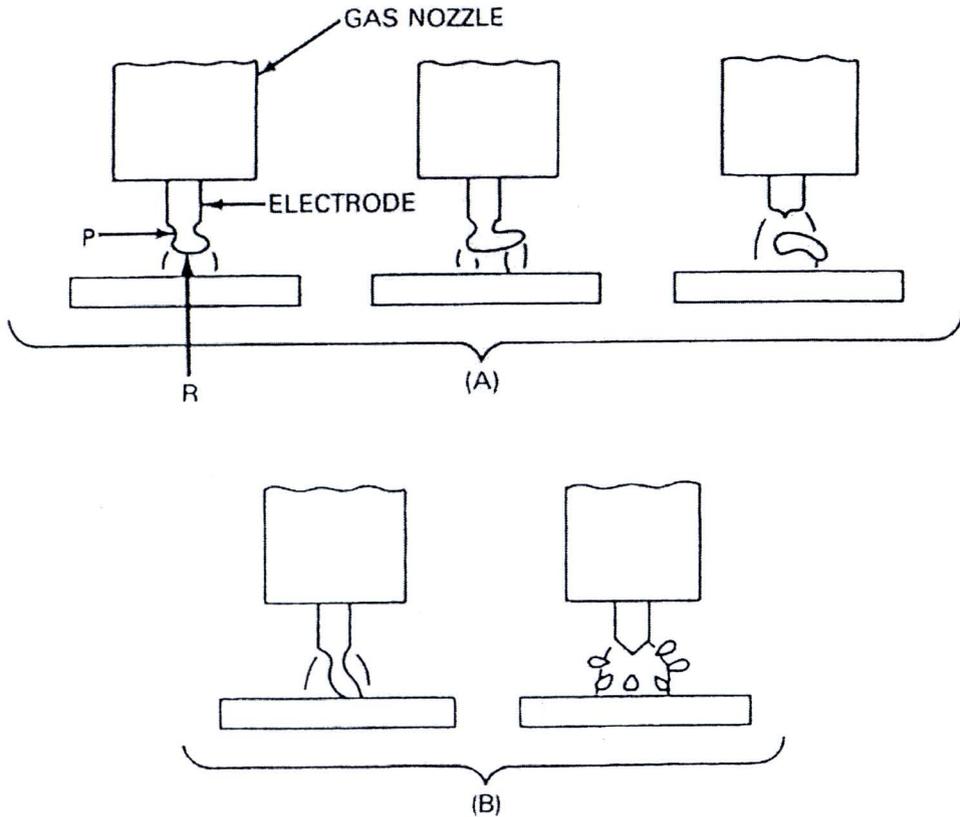


รูปที่ 2.9 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร [14]

### 2.4.2 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดน้ำขนาดใหญ่ (Globular Transfer)

การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดน้ำขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.10 วัฏจักรการถ่ายโอนจะเริ่มต้นเมื่อปลายของลวดเติมถูกหลอมเป็นหยดน้ำโลหะ และหยดน้ำโลหะนี้จะหลุดจากปลายของลวดเติม แล้วถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่

บ่อหลอมเหลวด้วยแรงโน้มถ่วง และแรงตึงผิว ซึ่งจะทำให้มีอัตราการเติมเนื้อโลหะมากและมีความร้อนสูงกว่าการส่งถ่ายไอออนน้ำโลหะแบบลัดวงจร กระแสและแรงดันเชื่อม ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนแบบหยดน้ำขนาดใหญ่นี้จะต่ำ แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังสูงกว่าการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบลัดวงจร พฤติกรรมการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบนี้ จึงมีกระแสเชื่อมอยู่ระหว่าง 165-240 แอมป์ อัตราการถ่ายโอนน้ำโลหะต่อวินาทีที่กระแสต่ำจะมีเพียง 2-3 หยดเท่านั้น ขณะที่หยดน้ำโลหะขนาดเล็กจำนวนมากถูกถ่ายโอนไปก่อนแล้วตอนที่กระแสเพิ่มสูงขึ้น การส่งถ่ายไอออนน้ำโลหะเมื่อหยดน้ำโลหะขนาดโตพอแล้ว ก็จะแยกตัวออกจากปลายลวดถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่บ่อหลอมเหลว หยดน้ำโลหะจะมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอ

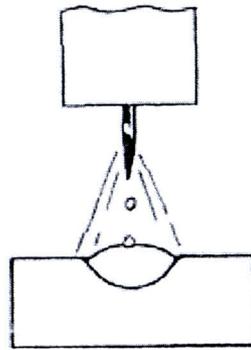


รูปที่ 2.10 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหยดขนาดใหญ่ [14]

#### 2.4.3 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง (Spray Transfer)

การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง เป็นดังรูปที่ 2.11 วัฏจักรการถ่ายโอนจะเริ่มขึ้นเมื่อปลายของลวดเติมถูกหลอมเหลวแล้วก่อตัวเป็นหยดน้ำโลหะขนาดเล็ก หรือเท่ากับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเติมหยดน้ำโลหะจะเรียวยาวลงตรงส่วนที่ต่ออยู่ระหว่างปลายลวดเติม และหยดน้ำนี้จะแตกตัว หรือหลุดออกจากปลายลวดเติม ด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro Magnetic Forces) หยดน้ำโลหะถูกถ่ายโอนอย่างรวดเร็ว ผ่านพลาสมาอาร์คสู่บ่อหลอมเหลวอย่างคงที่ และต่อเนื่องตลอดเวลาที่กระแสน้ำไหลผ่านลวดเติมอยู่ วัฏจักรการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองนี้ ต้องใช้ความหนาแน่นของกระแสสูงเพื่อให้ลวดเติมหลอมเป็นหยดขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเติมอย่างรวดเร็ว

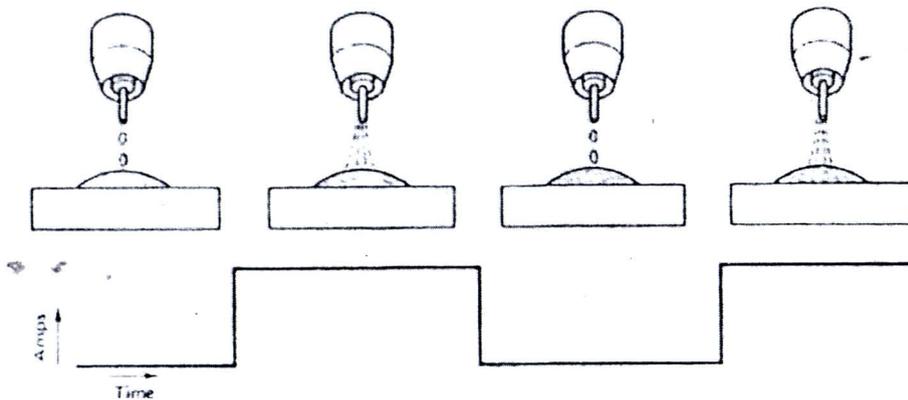
หยดน้ำโลหะที่มีขนาดเล็กนี้ จะไม่มีผลต่อเสถียรภาพของการอาร์ค ปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานสูง แม้ลวดเติมจะมีขนาดใหญ่ก็สามารถหลอมเหลวเป็นหยดขนาดเล็กได้ทันที ซึ่งส่งผลให้เกิดการหลอมลึกของรอยต่อประสานมาก



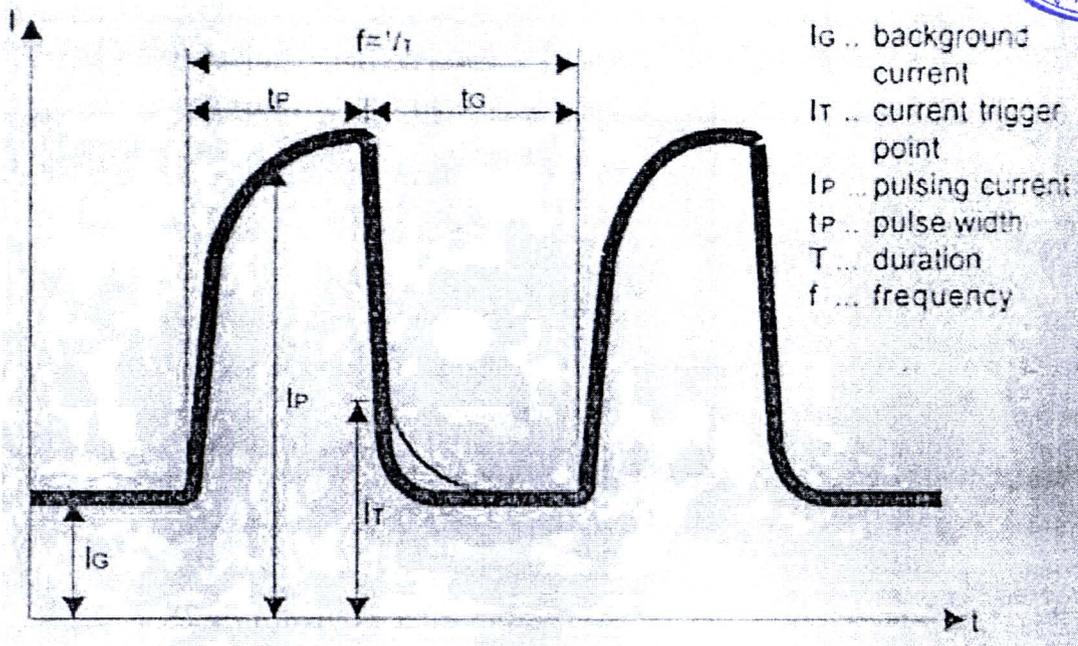
รูปที่ 2.11 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง [14]

#### 2.4.4 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพัลส์ (Pulse Transfer)

Pulse Transfer เป็นกระบวนการที่พัฒนามาแทนการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งตัวเครื่อง (Power Source) จะเป็นตัวแปรที่สำคัญ เพราะการส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์นี้ เพิ่งถูกนำมาใช้งานเมื่อไม่นาน อย่างไรก็ตาม การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์ก็ยังคงเป็นการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละอองอยู่ (Pulse Spray) มีการเกิดพัลส์ของกระแสเชื่อมจากระดับต่ำสุดถึงระดับสูงสุดที่ 60 ไซเคิลต่อวินาที จังหวะการเกิดพัลส์แต่ละครั้ง จะทำให้ปลายลวดเป็นหยดน้ำโลหะได้หนึ่งหยด แล้วถ่ายโอนผ่านอาร์คสู่บ่อหลอมเหลวด้วยความถี่ที่สม่ำเสมอต่อเนื่องกันไปอย่างเป็นระเบียบ การถ่ายโอนหยดน้ำโลหะจะเกิดขึ้นเมื่อการเกิดพัลส์กระแสถึงระดับสูงสุด หลังจากถ่ายโอนน้ำโลหะแล้วกระแสก็จะลดลงต่ำสุดตามที่ตั้งไว้ กระแสต่ำจะช่วยให้เกิดการอาร์คอยู่ตลอดเวลา ช่วงจังหวะนี้การถ่ายโอนน้ำโลหะจะไม่เกิดขึ้น การเกิดพัลส์ของกระแสสูงแล้วลดลงจะมีผลต่อการควบคุมปริมาณความร้อนที่เข้าสู่งานซึ่งความร้อนที่เข้าสู่งานจะมีน้อยกว่าการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง จึงเหมาะกับการประสานงานบาง ทุกตำแหน่งเชื่อมได้ง่าย การส่งถ่ายน้ำโลหะแบบพัลส์มีรูปแบบกระแสพัลส์ที่เกิดจาก Power Source ซึ่งจะมีองค์ประกอบดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบพัลส์ [14]



รูปที่ 2.13 รูปแบบกระแสพัลส์ของการเชื่อมแบบ GMAW-P [16]

จากรูปที่ 2.12 และ 2.13 เป็นลักษณะของรูปแบบกระแสพัลส์ ซึ่งเกิดจากการปรับตัวแปรของ Power Source ซึ่งจะได้ลักษณะของรูปแบบกระแสพัลส์ ที่มีรูปแบบเฉพาะ ความถี่ของกระแสพัลส์จะอยู่ในช่วงประมาณ 20-400 พัลส์ต่อวินาที อย่างไรก็ตามจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า กระแสพัลส์ที่ใช้จะอยู่ในช่วงประมาณ 20-60 พัลส์ต่อวินาที หรือมากกว่า ซึ่งตัวแปรของกระแสพัลส์ที่สำคัญประกอบด้วย

- กระแสสูงสุด (Peak Current : I<sub>p</sub>) หรือ Pulsing Current อยู่ในระหว่างการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบละออง โดยสามารถควบคุมขนาดของหยดน้ำโลหะและระยะอาร์คที่สั้นลงได้ ในขณะที่กระแสสูงสุดมีค่าสูงมาก ในกรณีที่ระยะอาร์คมีความห่าง ขนาดของหยดน้ำโลหะจะมีขนาดโต ซึ่งอาจทำให้หยดน้ำโลหะกระเด็นออกจากบ่อหลอมเหลว แล้วกลายเป็นหยดน้ำโลหะที่เป็นละอองหรือเม็ดของหยดน้ำ
- กระแสต่ำสุด (Background Current : I<sub>G</sub>) หรือ Low Current Pulse เป็นช่วงที่มีการรักษาการอาร์คไว้ให้ต่อเนื่อง และช่วยให้ปลายของลวดเติมนั้นร้อนและรักษาการอาร์คเอาไว้ ซึ่งช่วงกระแสต่ำนี้พลังงานที่เกิดขึ้นจะไม่สามารถทำให้ลวดเติมหลอมเหลวได้และไม่มีการถ่ายโอนน้ำโลหะ อย่างไรก็ตามในกรณีที่กระแสอยู่ในช่วงกระแสต่ำ ถ้าปลายลวดเติมสัมผัสกับวัสดุงานแล้วเกิดการอาร์คก็จะเกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะ ซึ่งมีแนวโน้มเป็นการถ่ายโอนที่เกิดขึ้นแบบลัดวงจร ฉะนั้นการควบคุมอัตราการป้อนลวด จะเป็นตัวเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของกระแสไฟเชื่อม นอกจากนั้นยังต้องมีการควบคุมระยะยื่นของลวดเติมควบคู่กันไป เพื่อรักษาระยะอาร์คและแรงดันอาร์คให้คงที่

- เวลากระแสสูงสุด (Peak Time :  $t_p$ ) หรือ Pulse Width เป็นช่วงที่ควบคุมขนาดของหยดน้ำโลหะ ช่วงเวลากระแสสูงสุดจะมีเวลาสั้นมาก ซึ่งจะทำให้หยดน้ำโลหะเกิดขึ้นหนึ่งหยดต่อพัลส์ แต่ถ้าเวลากระแสสูงสุดเพิ่มขึ้น การถ่ายโอนของหยดน้ำโลหะก็จะมีมากกว่าหนึ่งหยดต่อพัลส์ ซึ่งจะเป็นสาเหตุทำให้หยดน้ำโลหะกระเด็นออกจากบ่อหลอมเหลว

- ความถี่พัลส์ (Pulse Frequency :  $f$ ) ความถี่พัลส์จะเป็นตัวควบคุมการถ่ายโอนหยดน้ำโลหะ การปรับความถี่พัลส์ ก็เพื่อให้ได้การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหนึ่งหยดต่อพัลส์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการควบคุมช่วงเวลากระแสสูงและช่วงเวลากระแสต่ำ และสามารถปรับค่ากระแสสูงและกระแสต่ำให้ความสัมพันธ์กับความเร็วในการป้อนลวด เพื่อให้ได้การถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นแบบหนึ่งหยดต่อพัลส์และขนาดของหยดน้ำโลหะมีความสม่ำเสมอและเป็นระเบียบ

เทคนิคการประสานด้วยกระแสพัลส์ (Pulse Arc) ได้รับการพัฒนาตั้งแต่ปี 1970 และต่อมาได้เรียกว่าการประสานแบบไซเนอจิก ซึ่งเป็นการทำงานแบบควบคุมกันของพารามิเตอร์ทั้งระบบ กระบวนการ GMAW-P เป็นการทำงานที่ควบคุมหรือสัมพันธ์กันระหว่าง Power Source และ Wire Feed Speed โดยอุปกรณ์ดังกล่าวถูกควบคุมด้วยโปรแกรมไมโคร โปรเซสเซอร์ที่มีความเหมาะสม และรูปแบบของกระแสพัลส์จะมีความสัมพันธ์กันและสามารถควบคุมด้วยปุ่มควบคุมเพียงปุ่มเดียว ซึ่งสามารถแสดงค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดวัสดุ ขนาดความหนาวัสดุ แก๊สคลุม ชนิดและขนาดของลวดเติมที่จะเลือกใช้ในกระบวนการประสานดังกล่าว

## 2.5 การถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหล่อเย็น (Cold Metal Transfer)

กระบวนการถ่ายโอนน้ำโลหะแบบหล่อเย็น (Cold Metal Transfer) [17] จะขึ้นอยู่กับวิธีการ โอนถ่ายวงจรไฟฟ้าอย่างแม่นยำสูง โดยระบบจะทำการควบคุมช่วงการอาร์ค ผลลัพธ์ของอุณหภูมิที่ได้จะอยู่ในรูปแบบสลับกันคือ "ร้อน-เย็น-ร้อน-เย็น" ใน 1 จังหวะ "ร้อน-เย็น" นั้นจะขึ้นอยู่กับระบบของแรงดัน อาร์ค ขณะที่อยู่ในช่วงอาร์คแบบปกติ หัวอิเล็กโทรดกำลังเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของเหลว ณ ขณะนั้น หัวเชื่อมทำการจุ่มลงบนแผ่นเชื่อม และเกิดการหลอมละลายอย่างรวดเร็ว ในขณะที่แรงดันอาร์คที่สูง ซึ่งกระบวนการนี้จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่คงที่สูง ทำให้ระบบอัตโนมัติหรือระบบหุ่นยนต์สามารถนำมาใช้ได้ในส่วนนี้ได้

ส่วนระบบการเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมจะนำมาจากค่าจากการอินทิเกรต จากกระบวนการเชื่อม โดยดูจากการละลายหัวเชื่อมของอุณหภูมิที่เหมาะสม ทุกๆช่วงเวลาของการลัดวงจรไฟฟ้า ระบบควบคุมดิจิทัล จะทำการประมวลผลเปรียบเทียบกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากับ ระยะเหด เข้า- ออก ของลวดเชื่อม การเหด เข้า- ออก ลวดเชื่อม มีความถี่อยู่ที่ 70 Hz การเคลื่อนที่ของลวดเชื่อมแบบนี้จะทำให้เกิดการแยกออกจากรอยเชื่อมขณะที่เกิดลัดวงจรอยู่

ตามความเป็นจริงพลังงาน ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะถูกเปลี่ยน ไปเป็นพลังงานความร้อนจะทำให้คุณสมบัติ และผลข้างเคียงของการเชื่อมอาร์ค มีผลมาก ดังนั้นการใส่ความร้อนที่น้อยจึงมีข้อดีคือ เกิดการบิดตัวของชิ้นงานต่ำ ข้อต่อรอยเชื่อมจึงมีคุณภาพสูง จึงทำให้เชื่อมชิ้นงานที่มีความบางได้ รวมทั้งมีความสามารถในการเชื่อมระหว่างเหล็กชุบสังกะสีกับอะลูมิเนียมได้



## 2.6 ตัวแปรในการประสานรอยต่อ

ตัวแปรในการประสานรอยต่อเกี่ยวข้องกับการควบคุมกระบวนการรวมถึงคุณภาพของรอยต่อ การเลือกตัวแปรที่เหมาะสม จะช่วยให้การประสานรอยต่อมีคุณภาพ ซึ่งตัวแปรหลักที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดังกล่าวสามารถจำแนกได้ดังนี้

### 2.6.1 ลวดเติม (Filler Metal)

ลวดเติมที่ใช้กับกระบวนการ GMAW ต้องมีความบริสุทธิ์ทางเคมีสูง การเลือกลวดเติมที่ถูกต้องจะช่วยป้องกันไม่มีความบกพร่องที่เกิดขึ้นกับรอยต่อน้อยที่สุด สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่ง คือความต้านแรงดึงของลวดเติมซึ่งถูกกำหนดจากความต้านทานแรงดึงของเนื้อโลหะประสาน ดังนั้นจึงต้องเก็บรักษาลวดเติมให้ถูกต้อง

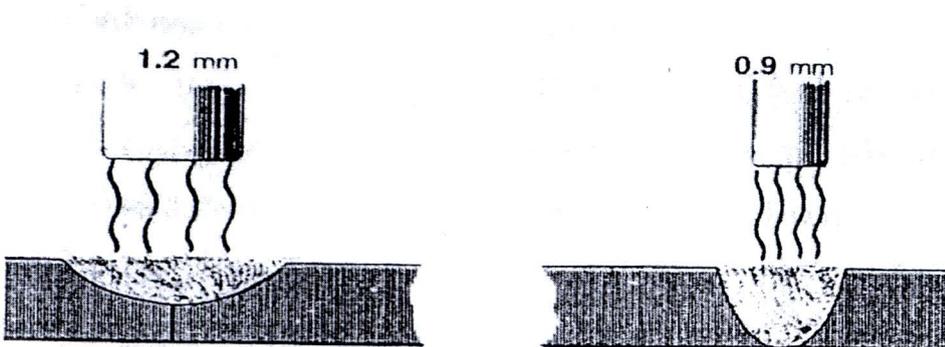
1) การเลือกใช้ลวดเติม มีสิ่งที่จะต้องพิจารณาดังนี้ [14, 15, 17]

- คุณสมบัติทางกลของโลหะงานลวดเติมที่เลือกใช้ต้องมีความต้านทานแรงดึงที่เหมาะสมกับโลหะงาน ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดของการเชื่อมประสาน

- ส่วนผสมทางเคมีของโลหะงาน ต้องเหมาะสมกับส่วนผสมทางเคมีของลวดเติม ซึ่งตัวอย่างในงานวิจัยนี้มีวัสดุงานเป็นแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี ลวดเติมที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนและใช้ความร้อนในการประสานต่ำ

2) ชนิดของลวดเติม ลวดเติมที่ใช้ในการประสานรอยต่อ จะต้องมีส่วนผสมทางเคมีเหมือนหรือใกล้เคียงกับโลหะงาน การเลือกลวดเติมและความหนาของวัสดุงานก็มีผลเช่นกัน

3) ขนาดของลวดเติม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดเติมจะมีผลต่อความกว้างของรอยต่อ ระยะเวลาหลอมล็ก อัตราเร็วในการเชื่อมประสาน ลวดเชื่อม โตจะ ใช้กระแสสูงและให้อัตราเติมเนื้อโลหะมากกว่า อย่างไรก็ตาม ถ้าใช้กระแสเชื่อมคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง ลวดเติมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าจะมีอัตราการเติมเนื้อโลหะมากกว่า การหลอมล็กมากกว่าเมื่อเทียบกับขนาดของลวดเติมที่โตกว่าดังรูปที่ 2.14 ดังนั้นการเลือกลวดเติมจึงขึ้นอยู่กับความหนาของงาน ระยะเวลาหลอมล็ก อัตราการเติมเนื้อโลหะ ตำแหน่งของรอยต่อ และลักษณะของรอยต่อในการแล่นประสานด้วย MIG-Brazing นั้นลวดเชื่อมที่ใช้อยู่จะมีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมสำหรับการแล่นประสานเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี คือ ลวดทองแดง-ซิลิกอน: Copper-Silicon ( $\text{CuSi}_3$ ) สำหรับตารางลวดเติมมาตรฐาน ANSI/AWS.A5.7



รูปที่ 2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาหลอมล็กของลวดเติมขนาดต่างกันเมื่อกระแสเท่ากัน [15]

## 2.6.2 แก๊สคลุม (Shielding Gas)

กระบวนการประสานโลหะด้วยแก๊สคลุม (GMAW) [10, 14, 15] แก๊สคลุมจะมีผลต่อคุณสมบัติของเนื้อโลหะประสาน ซึ่งแก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการ GMAW มีอยู่ 4 กลุ่ม คือ

- 1) แก๊สเฉื่อย (อาร์กอนและฮีเลียม)
- 2) แอคทีฟแก๊ส (คาร์บอน ไดออกไซด์)
- 3) อันรีแอคทีฟแก๊ส (ไนโตรเจน)
- 4) แก๊สผสม (อาร์กอน + คาร์บอน ไดออกไซด์, อาร์กอน + ออกซิเจน, อาร์กอน + ออกซิเจน + คาร์บอน ไดออกไซด์) การพิจารณาว่าจะเลือกแก๊สคลุมชนิดใด ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติพื้นฐานของแก๊สคลุมนั้น

คุณสมบัติพื้นฐานของแก๊สคลุมที่นำมาใช้ในการปกคลุมรอยต่อประสานได้แก่

- คุณสมบัติทางความร้อน ได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน คุณสมบัติเหล่านี้จะมีผลต่อแรงเคลื่อนอาร์คและรูปร่างของรอยต่อประสาน

- ความสามารถในการปกคลุมบริเวณอาร์ค ซึ่งจะป้องกันอากาศภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับโลหะหลอมเหลว

- การเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ บริเวณผิวหน้ารอยต่อชิ้นงาน เช่น ปฏิกิริยาทำความสะอาดผิวชิ้นงาน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกต่าง ๆ

- การทำให้เกิดรูปแบบของการถ่ายโอนน้ำโลหะ (Metal Transfer) ในลักษณะต่าง ๆ เช่นถ้าแก๊สคลุมเป็นคาร์บอน ไดออกไซด์ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นแบบลัดวงจร (Short Circuiting) หรือแบบหยดขนาดใหญ่ แต่ถ้าแก๊สคลุมเป็นอาร์กอน ฮีเลียม หรืออาร์กอนผสมคาร์บอน ไดออกไซด์ จะทำให้เกิดการถ่ายโอนน้ำโลหะเป็นแบบละออง (Spray Transfer)

Jönsson, Murphy และ Szekely [18] กล่าวว่าไว้ว่า แก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมประสานรอยต่อของแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี (Galvanized Steel Sheet) นั้น จะเป็นแก๊สอาร์กอน 99.5% หรืออาร์กอน 97.5% กับคาร์บอน ไดออกไซด์ 2.5 % เพราะมีผลทางลบกับรอยต่อน้อยที่สุด แก๊สที่นิยมนำมาใช้เป็นแก๊สคลุมในการเชื่อมแผ่นเหล็กกล้าชุบสังกะสี ได้แก่ แก๊สอาร์กอนเป็นหลัก เพราะจะทำให้การอาร์คเรียบ มีความร้อนน้อยกว่าใช้แก๊สฮีเลียม มีการเริ่มต้นการอาร์คที่ดีกว่า และมีการหลอมลึกลงกว่า ในกระบวนการประสานโลหะด้วย GMAW ได้มีการนำแก๊สอาร์กอนซึ่งเป็นแก๊สเฉื่อยมาใช้มานานแล้ว ในบรรยากาศของโลกมีแก๊สอาร์กอนอยู่ประมาณ 0.94 % โดยปริมาตร หรือ 1.3 % โดยน้ำหนัก มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่  $-189.2^{\circ}\text{C}$  มีจุดเดือดอยู่ที่  $-185.7^{\circ}\text{C}$  มีน้ำหนักมากกว่าอากาศประมาณ 4 เท่า มีน้ำหนักมากกว่าฮีเลียมประมาณ 10 เท่า แก๊สอาร์กอนที่นำมาใช้ในกระบวนการเชื่อมประสานรอยต่อจะต้องมีความบริสุทธิ์ประมาณ 99.95 % แก๊สอาร์กอนมีศักย์การเกิดไอออนต่ำ (Low Ionization Potential) จึงทำให้มีความเสถียรต่อการอาร์คสูง การอาร์คเรียบนิ่ง การอาร์คสม่ำเสมอ แม้ว่าความยาวในการอาร์คจะสูงบ้างต่ำบ้าง ก็มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของกระแสเชื่อมอย่างมาก ลดการกระเด็นของสะเก็ดโลหะ การแกว่งของเปลวเชื่อมมีน้อยกว่าเพราะแก๊สอาร์กอนมีความหนาแน่นสูง ( $1.348\text{ kg/m}^3$ ) การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแก๊สอาร์กอนที่ใช้ในกระบวนการประสานแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อเสียของการใช้แก๊สอาร์กอน [19]

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> <li>- การเริ่มต้นอาร์กง่ายและสม่ำเสมอ</li> <li>- การอาร์กมีเสียงเบากว่า</li> <li>- มี Spatter น้อยกว่า</li> <li>- อัตราการไหลของแก๊สต่ำ</li> <li>- ให้ปฏิกิริยาทำความสะอาดดี</li> <li>- ราคาถูก และหาได้ง่ายกว่า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่เหมาะกับงานเชื่อมที่มีชิ้นงานหนา</li> <li>- กั้นแนวเชื่อมแคบ</li> </ul>

อัตราการไหลของแก๊สคลุม [20] จะมีผลต่อคุณภาพของรอยต่อ ซึ่งแก๊สคลุมที่ไหลผ่านหัวฉลิตมาที่บริเวณรอยประสานรอยต่อต้องไหลแบบราบเรียบ หากเลือกใช้แก๊สที่มีอัตราการไหลสูงเกินไปจะทำให้การไหลของแก๊สคลุมเกิดการหมุนวน โดยแก๊สที่หมุนวนนี้จะผสมกับอากาศแล้วรวมตัวเข้ากับเนื้อโลหะประสานทำให้รอยต่อประสานสกปรก คุณสมบัติของรอยต่อลดลง หากแก๊สคลุมมีปริมาณน้อยจะทำให้รอยต่อมีรูพรุน โครงอากาศ ดังนั้น จึงควรเลือกอัตราการไหลของแก๊สคลุมให้เหมาะสมกับกระบวนการ ไม่ควรมากหรือน้อยจนเกินไป อัตราการไหลของแก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 อัตราการไหลของแก๊สคลุมที่ใช้ในกระบวนการ GMAW [20]

Welding Current (A)	Gas Flow Rate (L/min)
100-200	15-25
200-300	20-30
300-500	20-30

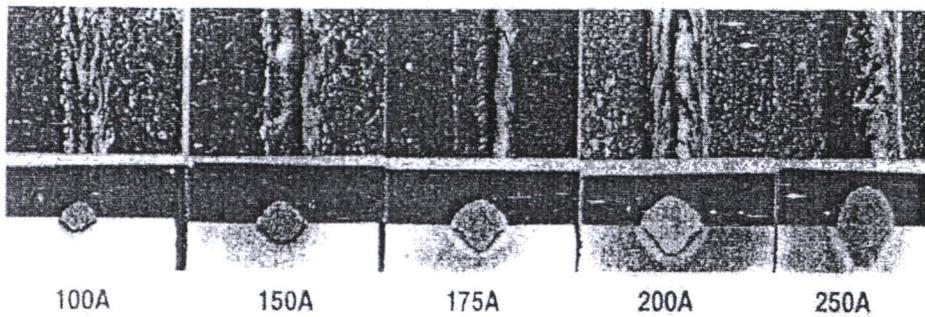
2.6.3 กระแสเชื่อม (Welding Current)

กระแสเชื่อมที่ใช้จะมีผลกระทบต่ออย่างมากต่ออัตราการเติมเนื้อโลหะลวดเติม ในระบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage: CV) กระแสเชื่อมจะถูกควบคุมด้วยอัตราเร็วในการป้อนลวด (Wire Feed Speed) เมื่ออัตราการป้อนลวดเพิ่มขึ้นกระแสก็จะเพิ่มขึ้น

1) ระบบแรงดันคงที่ (Constant Voltage : CV) [21, 22] กระบวนการประสานนี้มีระยะอาร์ค หรือ อาร์คโวลต์คงที่ กรณีเชื่อมอัตโนมัติหรือค่อนข้างคงที่ ถ้าเชื่อมด้วยมือ การปรับกระแสเชื่อมเพื่อให้ได้ระยะอาร์คที่เสถียรทำได้โดยการปรับความเร็วในการป้อนลวดเพื่อให้ได้กระแสที่ดีที่สุด

2) กระแสสลับและกระแสตรง (AC, DC) เป็นตัวแปรอีกตัวแปรหนึ่ง ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแล่นประสานด้วย GMAW โดยการต่อสายเชื่อมที่งานเป็นขั้วลบ (DCEP) จะใช้กันแพร่หลายในกระบวนการ GMAW

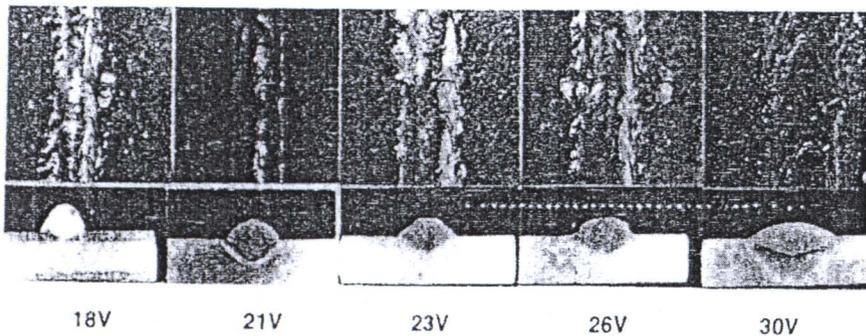
เพราะการอาร์คคงที่ การส่งถ่ายน้ำโลหะจะเสถียร การหลอมลึกคิดว่าส่วนการต่อสายเชื่อมแบบงานเป็นขั้วบวก (DCEN) ให้การหลอมลึกน้อย การส่งถ่ายน้ำโลหะส่วนใหญ่จะเป็นหยด สำหรับกระแสสลับจะไม่นิยมใช้ในกระบวนการนี้ แต่อาจใช้กระแสสลับความถี่สูงในการประสานอลูมิเนียมหรืออลูมิเนียมผสม กระแสสลับจะทำให้การอาร์คไม่เสถียร การเพิ่มปริมาณกระแสเชื่อม ทำให้อัตราการหลอมของลวดเติมเพิ่มขึ้น และทำให้อัตราการเติมเนื้อโลหะสู่รอยต่อเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ถ้ากระแสเชื่อมที่ใช้มีค่าน้อยเกินไปจะทำให้การถ่ายโอนน้ำโลหะเข้าสู่รอยเชื่อมช้า ทำให้การหลอมลึกของงานและแนวเชื่อมที่ได้ไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าใช้กระแสสูงเกินไป จะทำให้ระยะการหลอมลึกมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงกระแสที่ระดับต่างกัน [19]

2.6.4 แรงดันอาร์ค (Arc Voltage)

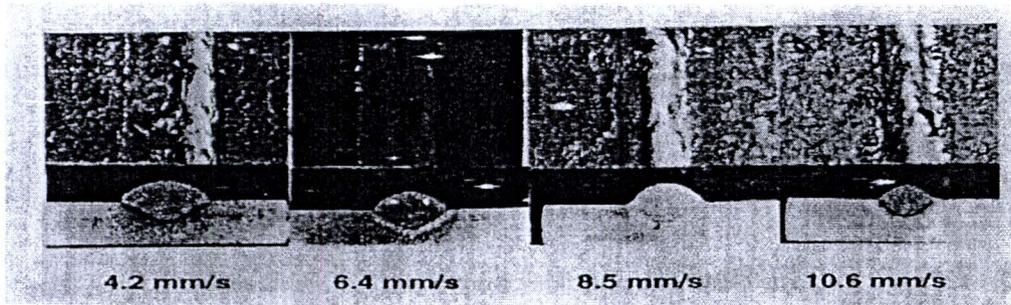
แรงดันอาร์คหรือแรงดันเชื่อม หาได้จากความยาวอาร์คระหว่างปลายลวดเติมกับงาน แรงดันอาร์คที่ต้องการใช้งานจะขึ้นอยู่กับขนาดของลวดเติม ชนิดแก๊สคลุม ตำแหน่งการเชื่อม ชนิดของรอยต่อและความหนาของโลหะงาน ถ้าแรงดันอาร์คสูงเกินไปจะทำให้เกิดประกายไฟมาก เกิดรุพรุน ชิ้นงานมีการหลอมละลายมากยิ่งขึ้นและเกิดรอยกินลึกก้นขอบ (Undercut) ถ้าแรงดันอาร์คต่ำจะทำให้บ่อหลอมเหลวนิด ชิ้นงานมีการหลอมละลายต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 อย่างไรก็ตามในกระบวนการ GMAW แรงดันอาร์คเป็นแบบคงที่ ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามกระแสน้อยมาก



รูปที่ 2.16 ผลกระทบของแรงดันอาร์คที่มีต่อรอยประสาน [22]

### 2.6.5 อัตราเร็วเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม (Welding Speeds : Travel Speeds)

เป็นอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมต่อหนึ่งหน่วยเวลา อัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมจะถูกควบคุมโดยช่างเชื่อม กรณีการเชื่อมกึ่งอัตโนมัติ หรือควบคุมด้วยกลไกจักรกล มีผลกระทบต่อระยะการหลอมลึกของรอยต่อ ขนาดของรอยต่อ ความต่อเนื่องของรอยต่อ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ผลกระทบจากอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมที่ระดับต่างกัน [22]

จากรูปที่ 2.19 ตัวแปรทุกตัวยกเว้น อัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อมเท่านั้นที่มีค่าเท่ากัน จะเห็นว่าถ้าลดอัตราการเคลื่อนที่ของหัวเชื่อม หรือถ้าหัวเชื่อมเคลื่อนที่ช้าเกินไป จะเกิดรอยกินลึกที่ขอบแนวเชื่อม การเติมน้ำโลหะที่ไม่สม่ำเสมอทำให้ความต่อเนื่องของรอยต่อไม่สมบูรณ์

## 2.7 การออกแบบการทดลอง (Designing Experiments)

เนื่องด้วยทรัพยากรมีจำนวนจำกัด ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพมากกว่าการทดลองที่เกิดขึ้นจากงานที่ไม่ได้รับการวางแผนมาก่อน และโดยเฉพาะการทดลองตามแผนที่วางไว้จะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้ดีกว่าด้วย ตัวอย่างเช่น ถ้ามีสมมติฐานว่าอิทธิพลของ Interaction ระหว่างปัจจัยสองตัวมีนัยสำคัญ ควรที่จะทำการออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ของอิทธิพล Interaction ด้วย และควรทำการทดลองแบบ Factorial มากกว่าการทดลองแบบ OFAT (One Factor at a Time) อิทธิพล Interaction จะเกิดขึ้นเมื่อปัจจัยตัวหนึ่งมีผลต่อปัจจัยอีกตัวหนึ่งที่ระดับต่างกันไป

การทดลองที่ได้รับการออกแบบมา [26] โดยมากจะมี 4 ขั้นตอนคือ การวางแผน (Planning) การคัดเลือก (Screening หรือ Process Characterization) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification) ตัวอย่างเช่น การออกแบบการทดลองจะประกอบด้วย การสร้าง (Creating) การวิเคราะห์ (Analyzing) และการผลิตผลการทดลอง

### 2.7.1 การวางแผน (Planning)

การวางแผน [26] ที่ดีจะช่วยทำให้เกิดปัญหาระหว่างการทำการทดลองน้อยลง ตัวอย่างเช่น บุคลากร อุปกรณ์ที่ทำการทดลอง เงินทุน และเรื่องกรรมวิธีการผลิตซึ่งอาจส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ครบ

สมบูรณ์ ถ้าโครงการที่ทำการทดลองนี้มีความสำคัญอันคับรอลงมากกว่าอีกโครงการหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้องมีการแบ่งใช้ทรัพยากรบางส่วนไป การแบ่งการทดลองเป็นส่วน ๆ ทำให้ผลการทดลองที่ได้มานั้น ยังสามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อทรัพยากรที่ถูกแบ่งใช้ไปนั้นกลับคืนมาก็สามารถทำการทดลองได้เหมือนเดิมและดำเนินต่อจากตอนที่หยุดไว้ก่อนหน้า การเตรียมการทดลองขึ้นอยู่กับลักษณะปัญหาที่กำลังเจอ และนี่เป็นขั้นตอนที่อาจจะต้องทำการ

- กำหนดปัญหา (Define the problem) ขั้นตอนนี้คือการกำหนดปัญหา ซึ่งปัญหาที่มีขอบเขตชัดเจน จะช่วยทำให้การกำหนดตัวแปรที่ถูกต้อง เพื่อให้สามารถตอบคำถามได้ตามที่ต้องการ
- กำหนดวัตถุประสงค์ (Define the objective) ขั้นตอนนี้คือกำหนดวัตถุประสงค์ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะทำให้มั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะทำนั้นสามารถตอบคำถามได้ตรง และสาระข้อมูลที่จะได้มานี้ใช้ได้จริง
- การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้สาระข้อมูลที่ถูกต้อง ในขั้นตอนนี้ควรมีการทบทวนถึงสิ่งต่างๆที่มีความเกี่ยวข้อง เช่น หลักการทางทฤษฎี หรือข้อมูลในอดีต ตัวอย่างเช่น ต้องการหาว่าปัจจัยใดหรือเงื่อนไขของกระบวนการแบบใดที่มีผลต่อประสิทธิภาพและความแปรปรวนของกระบวนการ หรือทำการหาเงื่อนไขของกระบวนการที่ดีที่สุด
- กระบวนการและระบบการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุม โดยหลักทางทฤษฎีทั้งกระบวนการและระบบการวัดควรอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยการใช้หลักการทาง การควบคุมกระบวนการทางสถิติ (Statistical Process Control, SPC) ในกรณีที่กระบวนการไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ แต่อย่างน้อยกระบวนการนั้นๆ ก็ควรที่จะสามารถทำซ้ำและให้ค่ากระบวนการแบบเดิมรวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งถ้าความแปรปรวนของกระบวนการนี้ที่ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่กำลังพิจารณา ผลการทดลองที่ได้นี้อาจจะไม่ได้ประโยชน์มากนัก

### 2.7.2 การคัดเลือก (Screening)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ [26] ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาคตามหลักการ ความสำคัญจำนวนน้อย “Vital Few” การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งบอกด้วยว่าค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งวิธีดังกล่าวต่อไป นี้ มักจะใช้ในการคัดเลือก

- Two-Level full และ Fractional Factorial ซึ่งในวงการอุตสาหกรรมมีใช้กันแพร่หลาย
- Plackett-Burman แม้ว่าจะมี Resolution น้อย แต่ว่ามีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองเพื่อการคัดเลือก และการทดสอบเรื่อง Robustness ซึ่งใช้กันโดยทั่วไป
- General Full Factorial (ปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) อาจจะมีประโยชน์บ้างในการทำการทดลองเพื่อการคัดเลือกขนาดเล็ก

### 2.7.3 การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

หลังจากที่มีการคัดเลือกตัวแปร [26] ที่มี ความสำคัญจำนวนน้อย (Vital-Few) ก็จะทำการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจะเป็นค่าอะไรขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดลองด้วย ตัวอย่างเช่น วัตถุประสงค์คือการหาค่า Yield ของกระบวนการที่มีค่ามากที่สุดและมีค่าความแปรปรวนของกระบวนการน้อยที่สุด

- ในหัวข้อภาพรวม Factorial Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ตัวแบบของ Two-level factorial, Plackett-Burman และ General Full Factorial
- ในหัวข้อภาพรวม Response Surface Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ตัวแบบของ Central composite design และ Box-Behnken Design
- ในหัวข้อ Response Optimization เป็นการอธิบายถึงวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดในการที่มีค่าตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่า (multiple responses) Minitab มีทั้งวิธี Numerical Optimization, Interactive Graph และ Overlaid Contour Plot ที่ไว้เพื่อช่วยในการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อเป็นเงื่อนไขของการเกิดค่าตอบสนองหลายๆค่าไปพร้อมๆกัน

### 2.7.4 การทวนสอบ (Verification)

การทวนสอบเป็นการทำการทดลองซ้ำเพื่อดูว่าค่าที่วิเคราะห์มาเป็นค่าที่ดีที่สุดนั้น ยังคงให้ผลลัพธ์ที่จริงหรือไม่ ตัวอย่างเช่น ทำการทดลองที่มีเงื่อนไขตามค่าที่หามาจากการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาขนาดของช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยค่าตอบสนอง

## 2.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

### 2.8.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Designs)

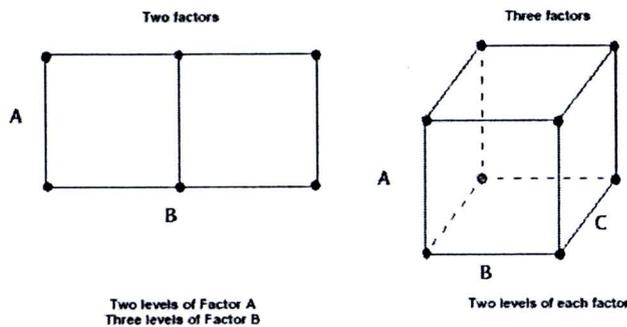
การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการและเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ เมื่อมีการทำการทดลอง ควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆกันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่ง เพราะจะทำให้ ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วยโดยอิทธิพลร่วม (Interaction) คือ ผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลายๆกระบวนการ ถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลอาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วม (Interaction) ได้ชัดเจนนัก

### 2.8.2 การออกแบบเพื่อการคัดเลือก (Screening Design)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุงการคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาตามหลักการ ความสำคัญจำนวนน้อย “Vital Few” การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) เพื่อบอกค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

### 2.8.3 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial

ในการทดลองแบบ Full Factorial [26] ค่าตอบสนอง (Response) จะถูกวัดค่าที่ทุกๆ เงื่อนไขของทุกค่าระดับปัจจัยที่มีในการทดลอง โดยเงื่อนไขการทดลอง (Combination of Factor Levels) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดให้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนอง โดยที่เงื่อนไขการทดลองแต่ละอันจะเรียกว่า รัน (Run) และมีการทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนอง และชุดข้อมูลทั้งหมดในทุกวันจะเรียกว่า แบบการทดลอง (Design) ในรูปภาพด้านล่างนี้เป็นรูปแสดงตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัย โดยจุดจะเป็นแสดงถึงเงื่อนไขการทดลอง (Combination) แต่ละอันของการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในตัวแบบ 2 ปัจจัย (Two-Factor Design) จุดที่มุมล่างด้านซ้าย และรันของการทดลองที่มีค่าระดับปัจจัย A เป็นค่าต่ำ (Low) และ ค่าระดับปัจจัย B เป็นค่าต่ำ เช่นกัน



รูปที่ 2.18 การออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial ในแต่ละปัจจัย [26]

### 2.8.4 การออกแบบการทดลองแบบ Fractional Factorial

ในการทดลองแบบ Full Factorial ค่าตอบสนองจะถูกวัดค่าในทุกๆ เงื่อนไขการทดลองซึ่งจะเป็นทุกค่าระดับของทุกปัจจัย ซึ่งอาจจะต้องมีการทำการทดลองจำนวนมากครั้ง ตัวอย่างเช่น การทดลองของ Two-Level Full Factorial ของ 6 ปัจจัย อย่างน้อยต้องมีการทดลองจำนวน 64 รัน หรือ กรณีที่มี 9 ปัจจัย จะมีการทดลองอย่างน้อย 512 รัน เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุน อาจทำการออกแบบการทดลองให้มีการทำการทดลองเฉพาะบางเงื่อนไขตัวแบบ Factorial ที่มีการทดลองไม่ครบทุกเงื่อนไขนี้เรียกว่า Fractional Factorial Designs โปรแกรม Minitab สามารถสร้างตัวแบบ Fractional Factorial ได้จนถึงจำนวนปัจจัย 15 ตัวต่อหนึ่งการทดลอง

Fraction Factorial [26] มีความสำคัญอย่างมากในการทดลองเพื่อการคัดเลือกปัจจัย (Screening) เพราะว่ามีผลการลดจำนวนรันลงจนเหลือขนาดการทดลองที่สามารถทำได้จริง รันที่ถูกเลือกมาทำการทดลองเป็นรันที่อยู่ในชุดการทดลองของตัวแบบ Full Factorial ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดลองครบทุกเงื่อนไขของทุกปัจจัยจะทำให้เกิดผลอย่างหนึ่งซึ่งเรียกว่าคอนฟาวด์ (Confounded) ซึ่ง คอนฟาวด์ นี้หมายถึง อิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถทำการประเมินค่าแยกออกมาได้เด็ดขาด และอาจเรียกว่าเป็น Aliased ที่อยู่ในรูปแบบของการคอนฟาวด์ เพราะว่าเรื่องของคอนฟาวด์ ทำให้อิทธิพล (Effects) บางตัวไม่สามารถหาค่าได้ทำให้การเลือกการทำ Fractional Factorial ต้องเลือกส่วนที่จะมาทำให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้งานได้ การเลือกส่วนการทดลองที่ดีที่สุด (Best Fraction) บางครั้งอาจจะต้องใช้ความรู้เฉพาะเกี่ยวกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์เพื่อมาตัดสินใจด้วย

## 2.9 การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression)

ในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย [27] จะเป็นการวิเคราะห์กับตัวแปรตามหรือตัวแปรเกณฑ์ (Y) โดยมีตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนาย (X) เพียงตัวเดียว อย่างไรก็ตาม ในบางปรากฏการณ์ที่ต้องอธิบายหรือทำนายทางสังคมศาสตร์ หากใช้ตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวจะมีข้อจำกัด ในการอธิบายพฤติกรรมของมนุษย์ซึ่งโดยมากจะมีความซับซ้อน การใช้ตัวแปรทำนายเพียงตัวเดียวจะไม่มีประสิทธิภาพพอที่จะอธิบายตัวแปรเกณฑ์ได้ ในกรณีที่จะพยายามอธิบายสัดส่วนความแปรปรวนของตัวแปรเกณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีตัวแปรทำนายมากกว่า 1 ตัว ซึ่งจะไปสู่การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเมื่อมีตัวแปรทำนายตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปใช้ในการทำนายตัวแปรเกณฑ์ ซึ่งโดยปกติตัวแปรทำนายหรือตัวแปรอิสระจะใช้สัญลักษณ์ X และตัวแปรเกณฑ์หรือตัวแปรตามจะใช้สัญลักษณ์ Y

### 2.9.1 สหสัมพันธ์แยกส่วน (Partial Correlation)

ในเบื้องต้นจะอธิบายแนวคิดของสหสัมพันธ์แยกส่วนเสียก่อน [27] กรณีที่ง่ายที่สุดจะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ระหว่าง 3 ตัวแปร ซึ่งให้ชื่อว่า  $X_1$ ,  $X_2$  และ  $X_3$  การวิเคราะห์สหสัมพันธ์แยกส่วนระหว่าง  $X_1$  และ  $X_2$  เมื่อ  $X_3$  ถูกควบคุมเอาไว้หรือถูกขจัดออก นั่นคือ อิทธิพลของ  $X_3$  ถูกขจัดออกจากทั้ง  $X_1$  และ  $X_2$  (ตัวแปรทั้งสองถูกปรับแก้ด้วย  $X_3$ ) ดังนั้นสหสัมพันธ์แยกส่วนจะแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง  $X_1$  และ  $X_2$  ที่เป็นอิสระจากอิทธิพลของ  $X_3$  สหสัมพันธ์แยกส่วนนี้ใช้สัญลักษณ์ว่า  $r_{12.3}$  สังเกตว่า ในสัญลักษณ์ไม่แสดง X และมี . เป็นตัวแบ่งระหว่างตัวแปรที่สัมพันธ์กับตัวแปรที่ถูกควบคุม วิธีการคำนวณ  $r_{12.3}$  มีสูตรดังนี้

$$r_{12.3} = [r_{12} - r_{13}r_{23}] / \sqrt{[(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)]}$$

สังเกตว่าในสูตรคำนวณนี้จะใช้สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัว

### 2.9.2 สหสัมพันธ์ครึ่งส่วน (Semipartial (Part) Correlation)

แนวคิดถัดมาคือสหสัมพันธ์ครึ่งส่วน (Semipartial or Part Correlation) กรณีที่ง่าย [27] คือกรณีที่มีตัวแปรเพียง 3 ตัว ซึ่งให้ชื่อว่า  $X_1$ ,  $X_2$  และ  $X_3$  การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ครึ่งส่วนจะเป็นการหาสหสัมพันธ์ระหว่าง  $X_1$  และ  $X_2$  เมื่อ  $X_3$  ถูกขจัดออกจาก  $X_2$  เท่านั้น นั่นคือ อิทธิพลของ  $X_3$  จะถูกขจัดออกจาก  $X_2$  เท่านั้น ดังนั้น สหสัมพันธ์ครึ่งส่วนจึงเป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $X_1$  และ  $X_2$  หลังจากสัดส่วนความแปรปรวนของ  $X_2$  ที่สามารถทำนายได้จาก  $X_3$  ถูกขจัดออกจาก  $X_2$  สหสัมพันธ์ครึ่งส่วนจะใช้สัญลักษณ์ว่า  $r_{1(2.3)}$  เมื่อ X จะไม่แสดงในสัญลักษณ์และจุดที่คั่นหมายถึงการขจัดอิทธิพลของตัวแปร วิธีการคำนวณมีสูตรดังนี้

$$r_{1(2.3)} = (r_{12} - r_{13}r_{23}) / \sqrt{(1 - r_{23}^2)}$$

สังเกตว่าสูตรคำนวณจะใช้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพียง 2 ตัว

### 2.9.3 สมการถดถอยที่อยู่ในรูปคะแนนดิบ (Unstandardized Regression Equation)

พิจารณาสมการถดถอยเชิงเส้นของกลุ่มตัวอย่าง [26] สำหรับการถดถอย  $Y$  บน  $X_{1,2,\dots,m}$  คือ

$$Y_i = b_1X_{1i} + b_2X_{2i} + \dots + b_mX_{mi} + a + e_i$$

เมื่อ  $Y$  คือตัวแปรเกณฑ์ และ  $X_k$  คือตัวแปรพยากรณ์ เมื่อ  $k = 1, \dots, m$ ,  $b_k$  คือความชัน (Partial Slope) ของเส้นถดถอยสำหรับ  $Y$  ที่ถูกทำนายด้วย  $X_k$ ,  $a$  คือจุดตัดของเส้นถดถอยสำหรับ  $Y$  ที่ถูกทำนายด้วย  $X_k$ ,  $e_i$  คือความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ของ  $Y$  ที่ไม่สามารถพยากรณ์ได้ด้วย  $X_k$  และ  $i$  คือสัญลักษณ์แทนตัวอย่างที่  $i$  โดยที่  $i$  มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง  $n$  เมื่อ  $n$  แทนขนาดของกลุ่มตัวอย่าง (โดยปกติเขียน  $i = 1, \dots, n$ ) มีการใช้ความชัน (Partial Slope) เพราะว่าจะแสดงถึงความชันของ  $Y$  บน  $X_k$  เฉพาะตัวนั้น ๆ ซึ่งมีการขจัดอิทธิพลของ  $X_k$  ตัวอื่นๆออก จึงเป็นเหตุให้มีการใช้สหสัมพันธ์แยกส่วน

สมการทำนายของกลุ่มตัวอย่าง [27] คือ

$$Y_i' = b_1X_{1i} + b_2X_{2i} + \dots + b_mX_{mi} + a$$

เมื่อ  $Y'$  คือค่าที่ถูกทำนายของ  $Y$  เมื่อมีการแทนค่า  $X_k$  และค่าอื่น ๆ ในสมการ สามารถคำนวณความคลาดเคลื่อน  $e_i$  สำหรับแต่ละตัวอย่างจากสมการทำนาย โดยการหาความแตกต่างระหว่าง  $Y$  จริงกับ  $Y$  ที่ถูกทำนาย จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของตัวอย่างด้วยสมการ

$$e_i = Y_i - Y_i'$$

สำหรับทุกค่า  $i = 1, \dots, n$

ในการคำนวณความชันและจุดตัดในการถดถอยพหุคูณกรณีมีตัวแปรทำนาย 2 ตัว โดยปกติจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ

สำหรับกรณีมีตัวแปรทำนาย 2 ตัวแล้ว ความชันและจุดตัดสามารถคำนวณได้ด้วยสูตร

$$\begin{aligned} b_1 &= [(r_{Y1} - r_{Y2}r_{12})s_Y]/[(1 - r_{12}^2)s_1] \\ b_2 &= [(r_{Y2} - r_{Y1}r_{12})s_Y]/[(1 - r_{12}^2)s_2] \\ a &= \bar{Y} - b_1\bar{X}_1 - b_2\bar{X}_2 \end{aligned}$$

ความชัน  $b_1$  อ้างอิงว่าเป็น 1) ค่าคาดหวังหรือการเปลี่ยนแปลงใน  $Y$  เมื่อ  $X_1$  เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย โดยที่  $X_2$  คงที่ 2) อิทธิพลของ  $X_1$  ที่มีต่อ  $Y$  เมื่อ  $X_2$  คงที่ และ 3) สัมประสิทธิ์การถดถอยในรูปของคะแนนดิบ สำหรับ  $b_2$  ก็อ้างอิงทำนองเดียวกัน จุดตัดอ้างอิงว่าเป็น 1) ค่าของ  $Y$  เมื่อ  $X_1$  และ  $X_2$  เป็น 0 และ 2) ค่าเฉลี่ยของ  $Y$  เมื่อ  $X_1$  และ  $-X_2$  เป็น 0

ดังนี้

$$b_1 = r_{Y1.2} \{ [s_Y \sqrt{(1-r_{Y2}^2)}] / [s_1 \sqrt{(1-r_{12}^2)}] \}$$

$$b_2 = r_{Y1.2} \{ [s_Y \sqrt{(1-r_{Y2}^2)}] / [s_1 \sqrt{(1-r_{12}^2)}] \}$$

มีอยู่หลายวิธีในการคำนวณหาความชันและจุดตัด สำหรับเกณฑ์นั้นโดยปกติจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้น ซึ่งใช้เกณฑ์กำลังสองต่ำสุด เกณฑ์กำลังสองต่ำสุดจะเป็นการคำนวณหาค่าสำหรับความชันและจุดตัดที่เป็นผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนในการทำนายคือค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุด นั่นคือต้องคำนวณหาสมการถดถอยที่นิยามว่าเป็นชุดของความชันและจุดตัดที่มีผลรวมของกำลังสองของความคลาดเคลื่อนต่ำสุด

#### 2.9.4 สมการการถดถอยในรูปของคะแนนมาตรฐาน (Standardized Regression Equation)

จากข้างต้นทั้งหมดที่กล่าวมา เป็นการคำนวณการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณเชิงเส้นที่เกี่ยวข้องกับการใช้คะแนนดิบในการคำนวณ ดังนั้นสมการการถดถอยที่ได้จะเรียกว่าเป็นสมการถดถอยในรูปของคะแนนดิบ [26] ความชันจะประมาณค่าได้จากคะแนนดิบ เพราะว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงคะแนนดิบใน Y เมื่อค่าคะแนนในตัวแปร  $X_k$  เปลี่ยนแปลง 1 หน่วย เมื่อมีการควบคุมตัวแปร  $X_k$  อื่น ๆ เอาไว้ มีบางครั้งที่ต้องการแสดงการถดถอยในรูปของคะแนนมาตรฐาน z (z-score) มากกว่า ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของตัวแปรที่อยู่ในรูปของคะแนนมาตรฐาน ( $z_1, z_2$  และ  $z_Y$ ) มีค่าเป็น 0 และ 1 ตามลำดับ สมการทำนายเชิงเส้นในรูปของคะแนนมาตรฐานจะกลายเป็น

$$z(Y_i') = \beta_1 z_{1i} + \beta_2 z_{2i} + \dots + \beta_m z_{mi}$$

เมื่อ  $\beta_k$  คือความชันในรูปมาตรฐานและเทอมอื่นๆ ก็ทำนองเดียวกับที่กล่าวไปข้างต้นในกรณีที่เป็น การถดถอยอย่างง่าย จะไม่มีจุดตัดในสมการทำนายรูปคะแนนมาตรฐานเพราะว่ามีค่าเฉลี่ยของคะแนนมาตรฐานในทุก ตัวแปรเป็น 0 ความชันมาตรฐานโดยทั่วไปคำนวณได้ว่า

$$\beta_k = b_k (s_k / s_Y)$$

สำหรับกรณีมีตัวแปรพยากรณ์ 2 ตัว ความชันมาตรฐานสามารถคำนวณได้ว่า

$$\beta_1 = b_1 (s_1 / s_Y)$$

$$= (r_{Y1} - r_{Y2} r_{12}) / (1 - r_{12}^2)$$

$$\beta_2 = b_2 (s_2 / s_Y)$$

$$= (r_{Y2} - r_{Y1} r_{12}) / (1 - r_{12}^2)$$

ถ้า  $r_{12} = 0$  แล้วแสดงว่าตัวแปรพยากรณ์ทั้งสองตัวไม่มีความสัมพันธ์กันแล้ว  $\beta_1 = r_{Y_1}$  และ  $\beta_2 =$

## 2.9.5 การทดสอบนัยสำคัญ

### 2.9.5.1 การทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอยทั้งหมด

การทดสอบแรกเป็นการทดสอบนัยสำคัญของสมการถดถอยทั้งหมดหรือเรียกอีกอย่างว่าการทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การอธิบาย [27] เป็นการทดสอบที่จำเป็นในการทดสอบค่า  $b_k$  ทั้งหมดที่อยู่ในสมการ สามารถเขียนสมมติฐานศูนย์และสมมติฐานอื่นได้ดังนี้

$$H_0 : \rho_{Y,1,\dots,m}^2 = 0$$

$$H_1 : \rho_{Y,1,\dots,m}^2 \neq 0$$

ถ้า  $H_0$  ถูกปฏิเสธแล้วแสดงว่า มีสัมประสิทธิ์การถดถอยอยู่ 1 ตัวหรือมากกว่า ( $b_k$ ) อาจจะมีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจาก 0 อย่างไรก็ตาม เป็นไปได้ที่จะมีนัยสำคัญของ  $R^2$  ทั้งหมดเมื่อไม่มีตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวมีนัยสำคัญ ซึ่งจะบ่งชี้ว่าไม่มีตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวที่มีความแข็งแรงเหนือตัวแปรอื่น ๆ แต่อย่าลืมว่าตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวอาจจะสัมพันธ์กัน ดังนั้น "ต้องควบคุมตัวแปรพยากรณ์อื่น" ซึ่งเป็นความสำคัญอันดับแรก ถ้า  $H_0$  ไม่ถูกปฏิเสธแต่ไม่มีสัมประสิทธิ์การถดถอยที่มีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจากศูนย์

การทดสอบอยู่บนพื้นฐานสถิติที่ว่า

$$F = \frac{[R^2 / m]}{[(1 - R^2) / (n - m - 1)]}$$

เมื่อ  $F$  คือสถิติทดสอบ  $F$  ส่วน  $R^2$  คือสัมประสิทธิ์การอธิบาย (สัดส่วนความแปรปรวนใน  $Y$  ที่ถูกทำนายได้ด้วย  $X_k$ ) ส่วน  $1 - R^2$  คือสัมประสิทธิ์การไม่อธิบาย (สัดส่วนความแปรปรวนใน  $Y$  ที่ไม่สามารถทำนายได้ด้วย  $X_k$ )  $m$  คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ และ  $n$  คือขนาดของกลุ่มตัวอย่าง สถิติทดสอบ  $F$  จะถูกเปรียบเทียบกับ  $F$  วิกฤติที่ได้จากตารางสถิติเป็นแบบทิศทางเดียว โดยมีองศาแห่งความเป็นอิสระเท่ากับ  $m$  และ  $(n - m - 1)$  ค่าวิกฤติ  $F$  จะเท่ากับ  $(1-\alpha)F_{m,(n-m-1)}$  สถิติทดสอบสามารถเขียนได้ในรูปหนึ่งว่า

$$\begin{aligned} F &= \frac{(SS_{reg} / df_{reg})}{(SS_{res} / df_{res})} \\ &= MS_{reg} / MS_{res} \end{aligned}$$

เมื่อ  $df_{reg} = m$  และ  $df_{res} = (n - m - 1)$

### 2.9.5.2 การทดสอบนัยสำคัญของ $b^k$

การทดสอบที่สองเป็นการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของความชันและสัมประสิทธิ์การถดถอย  $b^k$  ในอีกกรณีหนึ่ง [27] สัมประสิทธิ์การถดถอยที่อยู่ในรูปคะแนนดิบมีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจากศูนย์หรือไม่ ซึ่งจะเหมือนกับการทดสอบ  $\beta_k$  แต่จะไม่แสดงการทดสอบแยกส่วนออกมา สมมติฐานศูนย์และสมมติฐานอื่นสามารถเขียนได้ดังนี้

$$H_0 : \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_k \neq 0$$



เมื่อ  $\beta_k$  คือความชันของประชากรในตัวแปร  $X_k$

การถดถอยพหุคูณจำเป็นที่จะต้องคำนวณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานสำหรับแต่ละ  $b_k$  ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$s_{res}^2 = SS_{res}/df_{res} = MS_{res}$$

เมื่อ  $df_{res} = (n - m - 1)$  องศาแห่งความเป็นอิสระจะสูญหายไปเพราะมีการประมาณค่าความชันของประชากรและจุดตัด นั่นคือ  $\beta_k$  และ  $\alpha$  ตามลำดับ จากข้อมูลตัวอย่าง ความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวนของการประมาณค่าหาได้จากปริมาณของความแปรปรวนในความคลาดเคลื่อน ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าได้โดยการถอดรากที่สองของความคลาดเคลื่อนของความแปรปรวนของการประมาณค่า และสามารถได้โดยผ่านความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่า เรียกว่า ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่า ใช้สัญลักษณ์ว่า  $s_{res}$

ท้ายสุดจะคำนวณความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ  $b_k$  แต่ละตัว ใช้สัญลักษณ์ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ  $b_k$  ว่า  $s(b^k)$  คำนวณได้ดังนี้

$$s(b_k) = s_{res} / \sqrt{[(n-1)s_k^2(1-R_k^2)]}$$

เมื่อ  $s_k$  คือความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างสำหรับตัวแปรทำนาย  $X_k$  และ  $R_k^2$  คือกำลังสองของสหสัมพันธ์พหุคูณระหว่าง  $X_k$  หนึ่งตัวกับ  $X_k$  ที่เหลือ  $R_k^2$  จะแสดงถึงการซ้อนทับกันระหว่างตัวแปรพยากรณ์ ( $X_k$ ) ในกรณีที่มีตัวแปรพยากรณ์ 2 ตัว  $R_k^2$  จะเท่ากับ  $r_{12}^2$

ต่อมาเป็นการทดสอบทางสถิติสำหรับการทดสอบนัยสำคัญของ  $b_k$  ในการทดสอบทางสถิตินี้จะใช้อัตราส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยหารด้วยความคลาดเคลื่อนมาตรฐานดังสูตร

$$t = b_k/s(b_k)$$

สถิติทดสอบ  $t$  จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าวิกฤติแบบสองทางกับระดับนัยสำคัญที่  $(n - m - 1)$  โดยเปิดจากตารางสถิติ ว่าวิกฤติจะเท่ากับ  $\pm_{(\alpha/2)}t_{(n-m-1)}$  กรณีแบบสองทาง

ในการหาช่วงความเชื่อมั่นของ  $b_k$  โดยการนำ  $b_k$  มาบวกและลบออกจากค่าวิกฤติที่เปิดจากตาราง แล้วคูณด้วยความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน ช่วงความเชื่อมั่นของ  $b_k$  คำนวณได้ด้วยสูตร

$$CI(b_k) = b_k \pm (\alpha/2)t_{(n-m-1)}s(b_k)$$

ถ้าได้ว่าสมมติฐานศูนย์คือ  $\beta_k$  เท่ากับ 0 ( $H_0 : \beta_k = 0$ ) ดังนั้น ถ้าช่วงความเชื่อมั่นครอบคลุมแล้ว  $b_k$  จะไม่มีนัยสำคัญทางสถิติแตกต่างจากศูนย์ที่ระดับนัยสำคัญ นั่นคือแปลความหมายได้ว่า เมื่อเก็บข้อมูลซ้ำกับกลุ่มตัวอย่างหลาย ๆ กลุ่ม จะมีจำนวน  $(1 - \alpha)$  เปอร์เซนต์ ที่ค่า  $\beta_k$  จะตกอยู่ในช่วงความเชื่อมั่นนี้ รูปแบบโดยทั่วไปของการทดสอบที่สองนี้จะแสดงเป็นสมมติฐานได้ว่า

$$H_0 : \beta_k = \beta_0$$

$$H_1 : \beta_k \neq \beta_0$$

เมื่อ  $\beta_0$  คือค่าที่  $\beta_k$  ถูกสมมติให้เท่ากับ เมื่อ  $\beta_0 = 0$  แล้ว ก็จะทดสอบเหมือนกับที่กล่าวไว้ข้างต้น รูปแบบการทดสอบโดยทั่วไปของ  $b_k$  คือ

$$t = (b_k - \beta_0)/s(b_k)$$

ในรูปแบบโดยมากของช่วงความเชื่อมั่น ก็จะรวม  $\beta_0$  ไว้ในด้วย

### 2.9.6 การทดสอบการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้

การทดสอบที่สาม เป็นการทดสอบการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ [27] ด้วยตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัว ตัวอย่างที่เป็นโมเดลมีตัวพยากรณ์ 2 ตัว สามารถทดสอบการเพิ่มขึ้นได้ เป็นสัดส่วนของความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปร 2 ตัวเปรียบเทียบกับตัวแปร 1 ตัว ซึ่งเป็นความจำเป็นในกรณีที่มิใช่โมเดลตัวแปรพยากรณ์ 2 ตัวกับโมเดลที่มีตัวแปรพยากรณ์ 1 ตัว การทดสอบการเพิ่มขึ้นของ  $X_1$  มีสถิติทดสอบคือ

$$F = \frac{[(R_{Y,12}^2 - R_{Y,2}^2)/(m_2 - m_1)]}{[(1 - R_{Y,12}^2)/(n - m_2 - 1)]}$$

เมื่อ  $R_{Y,2}^2 = r_{Y2}^2$  แล้ว  $m_2$  คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลที่มีตัวพยากรณ์ 2 ตัว และ  $m_1$  คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลที่มีตัวพยากรณ์ 1 ตัว สถิติ  $F$  จะนำไปเปรียบเทียบกับ  $F$  วิกฤติที่เปิดจากตารางแบบทิศทางเดียว ใช้สัญลักษณ์ว่า  $(1-\alpha)F_{(m_2-m_1, n-m_2-1)}$  ทดสอบการเพิ่มขึ้นของ  $X_2$  ใช้สถิติทดสอบ

$$F = \frac{[(R_{Y,12}^2 - R_{Y,1}^2)/(m_2 - m_1)]}{[(1 - R_{Y,12}^2)/(n - m_2 - 1)]}$$

เมื่อ  $R_{Y,1}^2 = r_{Y1}^2$  แล้ว  $m_2$  คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลที่มีตัวพยากรณ์ 2 ตัว และ  $m_1$  คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลที่มีตัวพยากรณ์ 1 ตัว สถิติ  $F$  จะนำไปเปรียบเทียบกับ  $F$  วิกฤติที่เปิดจากตารางแบบทิศทางเดียว ใช้สัญลักษณ์ว่า  $(1-\alpha)F_{(m_2-m_1, n-m_2-1)}$

โดยทั่วไป สามารถเปรียบเทียบโมเดลการถดถอย 2 โมเดลสำหรับกลุ่มตัวอย่างเดียวกันเมื่อโมเดลเต็มรูปแบบ (full model) นิยามว่ามีตัวแปรพยากรณ์ทุกตัวอยู่ในโมเดล และโมเดลที่ลดรูป (reduced model) นิยามว่าเป็นโมเดลที่มีเพียงบางชุดของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดล นั่นคือสำหรับโมเดลลดรูปอาจจะมีตัวแปรพยากรณ์เพียง 1 ตัวหรือมากกว่า ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของโมเดลเต็มรูปแบบที่มีการลดตัวแปรพยากรณ์ลงบางตัว สถิติทดสอบโดยทั่วไปเขียนได้ว่า

$$F = \frac{[(R_{full}^2 - R_{red}^2)/(m_{full} - m_{red})]}{[(1 - R_{full}^2)/(n - m_{full} - 1)]}$$

เมื่อ "full" และ "red" เป็นสัญลักษณ์ของโมเดลเต็มรูปแบบ (full model) และโมเดลลดรูป(reduced model) ส่วน  $m_{full}$  คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลเต็มรูปแบบ และ  $m_{red}$  คือจำนวนของตัวแปรพยากรณ์ในโมเดลลดรูป สถิติ  $F$  จะนำไปเปรียบเทียบกับ  $F$  วิกฤติที่เปิดจากตารางแบบทิศทางเดียว ใช้สัญลักษณ์ว่า  $(1-\alpha)F_{(m_{full}-m_{red}, n-m_{full}-1)}$

### 2.9.7 ข้อตกลงเบื้องต้นทางสถิติ

ข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณจะเหมือนกับข้อตกลงเบื้องต้นของการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่าย แต่มีบางข้อตกลงเบื้องต้นที่แตกต่างออกไปตามตาราง 2.3 ดังนี้

ตารางที่ 2.3 ข้อตกลงเบื้องต้นและผลของการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้นในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

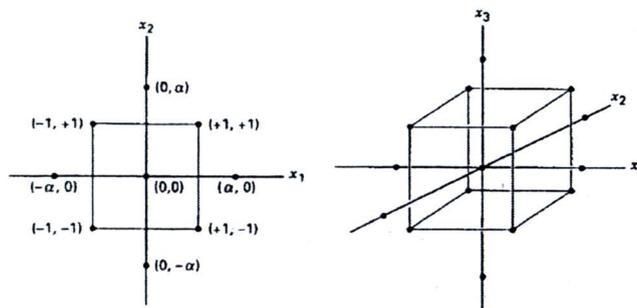
ข้อตกลงเบื้องต้น	ผลการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้น
1. การถดถอย $Y$ บน $X_i$ เป็นเชิงเส้น	เกิดความลำเอียงในความชันและจุดตัด
2. ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระจากกัน	มีอิทธิพลของความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของโมเดล
3. ความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็น 0	มีความลำเอียงใน $Y'$

ข้อตกลงเบื้องต้น	ผลการละเมิดข้อตกลงเบื้องต้น
4. ความเป็นเอกพันธ์ของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน	มีความลำเอียงใน $S^2_{res}$
5. ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงเป็นโค้งปกติ	มีความเที่ยงตรงต่ำในค่าของความชันและสัมประสิทธิ์การอธิบาย
6. ค่าของ $X_k$ เป็นแบบกำหนด	ความคลาดเคลื่อนในการทำนายมีค่าสูง มีความลำเอียงในความชันและจุดตัด
7. ไม่เกิด Multicollinearity ระหว่าง $X_k$	สัมประสิทธิ์การถดถอยไม่คงที่ $R^2$ รวม อาจมีนัยสำคัญ ในขณะที่ตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวอาจไม่มีนัยสำคัญ มีข้อจำกัดในการสรุปอ้างอิงของโมเดล

## 2.10 การออกแบบการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสม

ในการออกแบบการทดลองเพื่อการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง การออกแบบที่นิยมใช้สำหรับพิตแบบจำลองที่สองนี้ใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นวิธีที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไปตำแหน่งจุดของ CCD จะประกอบด้วย  $2^k$  แฟกทอเรียลที่มี  $n_f$  รัน  $2^k$  รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาว (Star) และ  $n_f$  รันที่จุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2.19 แสดง CCD สำหรับ  $k=2$  และ  $k=3$  บ้าง

การพัฒนาของ CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ นั่นคือ การออกแบบ  $2^k$  ถูกนำมาใช้เพื่อพิต แบบจำลองอันดับที่หนึ่ง แล้วพบว่า แบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับข้อมูล ดังนั้นจึงมีการรันการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้สามารถใส่พจน์ควอดราติกลงในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง โดยต้องกำหนดการออกแบบพารามิเตอร์ 2 ตัว นั่นคือ ระยะทาง  $\alpha$  ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง  $n_f$



รูปที่ 2.19 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ  $k=2$  และ  $k=3$  [28]

### 2.10.1 ความสามารถในการหมุน

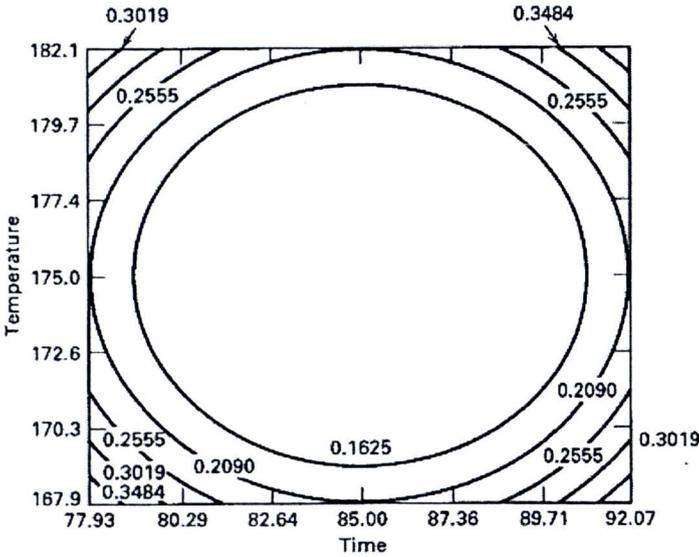
เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่า แบบจำลองนี้ “ดี” คือ แบบจำลองจะต้องอยู่กับร่องกับรอยอย่างมี

เหตุผล และมีความแปรปรวนที่มีเสถียรภาพของผลตอบที่จุด  $x$  ซึ่งอยู่ในความสนใจ ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม นั่นคือ

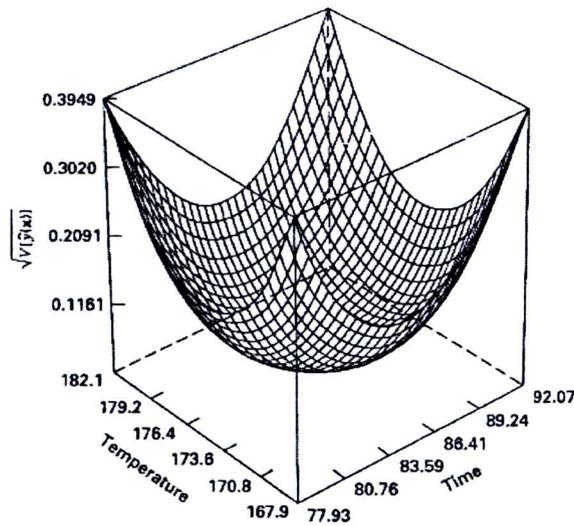
$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 \mathbf{x}'(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}\mathbf{x}$$

$V[\hat{y}(x)]$  คือ จุด  $x$  ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน

รูปที่ 2.20 แสดงเส้นโครงร่างของค่าคงตัว  $\sqrt{V[\hat{y}(x)]}$  สำหรับแบบจำลองอันดับที่สองที่ถูกฟิตโดยใช้ CCD สังเกตว่า เส้นโครงร่างของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีค่าคงตัวของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะเป็นวงกลมที่มีศูนย์กลางอยู่ร่วมกัน การออกแบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ  $\hat{y}$  ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง  $(0, 0, \dots, 0)$  เราเรียกการออกแบบเช่นนี้ว่า การออกแบบที่สามารถหมุนได้



รูปที่ 2.20 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ ซึ่งถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้ [31]



รูปที่ 2.20 [ต่อ] เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานคงที่ ซึ่งถูกทำนายสำหรับ CCD ที่สามารถหมุนได้ [31]

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ  $\alpha$  ค่าของ  $\alpha$  สำหรับความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบหมายความว่า  $\alpha = (n_f)^{1/4}$  จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประสมกลางที่สามารถหมุนได้ โดยที่  $n_f$  คือ จำนวนของจุดที่ถูกใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ

### 2.11 แบบจำลองการถดถอยสำหรับ Central Composite Design

เนื่องจากการออกแบบการทดลองด้วยวิธี Central Composite Design มีการทำการทดลองไม่พอเพียงที่จะทำให้เกิด Cubic Model ได้ [28] ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยจึงมีทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้

- 1) Linear Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i$$

- 2) 2FI (two-factor interaction) Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^p \beta_{ij} X_i X_j$$

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

3) Quadratic Model

$$E(y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i X_i + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^p \beta_{ii} X_i^2 \quad [29]$$

2.12 พื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology)

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย  $x$  และ  $\varepsilon$  คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบ  $y$  ที่เป็นผลมาจากการทดลอง

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

ถ้ากำหนดว่า  $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$  ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2)$$

ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)” โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปของกราฟฟิก ดังรูปที่ 2.21 โดยที่  $\eta$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $x_1$  และ  $x_2$  เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังแสดงในรูปที่ 2.22 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบของ  $x_1$  และ  $x_2$  เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

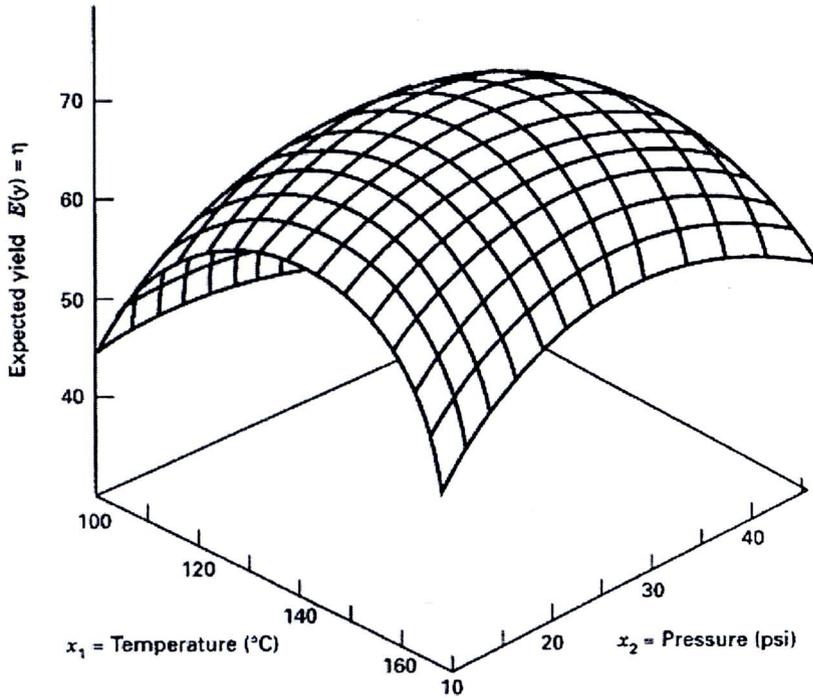
โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรกจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง  $y$  และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

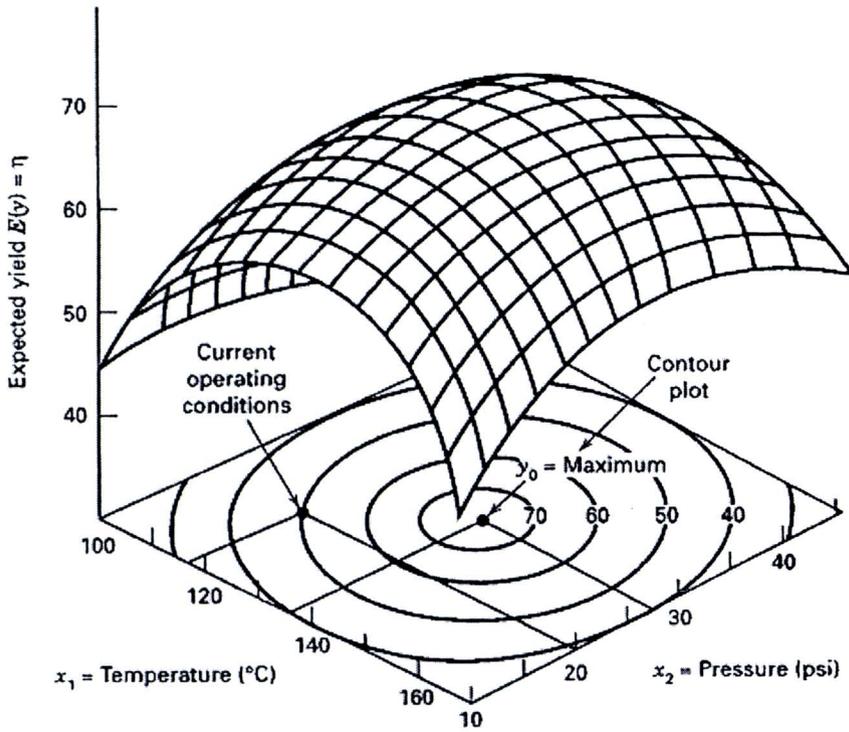
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องกับในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง ดัง

สมการ

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$



รูปที่ 2.21 พื้นผิวผลตอบแบบสามมิติ [28]



รูปที่ 2.22 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ [28]

อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงพื้นผิวผลตอบจำเป็นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามหรือค่าผลตอบ ต่อตัวแปรอิสระต่างๆ เป็นลำดับแรก ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือ แบบจำลองกำลังหนึ่ง (First order) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.23

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

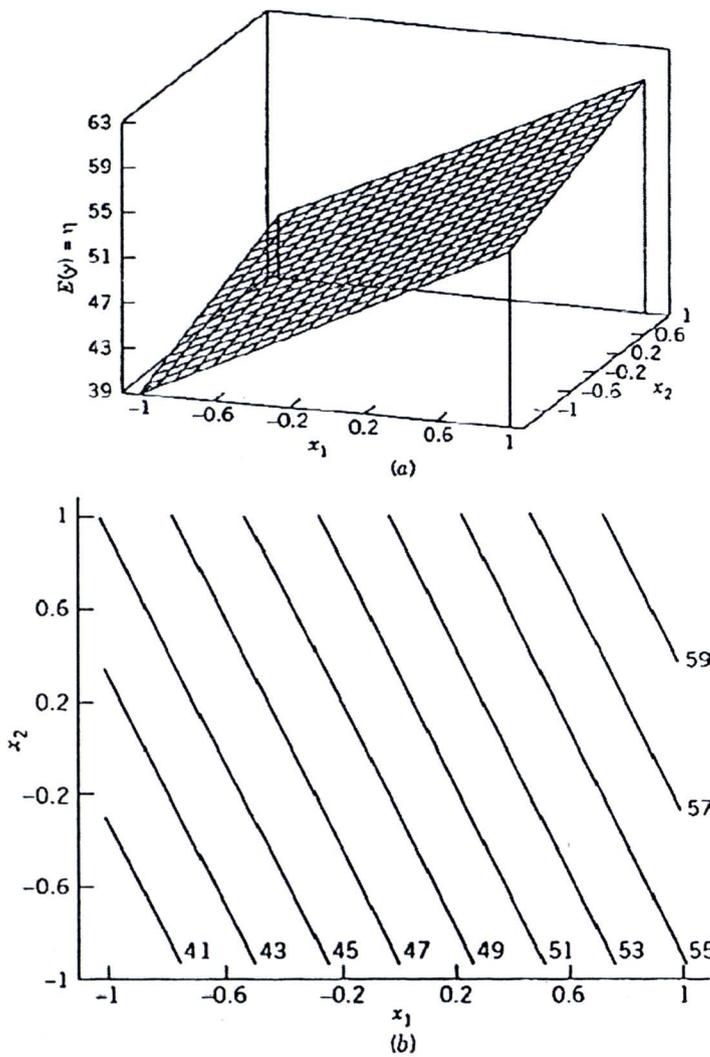
หากตัวแปรอิสระมีความสัมพันธ์กันระหว่างกัน ต้องทำการเพิ่มตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ระหว่างกันเข้าไปอีกหนึ่งตัวแปร (First order with interaction) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.24

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j$$

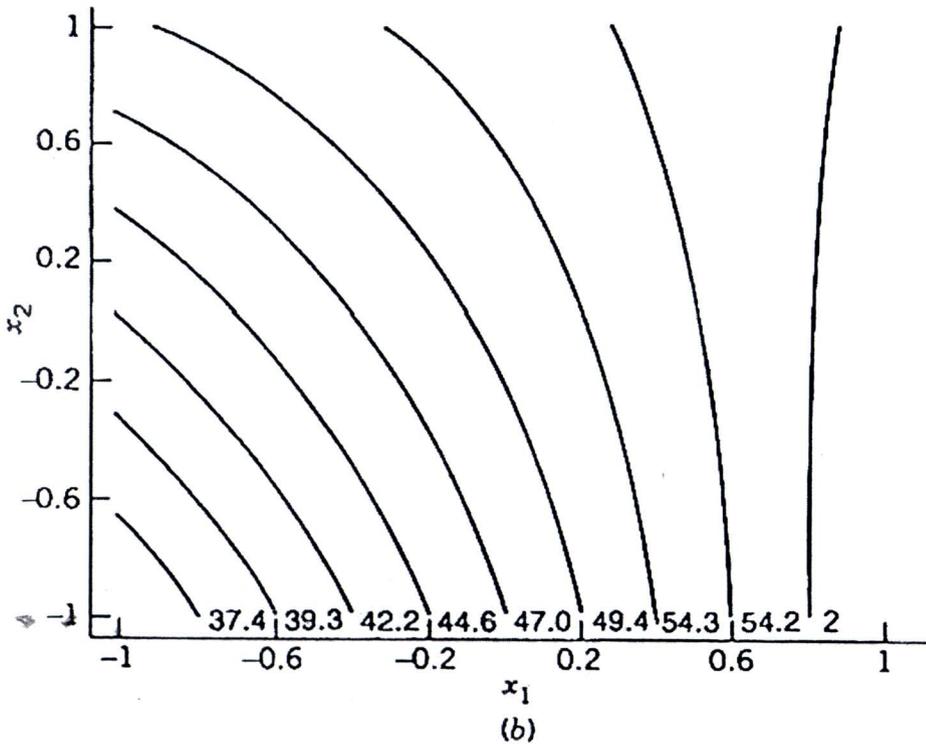
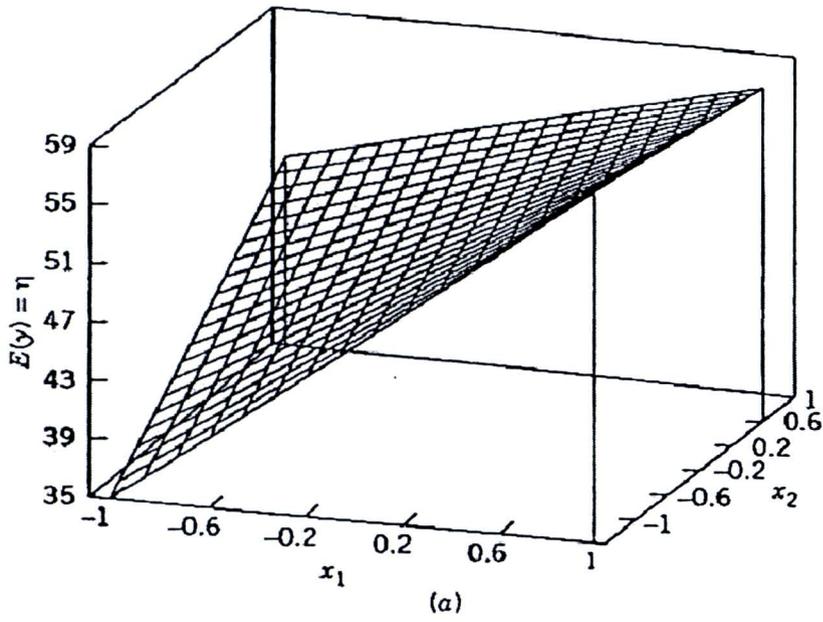
สำหรับระบบที่มีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้แบบจำลองที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสอง (Second order) ตัวอย่างดังรูปที่ 2.25 นอกจากนี้ แบบจำลองลำดับสอง ยังมีรูปแบบพื้นผิวผลตอบที่มีความหลากหลาย ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.26

$$\eta = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j$$

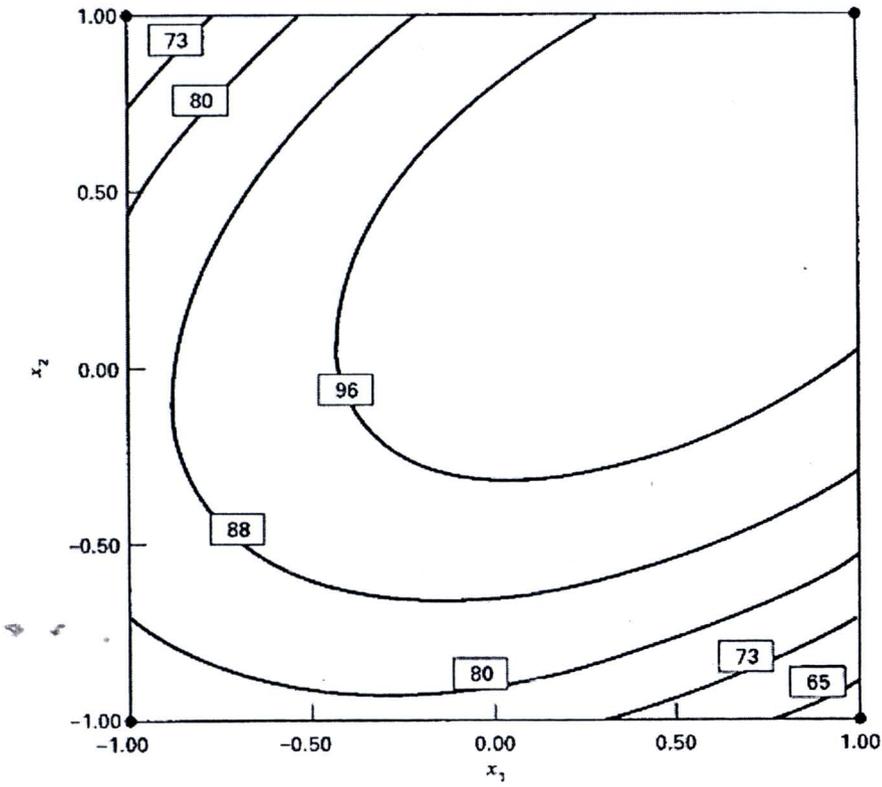
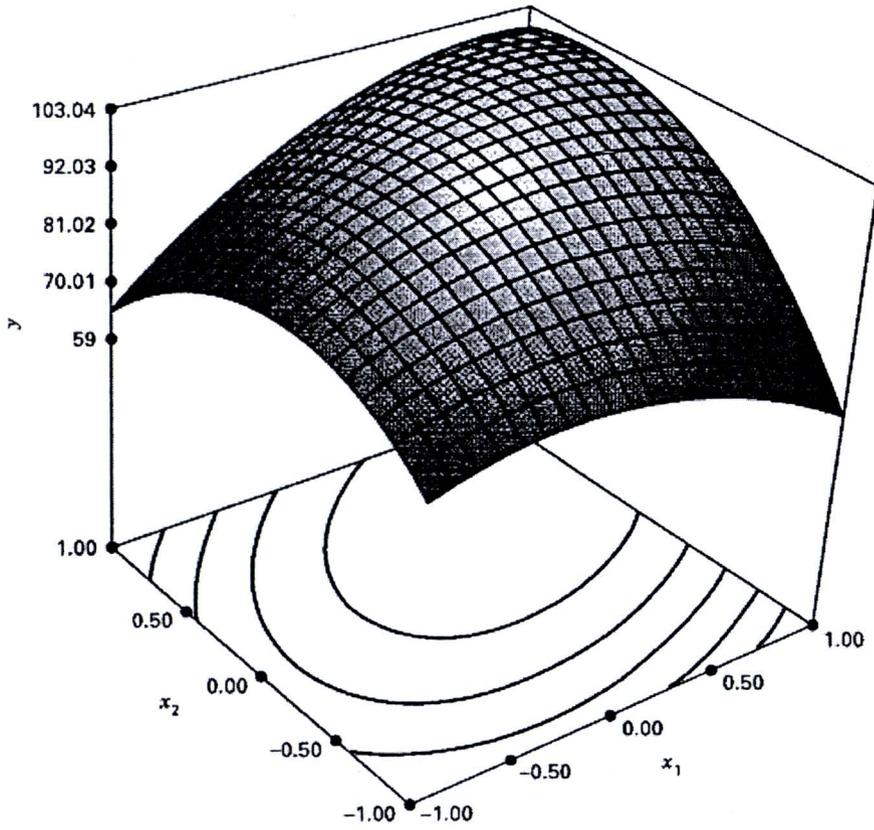
การได้มาของฟังก์ชันต่างๆ มักได้จากสมการถดถอย



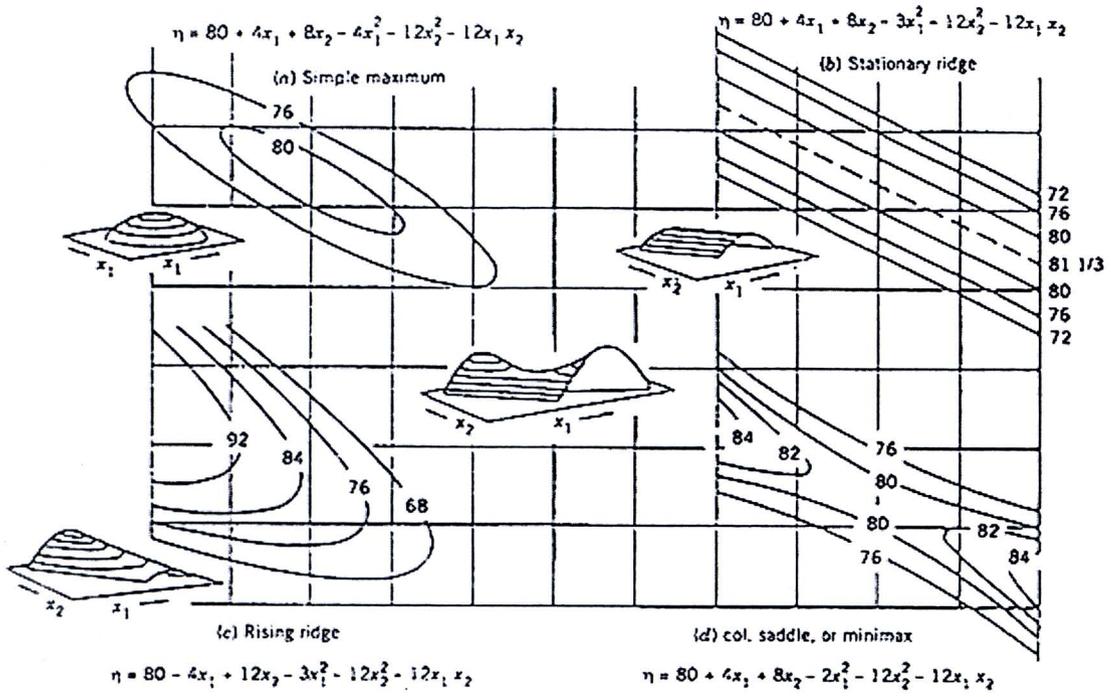
รูปที่ 2.23 เส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order Model [30]



รูปที่ 2.24 เส้น โครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ First Order with Interaction [30]



รูปที่ 2.25 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบแบบ Second Order [31]



รูปที่ 2.26 เส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบในลักษณะหลากหลายแบบของ Second Order [30]