

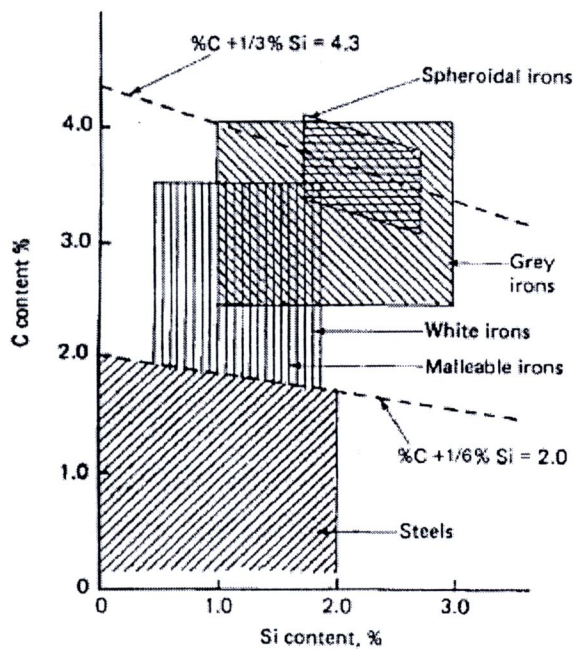
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

##### 1.1 ประเภทของเหล็กหล่อและเหล็กหล่อเทา

เหล็กหล่อจัดเป็นโลหะที่มีสัดส่วนในการผลิตมากเป็นอันดับหนึ่งของโลกในอุตสาหกรรมหล่อโลหะ สาเหตุหลักที่เหล็กหล่อเป็นที่รู้จักและถูกใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องมาจากเหล็กหล่อมีราคาถูกกว่าวัสดุประเภทอื่น มีความสามารถในการหล่อให้ได้รูปร่างที่ซับซ้อนได้ง่าย โดยธาตุผสมหลักของเหล็กหล่อคือ ธาตุคาร์บอน (C) และซิลิกอน (Si) ซึ่งช่วงของส่วนผสมทางเคมีของธาตุคาร์บอนและซิลิกอนที่นิยมใช้ในการผลิตเหล็กกล้าและเหล็กหล่อชนิดต่างๆ ได้ถูกแสดงใน ภาพที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าเหล็กหล่อจะมีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนเกินจุดสูงสุดที่ธาตุคาร์บอนสามารถละลายในโครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenite) ดังแสดงด้วยเส้นประเส้นล่างในภาพที่ 2.1 ปริมาณธาตุคาร์บอนในเหล็กหล่อจะมีมากกว่าในเหล็กกล้า โดยจะมีตั้งแต่ 2% คาร์บอนขึ้นไป แต่ในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อที่ผลิตในปัจจุบันจะมีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนอยู่ระหว่าง 2.5%-4% โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 2.1 ช่วงของส่วนผสมของธาตุคาร์บอนและซิลิกอนในการผลิตเหล็กกล้า และเหล็กหล่อชนิดต่างๆ

เหล็กหล่อสามารถแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างการรวมตัวของคาร์บอนเป็นหลักได้ 6 ประเภท (มานพ ดันตระกูล, 2536)

#### 1) เหล็กหล่อสีขาว (White cast iron)

เหล็กหล่อสีขาวจะมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอยู่ประมาณ 1.7% ขึ้นไปและยังมีธาตุที่ผสมอยู่ เช่น กำมะถัน ซิลิกอน แมงกานีส และ ฟอสฟอรัส หากเรานำรอยแตกหักดูจะเห็นเนื้อเหล็กมีเม็ดเกรนสีขาว โดยการเปลี่ยนแปลงสภาวะของเหล็กหล่อชนิดนี้จะเปลี่ยนสถานะหลอมเหลวไปเป็น สถานะของแข็ง จะทำให้คาร์บอนแทรกตัวเข้าไปอยู่ในเนื้อเหล็ก ไม่อยู่อย่างอิสระเหมือนเหล็กหล่อสีดำ แต่จะรวมกับเนื้อเหล็กในรูปของสารประกอบ ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า “เหล็กคาร์ไบด์” หรือทางโลหะวิทยาเรียกลักษณะโครงสร้างแบบนี้ว่า “ซีเมนไทต์” (Cementite) โครงสร้างแบบนี้จะทำให้เหล็กมีคุณสมบัติแข็ง แต่เปราะและแตกหักง่าย รอยหักจะดูเป็นสีขาวเหมือนเนื้อเหล็กทั่ว ๆ ไป จึงเรียกเหล็กหล่อชนิดนี้ว่า “เหล็กหล่อสีขาว” ตามลักษณะที่ปรากฏบนเนื้อของเหล็กหล่อ

#### 2) เหล็กหล่อเทา (Grey cast iron)

เหล็กหล่อชนิดนี้เป็นเหล็กหล่อที่มีส่วนผสม และโครงสร้างใกล้เคียงกับเหล็กดิบ (Pig iron) ที่ถลุงจากเตาสูง (Blast furnace) เหล็กหล่อชนิดนี้เมื่อหักดูเนื้อเหล็กตรงรอยหักจะเห็นเม็ดเกรนเป็นสีเทา แตกต่างกับเหล็กหล่อสีขาวทั้งที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนที่ใกล้เคียงกัน คาร์บอนในเหล็กหล่อเทานี้จะเกิดขึ้นเนื่องจากเย็นตัวเป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้ปริมาณคาร์บอนส่วนใหญ่จะแยกตัวออกมารวมกันในรูปของคาร์บอนบริสุทธิ์เป็นแผ่นหรือเกล็ด (Flakes) ซึ่งเรียกว่า “Graphite” ซึ่งทำให้ดูเป็นสีเทา (แต่ก็ยังมีคาร์บอนบางส่วนรวมตัวในลักษณะสารประกอบในเนื้อเหล็ก (Cementite) เหมือนเหล็กหล่อสีขาว) นอกจากนี้ยังมีธาตุที่ผสมอยู่เช่น ซิลิกอน แมงกานีส ฟอสฟอรัส และ กำมะถัน

#### 3) เหล็กหล่อแกรไฟต์กลม (Spheroid graphite cast iron)

เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนอยู่ประมาณ 3 – 3.5% และยังมีธาตุที่ผสมอยู่ เช่น แมกนีเซียม และ นิเกิล เหล็กหล่อชนิดนี้ได้มาจากเหล็กหล่อเทาอีกทีหนึ่งโดยผสมแมกนีเซียม และนิเกิลลงในน้ำเหล็กก่อนเทลงแบบ ซึ่งจะทำให้แกรไฟต์ (คาร์บอนบริสุทธิ์ที่รวมตัวอยู่ในเนื้อเหล็ก) มีลักษณะเป็นวงกลม (Spheroids) เหล็กหล่อแกรไฟต์กลมต่างกับเหล็กหล่อเทาตรงที่คาร์บอนรวมตัวเป็นแกรไฟต์ในลักษณะกลม (แกรไฟต์ของเหล็กหล่อเทาจะมีลักษณะยาว ๆ) คุณสมบัติที่ได้จึงเหนียวและรับแรงกระแทกได้ดีกว่าเหล็กหล่อเทา จึงเป็นที่นิยมใช้มาก โครงสร้างของเหล็กชนิดนี้ จะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์ (Ferrite) และเพิร์ลไลต์ (Pearlite)

#### 4) เหล็กหล่อ CGI (Compacted graphite)

เหล็กหล่อCGI จะมีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนประมาณ 4.2% และมีธาตุที่ผสมอยู่ เช่น

โลหะแมกนีเซียม และนิเกิล เหล็กหล่อชนิดนี้จะมีเนื้อเม็ดเกรนแตกต่างจากเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม คือ เหล็กหล่อชนิดนี้มีแกรไฟต์เป็นลักษณะคดยาวคล้ายตัวหนอน (Vermicular graphite) และมีความต้านทานแรงดึงได้ดี และการหดตัวต่ำ เหล็กชนิดนี้จะมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างเหล็กหล่อแกรไฟต์กลมกับเหล็กหล่อเทา เหล็กหล่อชนิดนี้จะมีค่าความต้านทานแรงดึงได้ดีกว่าเหล็กหล่อเทา จะอยู่ในเกณฑ์เดียวกับแกรไฟต์ก่อนกลม แต่ความเหนียวจะด้อยกว่า การใช้งาน ใช้ทำเฟือง (Gear) ล้อช่วยแรง (Fly wheel) เบรคดุม (Brake drum) และท่อไอเสีย (Exhaust manifolds)

#### 5) เหล็กหล่ออบเหนียว (Malleable cast Irons)

เหล็กหล่อชนิดนี้สามารถทนต่อแรงดึงได้ดีกว่าเหล็กหล่อเทา และเหล็กหล่อสีขาวแต่น้อยกว่าเหล็กแกรไฟต์กลม นอกจากนี้ยังทนต่อแรงกระแทกได้ดี มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับเหล็กกล้า เหล็กหล่อชนิดนี้ทำจากเหล็กหล่อสีขาวไปผ่านกรรมวิธีอบอ่อน ควบคุมการเย็นตัว ซึ่งจะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป แต่ข้อเสียของเหล็กหล่ออบเหนียวนี้ คือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการอบอ่อนสูงและทำกับชิ้นงานที่มีความหนาได้ไม่เกิน 50 มิลลิเมตร

#### 6) เหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษ (Alloy and special cast iron)

เหล็กหล่อผสมหรือเหล็กหล่อพิเศษเป็นเหล็กหล่อที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เหล็กหล่อชนิดนี้มีอยู่หลายประเภทขึ้นอยู่กับสารหรือโลหะที่ผสมในเนื้อเหล็กหล่อตามลักษณะของการใช้งาน เช่น เหล็กหล่อผสมทนการเสียดสี เหล็กหล่อผสมทนต่อความร้อน และเหล็กหล่อผสมทนต่อการกัดกร่อน เป็นต้น

โดยส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อประเภทต่างๆแสดงดังตารางที่ 2.1 (Silln&Lisall, 1991)

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมทางเคมีของเหล็กหล่อประเภทต่างๆ

| ธาตุผสม/ชนิด | เหล็กหล่อเทา | เหล็กหล่อขาว | เหล็กหล่ออบเหนียว | เหล็กหล่อเหนียว |
|--------------|--------------|--------------|-------------------|-----------------|
| คาร์บอน      | 2.5-4.0 %    | 1.8-3.6 %    | 2.0-2.6 %         | 3.0-4.0 %       |
| ซิลิกอน      | 1.0-3.0 %    | 0.5-1.9 %    | 1.1-1.6 %         | 1.8-2.8 %       |
| แมงกานีส     | 0.25-1.0 %   | 0.25-0.8 %   | 0.2-1.0 %         | 0.10-1.00 %     |
| กำมะถัน      | 0.02-0.25 %  | 0.06-0.20 %  | 0.04-0.18 %       | ≤ 0.03 %        |
| ฟอสฟอรัส     | 0.05-1.0 %   | 0.06-0.18 %  | ≤ 0.18 %          | ≤ 0.10 %        |

1.1.1 เหล็กหล่อเทา

เหล็กหล่อเทานับเป็นวัสดุที่ใช้มากที่สุดและแพร่หลายที่สุด อีกทั้งยังครองส่วนแบ่งตลาดสูงที่สุดในอุตสาหกรรมการหล่อโลหะทั้งหมด เนื่องจากเหล็กหล่อเทามีสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties) ที่ดี มีความเหมาะสมกับประโยชน์การใช้สอยหลากหลายชนิด มีสมบัติที่ดีเลิศในการหล่อหลอมและมีราคาถูก เหล็กหล่อเทาจึงถูกนำมาใช้ผลิตพวกชิ้นส่วนเครื่องจักรกล ชิ้นส่วนรถบรรทุก รถประจำทางและรถแทรกเตอร์ ซึ่งการควบคุมส่วนผสมทางเคมีในการผลิตเหล็กหล่อเทา เพื่อให้ได้สมบัติทางกลที่ดีเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตหล่อเหล็กเทา อย่างไรก็ตามองค์ประกอบอื่นๆในกระบวนการหล่อก็มีอิทธิพลในการผลิตเหล็กหล่อเทาให้ได้โครงสร้างและคุณสมบัติตามต้องการเช่นเดียวกัน

เหล็กหล่อเทามีธาตุผสมหลักที่สำคัญอยู่ 2 ธาตุ คือ คาร์บอนและซิลิกอน ดังนั้นการผลิตเหล็กหล่อเทาในปัจจุบันจึงเน้นที่การควบคุมส่วนผสมทางเคมีของคาร์บอนและซิลิกอนเป็นส่วนใหญ่(มนัส สติรจินดา, 2543) แต่โดยทั่วไปสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทาไม่ได้ขึ้นเฉพาะกับปริมาณของส่วนผสมทางเคมีเท่านั้น ยังขึ้นอยู่กับชนิดและโครงสร้างของแกรไฟต์ในเหล็กหล่อเป็นสำคัญอีกด้วย ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ อาทิ พฤติกรรมการแข็งตัวของน้ำโลหะ อัตราการเย็นตัวของน้ำโลหะระหว่างการแข็งตัวและประสิทธิภาพของการทำอินนอคูลูชันที่แตกต่างกัน ประเภทของเหล็กหล่อเทา สามารถพิจารณาได้จากสมบัติทางกลด้านความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) และความแข็ง (Hardness) ตามมาตรฐานของ JIS G.5501(ศุภชัย ประเสริฐกุล, 2539) ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 มาตรฐานคุณสมบัติทางกลของเหล็กหล่อเทาของ JIS G.5501

| Grade | Tensile Strength (Kg/mm <sup>2</sup> ) | Hardness (HB) |
|-------|----------------------------------------|---------------|
| FC10  | ≥10                                    | 201           |
| FC15  | ≥15                                    | 212           |
| FC20  | ≥20                                    | 223           |
| FC25  | ≥25                                    | 241           |
| FC30  | ≥30                                    | 262           |
| FC35  | ≥35                                    | 277           |

สำหรับการใช้งานเหล็กหล่อเทาในแต่ละเกรดโดยทั่วไป จะแบ่งประเภทดังนี้

FC10- FC15 ใช้ผลิตเป็นชิ้นงานบาง ๆ และมีน้ำหนักไม่มากที่ต้องการคุณสมบัติในการกลึงไสที่ดี ชิ้นงานที่ต้องการผิวละเอียดสวยงาม เช่น วาล์วประกับหน้าแปลน ท่อ ชิ้นส่วนประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้าและโทรคมนาคม แท่นรองผ้าเบรก แหวนลูกสูบ เป็นต้น

FC20- FC25 ใช้ผลิตเครื่องจักรกลทั่วไป เช่น ฐานเครื่อง โต๊ะจับงาน แท่นเครื่อง พูลเลย์ เรือนเครื่องอัดอากาศขนาดเล็ก ฝาสูบ ล้อเบรก เฟลา ลูกเบี้ยว แบร้ง เป็นต้น

FC30 ใช้ผลิตเครื่องจักรขนาดกลาง เช่น เรือนเครื่องอัดอากาศขนาดกลาง แท่นพิมพ์หนังสือ เฟืองขนาดกลาง ชิ้นส่วนรถไฟฟ้า-แม่เหล็ก เป็นต้น

FC35 ใช้ผลิตเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่ต้องการใช้งานกับชิ้นงานที่ขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก เช่น แม่พิมพ์ฉีดและขึ้นรูปโลหะเฟืองขนาดใหญ่ กระบอกสูบที่ต้องทนแรงอัดสูง เป็นต้น

#### 1.1.2 ชนิดของโครงสร้างแกรไฟต์แผ่นในเหล็กหล่อเทา

ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเหล็กหล่อเทา (ชาลิต เชียงกุล, 2542) ได้แก่

1) โครงสร้างเฟอร์ไรต์ (Femite) ดังภาพที่ 2.2 หรือที่รู้จักกันในอีกชื่อหนึ่งว่า Alpha iron เป็นโครงสร้างของเหล็กบริสุทธิ์ หรือเหล็กที่มีปริมาณคาร์บอนต่ำมาก คือปริมาณคาร์บอนต่ำจนเกิดโครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ ธรรมชาติของเฟอร์ไรต์มีคุณสมบัติอ่อน และเนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนผสมต่ำ จึงทำให้ความต้านทานต่อแรงดึงต่ำ แต่มีความเหนียวสูง



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างแบบเฟอร์ไรต์ กำลังขยาย 1,000 เท่า

เฟอร์ไรต์ของเหล็กหล่อที่มีซิลิกอนละลายอยู่ร้อยละ 1-3 จะช่วยปรับปรุงความแข็งแรงและการทนต่อการสึก และเพิ่มความแข็ง ที่สำคัญคือเฟอร์ไรต์เพิ่มความสามารถในการตกแต่งด้วยเครื่องจักร ซึ่งเป็นจุดเด่นที่ทำให้โครงสร้างเฟอร์ไรต์เป็นสิ่งที่ต้องการให้มีในเหล็ก

2) โครงสร้างเพิร์ลไลต์ (Pearlite) ในเหล็กหล่อเทาจะเป็นชั้นเฟอร์ไรต์กับคาร์ไบด์สลับกัน ดังภาพที่ 2.3 จากโครงสร้างนี้จะเห็นว่าเฟอร์ไรต์มีคุณสมบัติอ่อน ขณะที่คาร์ไบด์มีคุณสมบัติที่แข็ง การอยู่สลับกันของชั้นที่อ่อนกับชั้นที่แข็ง จึงทำให้เหล็กนี้มีความแข็งแรงทนต่อแรงดึง และมีความแข็งที่มากกว่าเฟอร์ไรต์ การทนต่อการสึกมีอย่างน้อยเพียงไรขึ้นอยู่กับความละเอียดของชั้นเยื่อที่เชื่อมติดกัน อย่างไรก็ตาม อาจกล่าวสรุปได้ว่า โครงสร้างเพิร์ลไลต์มีความแข็งแรงของเหล็กหล่อเทาก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ในขณะที่เพิร์ลไลต์ยิ่งละเอียด เหล็กยิ่งมีความแข็งแรงมากขึ้น



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างแบบเพิร์ลไลต์กำลังขยาย 1,500 เท่า

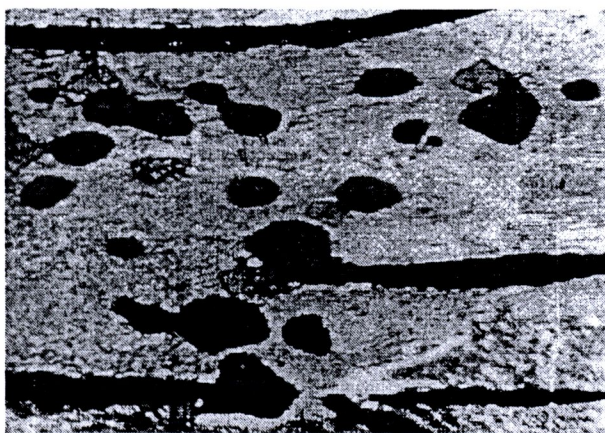
3) ซีเมนไทต์ (Cementite) หรืออีกนัยหนึ่งคือ ยูเทคติกคาร์ไบด์ (Eutectic carbide) มีคุณสมบัติ คือ ทำให้เหล็กแข็ง แต่เพราะ โครงสร้างนี้มักเกิดขึ้นเมื่อปล่อยให้เหล็กที่ทำการหล่อเย็นตัวอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ตามมุม ส่วนบาง ๆ หรือผิวชิ้นงานหล่อมีโอกาสเกิดโครงสร้างนี้ได้ง่าย เหล็กที่มีค่าเทียบเท่าคาร์บอนต่ำ โดยเฉพาะเหล็กที่มีปริมาณซิลิกอนน้อยมักมีโครงสร้างนี้เกิดขึ้น

4) สเตดไดต์ (Steadite) หรือเหล็กฟอสไฟด์ยูเทคติก (Iron-phosphide eutectic) ดังภาพที่ 2.4 โครงสร้างนี้มักพบเมื่อปริมาณฟอสฟอรัสในเหล็กหล่อเทามีมากกว่าร้อยละ 0.02 ละลายในออสเทนไนต์ โดยฟอสฟอรัสรวมตัวกับเหล็กฟอสไฟด์ (Iron phosphate) เป็นเหตุให้มีจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ  $955-982^{\circ}\text{C}$  โครงสร้างนี้ทำให้เหล็กมีคุณสมบัติแข็ง แต่เพราะสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดโครงสร้างนี้คือฟอสฟอรัส ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มการไหลของน้ำโลหะเหลว แต่ลดความแข็งแรงของเหล็กลง หากต้องการให้น้ำโลหะไหลดีและเหล็กหล่อเทาที่ได้มีความแข็งแรงตามต้องการด้วย จะต้องควบคุมปริมาณฟอสฟอรัสให้เหมาะสม อีกทั้งยังต้องให้อุณหภูมิที่เจาะออกจากเตาและอุณหภูมิเทสูงมากขึ้น



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างแบบสเตดไดต์ กำลังขยาย 1,500 เท่า

5) แมงกานีสซัลไฟด์(Manganese sulphide) ดังภาพที่ 2.5 โครงสร้างนี้เกิดจากการเติมแมงกานีสลงไปในเหล็ก เพื่อทำปฏิกิริยากับกำมะถันให้เกิดสภาวะสมดุลได้แมงกานีสซัลไฟด์ ทั้งนี้เพื่อไม่ให้อำมะถันทำปฏิกิริยากับเหล็กซัลไฟด์ ซึ่งมีคุณสมบัติทำให้เหล็กเปราะ และเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างแมงกานีสซัลไฟด์ กำลังขยาย 400 เท่า

โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างของแกรไฟต์แผ่นในเหล็กหล่อเทาสามารถแบ่งออกเป็น 5 ชนิด ตามมาตรฐาน ASTM A247 ดังแสดงในภาพที่ 2.6 ซึ่งลักษณะของ

แกรไฟต์จะมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ (บุญเรือง มานะสุรการ, 2539) ลักษณะของแกรไฟต์ทั้ง 5 ชนิดมีดังนี้

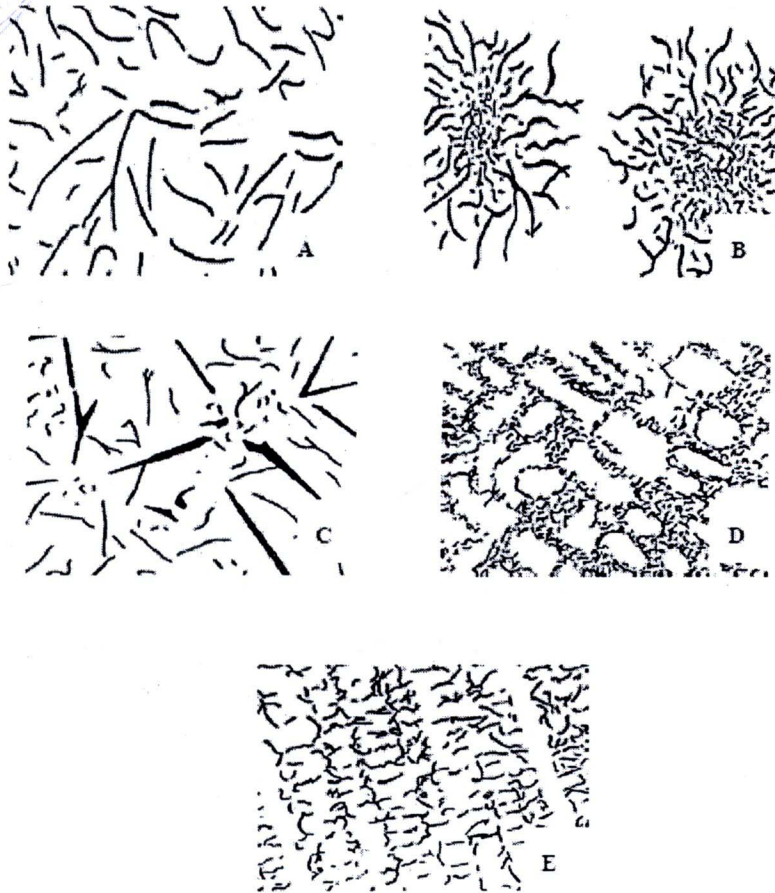
**ชนิด A** เกล็ดแกรไฟต์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ (Random orientation flake type graphite) แกรไฟต์ชนิดนี้ปรากฏในเหล็กหล่อคุณภาพดีพิเศษ โครงสร้างส่วนใหญ่ คือ เฟอร์ไรต์และแกรไฟต์ที่มีขนาดเหมาะสมกระจายอยู่ทั่วไปดังแสดงในภาพที่ 2.6 การที่แกรไฟต์ มีรูปร่างโค้งงอมีส่วนทำให้เหล็กหล่อเทาชนิดนี้มีความแข็งแรงสูง

**ชนิด B** เกล็ดแกรไฟต์กระจายเป็นกลุ่ม แต่ละกลุ่มกระจายออกตามแนวรัศมีคล้ายดอกกุหลาบ (Rosette grouping) การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ แกรไฟต์ชนิดนี้ประกอบด้วยก้อนยูเทกติก (Eutectic cells) ซึ่งมีกลุ่มแกรไฟต์เล็กๆอยู่ตรงกลางและแกรไฟต์ขนาดใหญ่กว่าอยู่รอบๆตามแนวรัศมี แกรไฟต์ชนิดนี้จะมีอยู่หนาแน่นในเหล็กหล่อเทาที่มีปริมาณคาร์บอนสูงหรือบริเวณชิ้นงานหล่อที่มีรูปร่างบางๆ การเกิดแกรไฟต์ชนิดนี้ทำให้ความแข็งแรงของเหล็กหล่อลดลงอย่างมาก

**ชนิด C** เกล็ดแกรไฟต์ทับกัน (Superimposed flakes) การเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ลักษณะของแกรไฟต์คล้ายแบบ A แต่มีขนาดใหญ่กว่า จะเกิดกับเหล็กหล่อที่มีปริมาณคาร์บอนเกิน 4.3 เปอร์เซ็นต์ (Hyper eutectic) คาร์บอนจะอยู่ในภาพเป็นผลึกแกรไฟต์เสียส่วนมาก จึงทำให้โครงสร้างพื้นฐานเป็นเฟอร์ไรต์เสียส่วนใหญ่ และมีคาร์ไบด์หรือซีเมนต์ไทดน้อย การที่ผลึกแกรไฟต์มีลักษณะดังนี้ จะทำให้เหล็กหล่อไม่แข็งแรง

**ชนิด D** เกล็ดแกรไฟต์จะมีลักษณะเป็นกลุ่มคล้ายกิ่งไม้ (Interdendritic segregation) การเรียงตัวจะไม่เป็นระเบียบ แกรไฟต์มีชิ้นเล็กๆ ตกผลึกที่อุณหภูมิยูเทกติก ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าจุดแข็งตัว แต่น้ำเหล็กยังคงหลอมเหลวอยู่ (Super cooling) ผลึกนี้จึงเกิดระหว่างผลึกของออสเตไนต์ที่แข็งตัวอยู่ก่อนแล้วทำให้แกรไฟต์มีรูปคล้ายกิ่งไม้ แกรไฟต์ชนิด D นี้บางครั้งจะเกิดตรงกลางของแกรไฟต์ชนิด B หรือบางครั้งก็ไปเกิดตรงกลางของชิ้นงานหล่อหนาๆที่แข็งตัวหลังส่วนอื่น เหล็กหล่อที่มีแกรไฟต์ชนิดนี้อยู่มักจะมีเฟอร์ไรต์เป็นพื้นทำให้ความแข็งแรงต่ำ

**ชนิด E** เกล็ดแกรไฟต์จะมีลักษณะเป็นกลุ่มคล้ายกิ่งไม้ (Interdendritic segregation) การเรียงตัวมีระบบอยู่บ้าง (Preferred orientation) ลักษณะของแกรไฟต์คล้ายกับชนิด D แต่เป็นระเบียบกว่า จะเกิดเมื่อมีปริมาณคาร์บอนผสมอยู่ค่อนข้างต่ำ มีความแข็งแรงกว่าชนิด D เล็กน้อยเพราะมีคาร์บอนน้อยกว่า แต่ก็ยังมีความแข็งแรงอยู่ในขั้นต่ำเมื่อเทียบกับชนิด A



ภาพที่ 2.6 ชนิดของแกรไฟต์แผ่นตามมาตรฐาน ASTM A247

โดยคุณสมบัติต่างๆของเหล็กหล่อเทาที่ทำให้เป็นที่นิยมนำไปใช้งานได้  
หลากหลาย ได้แก่

- มีความแข็งแรงสูง สามารถกลึงหรือไส ตบแต่งให้ได้ขนาดตามต้องการได้ง่าย
- มีอุณหภูมิหลอมเหลวต่ำและมีความสามารถในการหล่อดี สามารถหล่อหลอมให้ได้รูปร่างซับซ้อนได้ง่าย
- มีอัตราการขยายตัวน้อย สามารถใช้ทำส่วนประกอบเครื่องจักรกลที่ต้องการรูปร่างและขนาดที่แน่นอน
- มีความต้านทานต่อแรงอัดและรับแรงลั่นสะเทือนได้ดี เหมาะสำหรับใช้ทำแท่นรองรับอุปกรณ์เครื่องมือกลต่าง ๆ
- สามารถที่จะปรับปรุงคุณสมบัติความต้านทานแรงดึงได้มาก ขึ้นอยู่กับ การปรับปรุงส่วนผสมและการอบชุบ ทำให้ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ |           |
| ห้องสมุดงานวิจัย                |           |
| วันที่.....                     | พ.ค. 2556 |
| เลขทะเบียน.....                 | 208865    |
| เลขเรียกหนังสือ.....            |           |

### 1.1.3 อิทธิพลของธาตุผสมที่มีผลต่อสมบัติของเหล็กหล่อเทา

แม้ว่าเหล็กหล่อเทามีธาตุผสมหลักคือคาร์บอนและซิลิกอน ยังมีธาตุผสมอื่นๆที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างจุลภาค อิทธิพลของธาตุผสมอื่นๆ สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ช่วยให้แกรไฟต์เสถียร (Graphite stabilizer) ได้แก่ ซิลิกอน ฟอสฟอรัส บิสมีต เซอร์โคเนียม กำมะถัน และประเภทที่ช่วยทำให้คาร์ไบด์เสถียร (Carbide stabilizer) ได้แก่ แมงกานีส โครเมียม ทังสเทน วานาเดียม โมลิบดีนัม ซีเรียม โดยส่วนผสมทางเคมีและโครงสร้างแกรไฟต์ต่างๆเหล่านี้ในเหล็กหล่อจะส่งผลต่อสมบัติทางกลสุดท้าย อาทิเช่น ความต้านทานแรงดึง (Tensile strength) ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรงล้า (Fatigue strength) ของชิ้นงานเหล็กหล่อนั้น

ซิลิกอน เป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดแกรไฟต์ มีความสามารถในการดึงดูด (Affinity) เหล็กสูงกว่าธาตุคาร์บอน จะมีผลร่วมกับคาร์บอนในเทอมของ Carbon Equivalent (C.E.) ซิลิกอนเป็นธาตุที่สามารถละลายได้ในเหล็กในสภาพที่เป็นสารละลายของแข็ง (Solid solution) มีผลทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันก็มีผลทำให้เหล็กหล่อแกรไฟต์กลดสูญเสียความเหนียว โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้เองจึงจำเป็นต้องควบคุมปริมาณของซิลิกอนให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม ซิลิกอนจะลดปัญหาด้านการเกิดคาร์ไบด์ถึงแม้ว่าเหล็กจะเย็นเร็ว โดยซิลิกอนจะแยกตัวสวนทางกับธาตุอื่นๆ จะไปรวมตัวกันปริมาณมากในบริเวณที่ใกล้กับเม็ดแกรไฟต์

นิเกิล เป็นธาตุอยู่ในกลุ่มช่วยให้เกิดแกรไฟต์ (Graphitizing element) มีบทบาทคล้ายคลึงกับซิลิกอนแต่มีผลทำให้เหล็กมีความเหนียวเพิ่มขึ้น และมีผลร่วมกับคาร์บอนในเทอมของ Carbon Equivalent คล้ายคลึงกับซิลิกอนแต่ไม่รุนแรงเท่า อีกทั้งสนับสนุนให้เกิดเฟิร์รไลต์มากขึ้น แต่เฟิร์รไลต์จะแตกตัวได้ง่ายในขณะทำการอบชุบความร้อน นิเกิลมีบทบาทในการช่วยเสริมความสามารถในการชุบแข็งให้กับเหล็ก ทำให้เหล็กมีความแข็งได้ลึก (Through hardenability) และเป็นธาตุที่มีบทบาทช่วยให้ออสเตนไนท์มีเสถียรภาพและทำให้ได้มาร์เทนไซต์ได้ง่ายในขั้นตอนการชุบแข็ง

ทองแดง มีลักษณะคล้ายกับนิเกิลในหลายๆแนวทาง แต่มีบทบาทที่รุนแรงกว่าในด้านที่ช่วยสนับสนุนให้เกิดเฟิร์รไลต์ ที่ปริมาณร้อยละ 1 ของทองแดงที่ผสมในเหล็กหล่อมีผลทำให้ได้โครงสร้างแบบเฟิร์รไลต์ ร้อยละ 100 ซึ่งจะนิยมใช้ทองแดงผสมในการผลิตเหล็กหล่อ นอกจากทองแดงมีผลสนับสนุนให้เกิดเฟิร์รไลต์แล้ว ทองแดงยังมีราคาถูกกว่า แต่สำหรับทางด้านเพิ่มความสามารถในการชุบแข็งทองแดงมีผลไม่มากนัก

ฟอสฟอรัส เป็นธาตุที่ช่วยให้เกิดแกรไฟต์ มีความสามารถในการดึงดูด (Affinity) เหล็กสูงกว่าคาร์บอนจึงมีการรวมตัวกับเหล็กที่อุณหภูมิสูง ทำให้คาร์บอนมีการรวมตัวกันเป็นแกรไฟต์และมีส่วนช่วยให้น้ำโลหะสามารถไหลได้ดี มักใช้ในกรณีที่ต้องการให้น้ำโลหะมีการไหลตัวที่ดีขึ้นในชิ้นงานที่มีความซับซ้อนและมีขนาดบาง เพราะฟอสฟอรัสช่วยลดอุณหภูมิ

ยูเทคติกให้ต่ำลงด้วย โดยจะทำให้เกิดปฏิกิริยา Ternary Eutectic ซึ่งจะเกิดอยู่ตามขอบเกรน เช่นเดียวกับโครงสร้างแบบยูเทคติกที่เรียก Steadite ซึ่งเป็นโครงสร้างที่เปราะ ดังนั้นถ้ามีปริมาณ ฟอสฟอรัสสูงเกินไปจะทำให้เหล็กหล่อขาดสมบัติด้านความเหนียวและเกิดโพรงหดตัว โดยทั่วไป เหล็กหล่อเทามีปริมาณฟอสฟอรัสประมาณ 0.02-0.1 %

ซิลเฟอร์ และ แมงกานีส อัตราส่วนระหว่างแมงกานีสและซิลเฟอร์ต้องเหมาะสมกัน เนื่องจากถ้าในเหล็กหล่อเทามีปริมาณซิลเฟอร์สูงเกินไปจะมีผลต่อการเกิดนิวเคลียสของแกรไฟต์ โดยทั่วไปเหล็กหล่อเทามีปริมาณซิลเฟอร์ประมาณ 0.05-0.12 % และปริมาณแมงกานีสประมาณ 0.4-1.0 %

## 1.2 การออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การออกแบบการทดลอง คือ กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งจำเป็น ถ้าเราต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้ายังปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดในการทดลอง (Experimental error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่จะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งศาสตร์ทั้งสองนี้มีความเกี่ยวข้องเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เพราะว่าวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้อย่างมาก การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีความเข้าใจอย่างแท้จริงว่า เรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บได้นั้นอย่างไร (ปารเมศ ชุตินา, 2545)

คำจำกัดความของคำศัพท์ที่ใช้ในหัวข้อนี้มีดังนี้

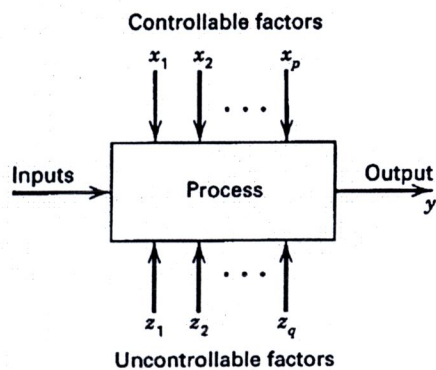
อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรอิสระ (ปัจจัยที่ทราบค่า สามารถกำหนดและเปลี่ยนแปลงได้) ที่มีต่อตัวแปรตาม (คุณลักษณะที่สามารถทราบได้หลังจากการทดลองในแต่ละครั้งหรือค่าที่ต้องการวัด)

ปัจจัย (Factor) หมายถึง คุณสมบัติใดๆ ที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณลักษณะในตัวผลิตภัณฑ์

ระดับของปัจจัย (Level of factor) หมายถึง สภาวะต่างๆ ของปัจจัยหนึ่งๆ ที่ทำการกำหนดในการทดลอง

ปัจจัยรบกวน (Noise factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดผลกระทบเล็กน้อยในการทดลองและไม่สามารถควบคุมได้

การออกแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบว่าปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปร (Input variables) ใดที่มีผลต่อสิ่งที่ทำให้ความสำคัญในผลิตภัณฑ์ที่ออกมา (Output response) ปัจจัยในกระบวนการใด ๆ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด (ดังแสดงในภาพที่ 2.7) ได้แก่



ภาพที่ 2.7 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการ

1) ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการผลิต เช่น การตั้งอุณหภูมิตู้อบความร้อน

2) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นไม่ได้ในการผลิต เช่น ไฟฟ้าดับ ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้สามารถแบ่งได้ ดังนี้

ก) ตัวแปรรบกวน (Noise variable) หมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองในการทดลองแต่ไม่ใช่ปัจจัยที่เราสนใจศึกษา ส่วนใหญ่มักเป็นเวลาหรือเครื่องมืออุปกรณ์

ข) Nuisance variable หมายถึง ตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อนว่าสามารถกำจัดอิทธิพลของตัวแปร Nuisance variable โดยการสุ่ม

ค) ตัวแปรตอบสนอง (Response variable) คือตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง ในการทดลองหนึ่ง อาจมีการวัดตัวแปรตามมากกว่า 1 ค่าได้ การเลือกตัวแปรตามที่ดีควรพิจารณาจากความไว (Sensitivity) ความเชื่อถือได้ (Reliability) การแจกแจงตัวแปรนั้นและความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ในการเลือกตัวแปรตามจะต้องพิจารณาว่าค่าที่สังเกตได้จากทรีทเมนต์หนึ่ง ควรมีการแจกแจงแบบปกติโดยประมาณซึ่งข้อสมมุติในเรื่องความเป็นปกติ (Normality) นี้เป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบการทดลอง ซึ่งอาจจะใช้การแปลงข้อมูลค่าสังเกตที่มีการแจกแจงที่ไม่เป็นปกติให้เป็นปกติได้

#### 1.2.1 ขั้นตอนของการดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนในการดำเนินการทดลอง มีดังนี้

1) การนิยามปัญหา (Recognition and statement of problem) เป็นการ

ระบุความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการเรียนรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปยังวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2) การเลือกปัจจัยและระดับปัจจัย (Choice of factors levels and ranges) เป็นหลักการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์จากงานวิจัยต่างๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรมีช่วงในการทดลองอย่างไร สุดท้ายระบุว่า ระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed effect) แบบสุ่ม (Random) หรือแบบผสม (Mixed effect)

3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of response variable) ในการเลือกทำการวิจัยจะต้องเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่า นั้นจะต้องถูกต้องและแม่นยำด้วย

4) การเลือกแบบการทดลอง (Choice of experimental design) เมื่อกำหนดทรีทเมนต์ และตัวแปรตอบสนองแล้วต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่งหมายถึงจำนวนซ้ำของการทดลอง ความเหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่ม และการบล็อกที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวข้องกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้การทดลองสำหรับการเลือกปัจจัย

5) ดำเนินการทดลอง (Performing the experiment) ในระหว่างดำเนินการทดลองผู้วิจัยต้องศึกษาและดูอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ ข้อควรระวังในขณะทำการทดลองคือความถูกต้องของเครื่องมือวัดและความสม่ำเสมอในการทดลอง เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

6) การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical analysis of data) จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์และสรุปผล รวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้นก่อนที่จะตีความข้อมูลและวิธีการทางสถิติไม่สามารถบอกได้ว่าปัจจัยมีผลเท่าใดแน่นอน แต่ยังเป็นเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผล

7) สรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้วจะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปแบบกราฟ ตาราง แผนภูมิ และการให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการให้ดีขึ้น

### 1.2.2 แนวคิดพื้นฐานในการออกแบบการทดลอง

แนวคิดพื้นฐานของการออกแบบการทดลองประกอบด้วยสิ่งสำคัญดังนี้

1) การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือเทคนิคการจัดหน่วยการทดลองโดยให้แต่ละหน่วยการทดลอง มีโอกาสที่จะได้รับทรีทเมนต์หนึ่งเท่ากัน โดยวัตถุประสงค์ของการทำแบบสุ่มเพื่อขจัดอคติหรือความเอนเอียงของผู้ทดลองและให้แน่ใจว่าทรีทเมนต์ต่างๆ จะไม่มีการโต้เปรียบและเสียเปรียบในเรื่องเกี่ยวกับการทดลอง การสุ่มจึงเป็นการประกันได้ว่าจะไม่มีการอคติใดๆ เกิดขึ้นในการทดลอง สำหรับการวิเคราะห์และทดสอบทางสถิตินั้นมีข้อกำหนดว่าความคลาดเคลื่อนจะเกิดขึ้นโดยสุ่มเป็นอิสระต่อกัน การสุ่มจึงเป็นการทำให้ข้อมูลเป็นไปตาม

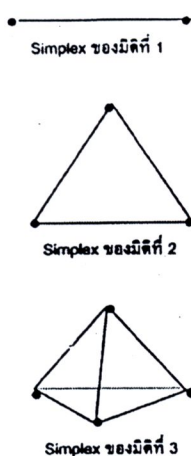
ข้อกำหนด ทั้งนี้การสุ่มจะเป็นการช่วยกำจัดหรือเฉลี่ยความผันแปรภายนอกที่ควบคุมไม่ได้เกิดขึ้นกับหน่วยการทดลองด้วยโอกาสเท่ากัน

2) การทำซ้ำ (Replication) คือ การที่ทรีทเมนต์หนึ่งทำการทดลองมากกว่า 1 ครั้ง โดยมีจุดประสงค์การทำซ้ำ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง และนำค่าความผันแปรภายในกลุ่มนี้มาเป็นตัวทดสอบว่ามีทรีทเมนต์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในทางสถิติหรือไม่ รวมถึงเพิ่มความเที่ยงตรงของการทดลองโดยช่วยลดขนาดของค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานเฉลี่ย

3) การบล็อก (Blocking) คือการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วง เพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

### 1.2.3 วิธีการออกแบบส่วนผสม

งานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการออกแบบส่วนผสม และวิธีพื้นผิวผลตอบสนองมาใช้ในการออกแบบการทดลอง โดยหลักการออกแบบส่วนผสมจะอยู่บนพื้นฐานของอสมฐานแบบซิมเพล็กซ์ (Simplex) (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2547 อ้างจาก Claringbold, 1995) ได้ศึกษากิจกรรมร่วมของฮอร์โมนในการทดลองทางสัตว์ ในทางคณิตศาสตร์อสมฐานซิมเพล็กซ์หนึ่ง ๆ คือเส้น  $n$ -dimensional line กับจุดยอดและพื้นผิว ตัวอย่างเช่น อสมฐานของมิติที่ 1 คือเส้นตรงหนึ่งกับจุดยอด 2 จุด อสมฐานของมิติที่ 2 คือสามเหลี่ยมกับจุดยอด 3 จุด และอสมฐานของมิติที่ 3 คือจตุรมุขหรือรูปทรงกรวยสามเหลี่ยมดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 อสมฐานของซิมเพล็กซ์ (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2547)

การออกแบบส่วนผสมจะได้รับสูตรที่เหมาะสมของส่วนผสมของส่วนประกอบเพื่อสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ การแปลความของผลการทดลองแบบส่วนผสมมีหลายลักษณะคล้ายกับวิธีการตอบสนองพื้นที่ อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลรวมของสัดส่วนสำหรับส่วนประกอบทั้งหมดจะต้องเท่ากับ 1.0 หรือร้อยละ 100 การออกแบบพื้นที่การ

ตอบสนองจึงไม่มีการประยุกต์ใช้ ในตอนแรกของการทดลองจะพิจารณาปัญหาส่วนผสมอย่างง่ายที่ส่วนประกอบทั้งหมดอยู่ในส่วนผสมที่ไม่มีข้อจำกัด สามารถใช้ได้ตั้งแต่ค่า 0 ถึง 1.0 หรือร้อยละ 100 จากสมการของ Cornell (1990) แสดงในสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ดังนี้

$$x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (1)$$

$$\text{และ} \quad \sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1.0 \quad (2)$$

เมื่อ  $x_i$  คือสัดส่วนของส่วนประกอบในส่วนผสม และ  $q$  คือจำนวนของส่วนผสม รูปแบบหรือแบบหุ่นของส่วนผสม (Mixture Model) เนื่องจากมีข้อจำกัดว่า  $\sum x_i = 1$  และรูปแบบของส่วนผสมไม่มีเทอมของค่าคงที่คือ  $\beta_0$  (จุดตัด) และเทอมของกำลังสอง  $\beta_{ij} X_i^2$  (ไพโรจน์ วิริยจารี, 2547 อ้างจาก Scheffe, 1958) รูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการออกแบบการทดลองแบบผสมจะแตกต่างจากรูปแบบทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การถดถอยตามปกติ ดังแสดงในสมการที่ (3) สมการที่ (4) สมการที่ (5) และสมการที่ (6) (Myers & Montgomery, 2002) ซึ่งรูปแบบจำลองส่วนผสมนี้จะแตกต่างจากพหุนามที่ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิวผลตอบสนองตามปกติ เนื่องจากว่ามีข้อจำกัดของ  $\sum x_i = 1$  อยู่

รูปแบบเชิงเส้นตรง (Linear)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i \quad (3)$$

รูปแบบเชิงเส้นโค้ง (Quadratic)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j}^q \beta_{ij} x_i x_j \quad (4)$$

รูปแบบกำลังสามแบบพิเศษ (Special cubic)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (5)$$

รูปแบบกำลังสามแบบเต็ม (Full cubic)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j}^q \delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j) + \sum_{i < j < k} \beta_{ijk} x_i x_j x_k \quad (6)$$

เครื่องหมาย  $E(y)$  แสดงถึงค่าที่คาดหวังของการตอบสนอง การแปลความหมายของเทอมด้านขวามือของสมการรูปแบบเป็นดังนี้  $\beta_i x_i$  คือ การตอบสนองเนื่องจากส่วนประกอบเดี่ยวๆ และ  $\beta_{ij}$  เป็นสัมประสิทธิ์เชิงเส้นตรง  $\beta_{ij} x_i x_j$  คือ การตอบสนองเนื่องจากอิทธิพลร่วมของส่วนผสมคู่ และ  $\delta_{ij}$  เป็นสัมประสิทธิ์เชิงเส้นโค้ง  $\delta_{ij} x_i x_j (x_i - x_j)$  คือ การตอบสนองเนื่องจากอิทธิพลร่วมส่วนผสมคู่ และ  $\delta_{ij}$  เป็นสัมประสิทธิ์ของกำลังสาม  $\beta_{ijk} x_i x_j x_k$  คือ การตอบสนองเนื่องจากอิทธิพลร่วมของส่วนผสม 3 ชนิดสำหรับส่วนประกอบ  $i, j, k$  และ  $\beta_{ijk}$  เป็นสัมประสิทธิ์ของกำลังสาม และเรียกส่วน  $\sum_{i=1}^q \beta_i x_i$  ว่าส่วนผสมเชิงเส้น (Linear blending portion) เมื่อมีส่วนโค้งเกิดขึ้นเนื่องจากส่วนผสมที่ไม่เป็นเชิงเส้นระหว่างคู่ของส่วนประกอบจะมีพารามิเตอร์  $\beta_{ij}$  เกิดขึ้น ซึ่งพารามิเตอร์นี้จะแสดงถึงส่วนผสมที่เป็นอิทธิพลร่วมต่อกัน จากการออกแบบส่วนผสมสามารถแบ่งเป็นแผนการทดลองย่อยได้ดังนี้

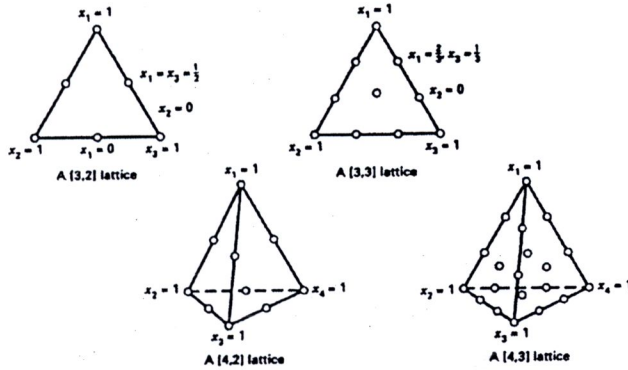
(1) การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ (Simplex-Lattice design) เป็นการออกแบบร่วมสำหรับส่วนผสมในการทดลองสามารถวิเคราะห์โดยใช้สมการที่ (7) ดังนี้

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (7)$$

เมื่อ  $q$  คือจำนวนของส่วนผสมหรือปัจจัย และ  $m$  คือสัดส่วนของแต่ละปัจจัยจาก 0-1 (0-100%) โดยสัดส่วนของแต่ละส่วนผสมจะให้ช่วง  $m + 1$  เท่าๆกันจาก 0 ถึง 1 และจำนวนของจุด ในการทดลองแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์  $\{q, m\}$  ทั้งหมดคำนวณได้จากสมการที่ (8) ดังนี้ (Myers & Montgomery, 2002)

$$N = \frac{(q + m - 1)!}{m!(q - 1)!} \quad (8)$$

สมมติฐานที่ดีของการออกแบบนี้ คือการกระจายของจุดที่มีพื้นที่ในช่วงที่เท่าๆกันในซิมเพล็กซ์ ซึ่งจะให้รูปแบบที่ต้องการและมีจุดที่เพียงพอในการดำเนินการวิเคราะห์โพลิโนเมียลรีเกรสชันดังแสดงในภาพที่ 2.9

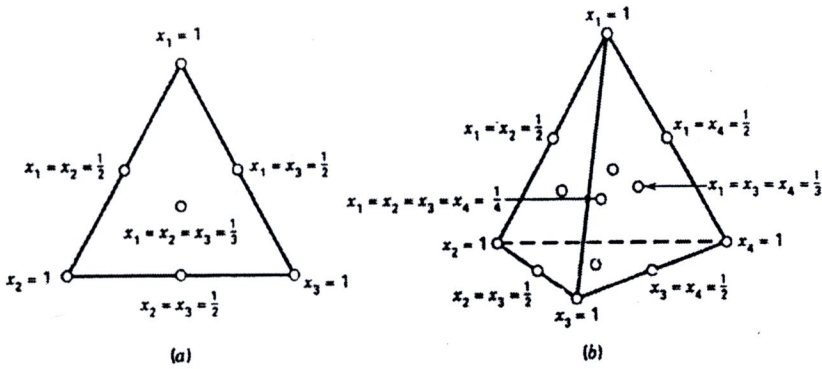


ภาพที่ 2.9 การเรียงตัวของพื้นที่ส่วนผสมของการออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์สำหรับ ส่วนผสม 3 ชนิด และส่วนผสม 4 ชนิด (Myers & Montgomery, 2002)

(2) การออกแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์ (Simplex-Centroid design) เป็นการออกแบบแผนการทดลองที่มีสิ่งทดลองเท่ากับ  $2q + 1$  แต่ละปัจจัยมีสัดส่วนที่เท่ากันทุก ปัจจัย และมีสมการโพลิโนเมียลของการออกแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์ ดังแสดงในสมการที่ (9)

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i < j} \sum_{k=2}^q \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j} \sum_{k < l} \sum_{m=2}^q \beta_{ijkl} x_i x_j x_k x_l + \dots + \beta_{12\dots q} x_1 x_2 \dots x_q \quad (9)$$

สิ่งทดลองประกอบด้วยจุดที่เป็นส่วนผสมเดี่ยว (Pure components) ต่าง ๆ ซึ่งหมายถึงสิ่งทดลองที่มีปัจจัยนั้น 100% หรือเท่ากับ 1.0 และ 0.5, 0.5, 0, ..., 0 เป็นส่วนผสมคู่ (Binary mixture) และ 1/3, 1/3, 1/3, 0, ..., 0 สำหรับส่วนผสม 3 ชนิด (Ternary mixture) และ 1/q, 1/q, 0, ..., 0 สำหรับส่วนผสมที่มี  $q$  รวมกัน ดังแสดงในภาพที่



ภาพที่ 2.10 แผนการทดลองแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์สำหรับ (a) ส่วนผสม 3 ชนิดและ (b) ส่วนผสม 4 ชนิด (Myers & Montgomery, 2002)

(3) การออกแบบส่วนผสมที่มีข้อจำกัดของสัดส่วนที่ใช้ (Constrained mixture design) ในบางสถานะมีความจำเป็นต้องจำกัดระดับของส่วนประกอบในระบบของผสม บางครั้งอาจจะมีเฉพาะขีดจำกัดต่ำหรือสูง และส่วนอื่นๆต้องการทั้งสูงกว่าและต่ำกว่า ในสภาวะแบบนี้การทดลองจะดำเนินการดับพื้นที่ย่อยของซิมเพล็กซ์ สภาวะนี้เรียกว่าการทดลองส่วนผสมที่มีข้อจำกัด (Constrained mixture experiment) จะได้สมการที่ (10) ดังนี้ (Cornell, 1990)

$$0 \leq L_i \leq x_i \leq U_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (10)$$

เมื่อ  $L_i$  เป็นขีดจำกัดต่ำของส่วนที่  $i$  และ  $U_i$  เป็นขีดจำกัดสูงของส่วนที่  $i$  กล่าวคือแผนการทดลองแบบนี้ ระดับในแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องเป็น 0-100% โดยอาจเป็น 20-30% (0.20-0.30) หรือ 10-25% (0.10-0.25) เป็นต้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากความจำเป็นโดยพื้นฐานในการทดลองบางอย่างโดยให้สังเกตว่าปริมาณขั้นต่ำของส่วนผสมรวมกัน ต้องไม่เกินหรือเท่ากับ 100% อย่างเด็ดขาด ไมเช่นนั้นจะมีเพียงส่วนผสมเดียวที่เป็นไปได้ หรือไม่มีส่วนผสมใดที่เป็นไปได้เลย

ในบางกรณีปัญหาของส่วนผสมบางอย่างจะมีข้อจำกัดเกี่ยวกับส่วนประกอบบางตัวเกิดขึ้น ซึ่งพบว่าจำเป็นต้องมีการกำหนดขีดจำกัดต่ำที่สุดที่เป็นไปได้ให้แก่ส่วนผสมบางตัว อาจเนื่องมาจากเหตุผลของการทำปฏิกิริยาในกรณีที่เป็นสารเคมี เหตุผลด้านการลดต้นทุนหรือเหตุผลอื่นๆที่อยู่ในรูปของสมการที่ (11)

$$L_i \leq x_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (11)$$

โดยที่  $L_i$  แทนขีดจำกัดต่ำของส่วนที่  $i$  ซึ่งหมายถึงปริมาณน้อยที่สุดที่ยอมให้มีได้ของส่วนผสมนั้น ๆ เมื่อมีเฉพาะข้อจำกัดของขีดจำกัดล่างเพียงอย่างเดียวของส่วนผสม ดังนั้นบริเวณที่เป็นไปได้ของการออกแบบก็ยังคงเป็นซิมเพล็กซ์ หมายความว่า การออกแบบโครงตาข่ายอย่างง่ายยังสามารถนำมาใช้งานได้ เพียงแต่ต้องมีการใส่อะไรบางอย่างเข้าไปในซิมเพล็กซ์เดิม โดยเป็นปรับตัวเลขอาศัยวิธีการเทียบบัญญัติไตรยางค์ให้มีส่วนประกอบรวมได้ 100 % เพื่อให้ค่าขีดจำกัดสอดคล้องกับการนำไปผสมจริง จึงเรียกส่วนผสมที่ใส่ลงไปในซิมเพล็กซ์เดิมนี้อาเป็นส่วนผสมเทียม (Pseudo components) และเรียกส่วนผสมที่รวมได้ 100% ว่าส่วนผสมจริง (Real components or Original components) ตามสมการที่ (12)

$$x_i' = \frac{x_i - L_i}{\left(1 - \sum_{j=1}^q L_j\right)} \quad (12)$$

โดยที่

$$\sum_{j=1}^q L_j > 1 \text{ และ } x_1' + x_2' + \dots + x_q' = 1$$

การกำหนดส่วนผสมเทียมก็เพื่อให้ผู้ทำการทดลองทราบตำแหน่งของจุดทดลองบนโครงตาข่ายอย่างง่าย และสามารถกระจายการเลือกจุดได้อย่างทั่วถึง ส่วนการกำหนดส่วนผสมจริงนั้นเพื่ออำนวยความสะดวกในการผลิตหรือทดลองผสมเนื่องจากแปลงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ในทันที และสูตรที่กำหนดโดยการออกแบบซิมเพล็กซ์สำหรับส่วนผสมเทียมจะถูกแบ่งไปเป็นสูตรสำหรับส่วนผสมดั้งเดิมโดยการแปลงกลับสมการที่ (12) ดังนั้นส่วนผสมดั้งเดิมแสดงได้ดังสมการที่ (13)

$$x_i = L_i + \left(1 - \sum_{j=1}^q L_j\right) x_i' \quad (13)$$

บางครั้งการผสมส่วนประกอบที่มีอันตรายมากหรือมีราคาต้นทุนที่สูง จำเป็นต้องกำหนดระดับว่ามีให้ใช้เกินค่าที่กำหนดไว้ และจะใช้สมการที่ (14)

$$1 \leq x_i \leq U_i \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (14)$$

โดยที่  $U_i$  แทนขีดจำกัดสูงของส่วนที่  $i$  ซึ่งหมายถึงปริมาณมากที่สุดที่ยอมให้มีได้ในส่วนผสม การระบุเช่นนี้เท่ากับเป็นการมีขีดจำกัดบน หมายความว่าผู้ทำการทดลองอาจไม่ใส่ส่วนผสมนั้น ๆ เลยหรือจะใส่เท่าใดก็ได้ แต่ต้องไม่มากกว่าระดับที่กำหนดไว้ ดังนั้นบริเวณที่เป็นไปได้ของการออกแบบก็ยังคงเป็นซิมเพล็กซ์ เพียงแต่เป็นซิมเพล็กซ์ที่กลับหัวลงเรียกว่าการออกแบบโครงตาข่ายอย่างง่ายแบบกลับหัว (Inverted Simplex-Lattice design) ดังนั้นการออกแบบโครงตาข่ายอย่างง่ายจึงยังคงสามารถนำมาใช้ได้ แต่ต้องมีการปรับตัวเลข เช่นเดียวกับการมีขีดจำกัดล่างเพียงอย่างเดียว

ปกติเวลาทำการออกแบบการทดลอง จะเลือกปัจจัยหรือตัวแปรที่ต้องการทดลอง แล้วเลือกรูปแบบของการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม จากนั้นก็จะดำเนินการทดลอง แต่ถ้าหากเกิดปัญหาติดเรื่องวิธีการที่ต้องใช้ในการทดลองมีจำกัดไม่ถึงระดับของตัวแปรที่ออกแบบไว้ หรือความสามารถของกลไกไม่เอื้ออำนวย หรือติดเรื่องอื่น ๆ จนทำให้ไม่สามารถดำเนินการทดลองได้จริงตามระดับของตัวแปรในรูปแบบการทดลองที่เลือกไว้ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ระดับของตัวแปรตามเท่าที่มีในการทดลอง แต่ผลคือมันทำให้การทดลองเสียความเป็นออร์ทोगอนอล (Orthogonal) ไปทำให้ผลการทดลองที่ได้มีความผิดพลาดสูง

จึงได้มีการคิดหารูปแบบการทดลองภายใต้ข้อจำกัดขึ้นเรียกว่าการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมที่สุด (Optimal design) ซึ่งสามารถประยุกต์ได้กับทุก ๆ รูปแบบการทดลอง เช่น วิธีแฟคทอเรียล วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง และวิธีการออกแบบส่วนผสม เป็นต้น โดยเทคนิคการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมเป็นการลดความผิดพลาดจากแผนการทดลองที่เสียสมดุลและออร์ทोगอนอลลงได้ระดับหนึ่งแต่ไม่ได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงต้องมีการประเมินรูปแบบการทดลองค่าองศาอิสระของทั้ง Lack of fit และค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) จากการใช้รูปแบบการทดลองนั้น ๆ ก่อน แต่ที่นิยมนำมาพิจารณาโดยรวมคือการใช้ค่าดีเทอร์มิแนนท์ (Determinant) ของเมตริกซ์ของค่า  $X$  ทั้งหมดในการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม จึงเรียกว่าการทำการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมแบบใช้ค่าดีเทอร์มิแนนท์ในการประเมินว่าการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal (D-optimal design) เป็นรูปแบบการทดลองที่ให้ค่าดีเทอร์มิแนนท์ที่มากที่สุดของ  $X'X$  หรือดีเทอร์มิแนนท์ที่น้อยที่สุดของอินเวอร์ส  $X'X$  และสามารถประยุกต์ใช้หลักการการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมใน 2 กรณีดังต่อไปนี้

(1) กรณีเกิดข้อจำกัดในการทดลอง อาทิเช่น วัสดุที่ใช้ในการทดลองมีราคาแพงมาก ทำให้ปรับระดับของตัวแปรของปัจจัยได้ไม่ถึงตามรูปแบบของการทดลองที่กำหนด หรือติดในเรื่องของเทคนิคที่ใช้ในกระบวนการ เช่น หากปรับปัจจัยนี้ไปที่ระดับของตัวแปรที่กำหนด มีผลทำให้ต้องจำกัดการปรับระดับของตัวแปรของอีกปัจจัยหนึ่ง

(2) กรณีต้องการลดจำนวนหน่วยการทดลอง เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องของต้นทุนการทดลอง เช่น การวิเคราะห์หาพื้นผิวผลตอบสนองจะต้องใช้ผลจากการทดลองเป็นจำนวนมาก เพื่อไปสร้างสมการคำตอบให้เหมาะสมตามรูปแบบของวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง

อาจเป็นรูปแบบเชิงเส้นโค้งหรือรูปแบบกำลังสาม ซึ่งก็ต้องใช้วัตถุดิบในการดำเนินการแต่ละการทดลองมาก และหากตัดทิ้งไปก็จะทำให้เสียสมดุลได้

ในการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal การสุ่มของโปรแกรมจะไม่สามารถสุ่มเอาทุก ๆ จุดการทดลองทั้งหมดในการออกแบบที่ระบุไว้มาทดลองประเมินได้ มันจะใช้ อัลกอริทึมในการแลกเปลี่ยน (Exchange algorithm) เพื่อวิ่งไปบนจุดหลักต่างๆ ในการออกแบบที่ระบุไว้ เช่น จุดกึ่งกลางแกนของรูปแบบกำลังสาม (Center edge) จุดมุม (Vertices) และจุดภายในของรูปแบบกำลังสาม (Interior) หรือจุดหลักอื่นๆ เป็นต้น เพื่อดูว่าค่าดีเทอร์มิแนนท์ของ  $X'X$  มีแนวโน้มจะมากที่สุดหรือไม่ หากพบแล้วหรือครบตามจำนวนรอบที่กำหนด โปรแกรมก็จะหยุดการสุ่มแล้วเอาจุดทดลอง (Candidate point) ที่ได้มาสร้างเป็นรูปแบบการทดลอง หลังจากนั้นหากต้องการปรับเปลี่ยนจุดหลักอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นการลดหรือเพิ่มในจุดทดลองก็สามารถทำได้ วิธีการเช่นนี้เรียกว่าการปรับปรุง (Modification) หลักการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม

#### 1.2.4 วิธีพื้นผิวผลตอบแทน

หลักการที่ใช้ในการออกแบบการทดลองอีกวิธีหนึ่ง คือ วิธีพื้นผิวผลตอบแทน (อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, 2545 อ้างจาก Montgomery, 1991) เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างตัวแบบจำลอง และวิเคราะห์ปัญหาซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น เช่น นักวิศวกรรมอาหารอาจสนใจศึกษาระดับอุณหภูมิ ( $x_1$ ) และความดัน ( $x_2$ ) เพื่อให้กระบวนการผลิตมีปริมาณผลผลิตมากที่สุด ดังนั้นผลผลิตที่ได้เป็นฟังก์ชันของระดับอุณหภูมิและความดันแสดงในสมการที่ (15) ดังนี้

$$Y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (15)$$

$\varepsilon$  ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในค่าสังเกต  $Y$  และหากแสดงค่าคาดหวังของการตอบสนองเป็น  $E(Y) = f(x_1, x_2) = \eta$  แล้วพื้นผิวสามารถแสดงในสมการที่ (16) ได้ดังนี้

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (16)$$

เรียกว่าผลตอบแทนแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface) การนำค่า  $\eta$  มาพล็อตกับระดับของตัวแปร  $x_1$  และ  $x_2$  แสดงผลตอบแทนแบบโครงร่างพื้นผิว อย่างไรก็ตามในการศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวนั้นจำเป็นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามหรือค่าตอบสนองต่อตัวแปรอิสระต่างๆ เป็นอันดับแรก การค้นหาฟังก์ชันต่างๆ เหล่านี้มักใช้ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (Polynomial) อันดับต้นๆ

เช่น อันดับหนึ่งหรือกำลังหนึ่ง (First order) อันดับสองหรือกำลังสอง (Second order) เป็นต้น โดยทั่วไปฟังก์ชันซึ่งประมาณความสัมพันธ์แบบกำลังหนึ่งมีแบบจำลองแสดงในสมการที่ (17) ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (17)$$

สมการรูปแบบนี้เรียกว่า แบบจำลองการถดถอยแบบเชิงเส้นพหุคูณที่มีตัวแปรถดถอย  $k$  ตัว และ  $\beta_j = 0, 1, 2, \dots, k$  ถูกเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ซึ่งก็คือพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าที่ต้องถูกประมาณ และ  $\varepsilon$  คือความคลาดเคลื่อนสุ่ม

สำหรับระบบมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้งต้องใช้โพลีโนเมียลที่มีอันดับสูงขึ้น เช่น อันดับสองหรือกำลังสองซึ่งมีแบบจำลองแสดงในสมการที่ (18) ดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (18)$$

#### 1.2.5 การวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน

บางครั้งจุดที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองอาจไม่เป็นจุดที่ดีที่สุด โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตที่มีผลตอบสนองมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับของปัจจัยหรือตัวแปร บางกระบวนการผลิตต้องให้ความระมัดระวังในการปรับระดับของปัจจัย เพื่อให้เกิดผลกระทบต่อความผันแปรในผลตอบสนองน้อยที่สุด กระบวนการที่มีค่าผลตอบสนองเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีการปรับระดับของปัจจัยเล็กน้อย จะทำให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น จุดที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าผลตอบสนองสูงสุดมีโอกาสดังลงเหวได้ ถ้ามีความผันแปรเกิดขึ้นที่จุดนั้น การหาจุดที่เหมาะสม ณ ตำแหน่งอื่นที่ทำให้ค่าผลตอบสนองไม่ดังลงเหวหรือมีความราบเรียบของพื้นผิวผลตอบสนอง เป็นสิ่งที่ทำให้กระบวนการผลิตหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความผันแปรน้อยที่สุด โดยจุดที่เหมาะสมนั้นไม่จำเป็นต้องเป็นจุดสูงสุด การวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมในลักษณะนี้สามารถดำเนินการได้โดยการวิเคราะห์การแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (Propagation of error, POE) (ชาญณรงค์ สายแก้ว, 2553)

การคำนวณการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (19) โดยกำหนดให้  $\text{Var}(y)$  คือความแปรปรวนของผลตอบสนอง  $\sigma_e^2$  คือ ความแปรปรวนจากการทดลอง  $\sigma_{xi}^2$  คือความแปรปรวนระดับของปัจจัย ค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อน (POE) คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความแปรปรวนของผลตอบสนอง นั่นคือ

$$POE = \sqrt{\text{Var}(y)} \quad (19)$$

คำนวณค่าความแปรปรวนของผลตอบจากสมการที่ (20) ดังนี้

$$\text{Var}(y) = \nabla^T \Sigma \nabla + \sigma_e^2 \quad (20)$$

โดยที่

$$\nabla = \begin{pmatrix} \frac{\partial y}{\partial x_1} \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial y}{\partial x_k} \end{pmatrix}$$

ซึ่งค่าความแปรปรวนของผลตอบสนองจะเป็น

$$\text{Var}(y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial y}{\partial x_1} & \frac{\partial y}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial y}{\partial x_k} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_{22}^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma_{kk}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial y}{\partial x_1} \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} \\ \vdots \\ \frac{\partial y}{\partial x_k} \end{pmatrix} + \sigma_e^2$$

นั่นคือ

$$\text{Var}(y) = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{11}^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{22}^2 + \cdots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_k}\right)^2 \sigma_{kk}^2 + \sigma_e^2$$

การคำนวณค่าการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนซึ่งจะถูกนำมาพล็อตพื้นผิวผลตอบสนองแบบเส้นโครงร่างและแบบสามมิติของการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนโดยพื้นผิวผลตอบสนองแบบสามมิติบริเวณที่แบนที่สุดหรือราบที่สุดจะเป็นบริเวณที่มีการแพร่กระจายความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

#### 1.2.6 วิเคราะห์ผลโดยใช้หลักการทางสถิติ

การนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ทำการทดลองไว้เพื่อช่วยในการหาข้อสรุปที่เกิดขึ้นว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่โดยต้องมีการ

หาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่สุด (Optimal operating condition) ของปัจจัยที่มีผลต่อผลตอบสนองในกรณีที่มีผลตอบสนองมากกว่า 1 ตัว มีด้วยกันหลายวิธี เช่น การใช้สมการทางคณิตศาสตร์ (จำนวนนับ) หรือการใช้โครงร่างพื้นผิวผลตอบ (Contour plot) โดยทั่วไปวิธีดังกล่าวจะมีข้อจำกัดในเรื่องของผลตอบสนอง ซึ่งจะต้องมีผลตอบสนองไม่กี่ตัว และในกรณีที่มีปัจจัยที่ต้องการศึกษามากกว่าสองตัว เส้นโครงร่างจะไม่สามารถแสดงผลพร้อมกันได้เนื่องจากมีลักษณะเป็นสองมิติ ฟังก์ชันความต้องการ (Desirability function) เป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ย่างและนิยมใช้กันมาก (Myers & Montgomery, 2002) ซึ่งฟังก์ชันความต้องการนี้เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดในการที่มีผลตอบสนองหลายตัว (Multi-response optimization) ที่สะท้อนให้เห็นถึงระดับของผลตอบสนองแต่ละตัวในเทอมของผลตอบสนองที่น้อยที่สุด (แสดงค่าเป็น 0) ไปถึงผลตอบสนองที่มากที่สุด (แสดงค่าเป็น 1)

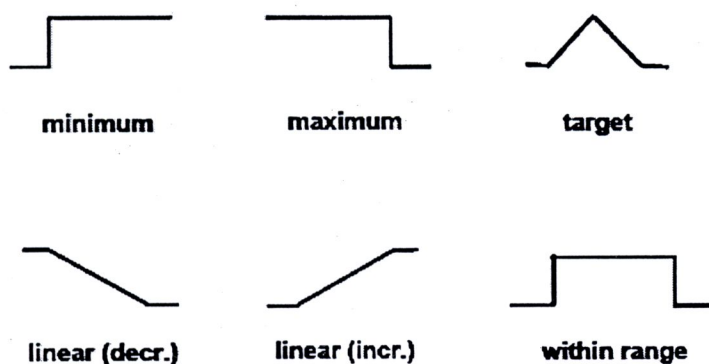
หลักการพื้นฐานของฟังก์ชันความต้องการ คือการแปลงผลตอบสนองหลายตัวให้เป็นผลตอบสนองเพียง 1 ตัว โดยจะทำการแปลงค่าผลตอบสนองแต่ละตัว ( $y_i$ ) ให้เป็นค่าฟังก์ชันความต้องการเดี่ยว (Individual desirability function:  $d_i$ ) และทำการแปลงค่าฟังก์ชันความต้องการเป็นฟังก์ชันความต้องการรวม (Overall desirability function:  $D$ ) แล้วจึงทำการหาค่าที่ดีที่สุดของ  $D$  ดังสมการที่ (21)

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{\frac{1}{n}} \quad (21)$$

เมื่อ  $D$  คือค่าฟังก์ชันความต้องการรวม,  $d$  คือฟังก์ชันความต้องการเดี่ยว และ  $n$  คือจำนวนผลตอบสนอง และเมื่อเพิ่มค่าเฉลี่ยน้ำหนักของฟังก์ชันความต้องการจะได้ดังสมการสมการที่ (22)

$$D = (w_1 \times d_1 + w_2 \times d_2 + \dots + w_n \times d_n)^{\frac{1}{n}} \quad (22)$$

เมื่อ  $w_i$  คือค่าน้ำหนักของฟังก์ชันความต้องการเดี่ยวในช่วงจาก 0 ถึง 1 โดยค่าที่ตรงตามความต้องการมากที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 1 และค่าที่มีความต้องการน้อยที่สุดจะมีค่าเท่ากับ 0 ในการแปลงค่าจากผลตอบสนองแต่ละตัวให้เป็นค่าฟังก์ชันความต้องการเดี่ยวนั้นมีวัตถุประสงค์ 3 ประการคือต้องการให้ได้ค่าที่มากที่สุด (Maximization) ต้องการค่าน้อยที่สุด (Minimization) และต้องการให้ได้ค่าตามที่กำหนด (Meeting the target) ซึ่งค่าฟังก์ชันความต้องการเดี่ยวสามารถกำหนดได้ดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 ตัวอย่างของฟังก์ชันความต้องการ (Simon, 2003)

### 1.2.7 สมมติฐานทางสถิติ (Statistical Hypothesis)

ในการวิเคราะห์หาตัวแบบความสัมพันธ์ของปัจจัย และผลตอบสนอง ชนิดพหุคูณค่าประมาณสัมประสิทธิ์ควรได้รับการทดสอบสมมติฐาน เพื่อวัดความเหมาะสมของ ตัวแบบโดยหลักการในการทดสอบสามารถปรับปรุงได้จากกรณีความสัมพันธ์เชิงเส้นเชิงเดียว โดยมีข้อสมมติฐานคือ ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการสังเกตและตัวแบบความสัมพันธ์มีการ แจกแจงแบบปกติ(Normal distribution) ค่าความผิดพลาดมีความเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ย เท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนคงที่ (Variance stability) นั่นคือ ต้องมีการตรวจสอบความ ถูกต้องของรูปแบบ (Model adequacy checking)

การทดสอบความสัมพันธ์หรือความถดถอย เพื่อพิจารณาความมี นัยสำคัญทางสถิติของความสัมพันธ์ที่ได้รับจากตัวแบบ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับลักษณะของ ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นจริงระหว่างผลตอบสนอง (Y) และปัจจัยความสัมพันธ์ ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) ซึ่ง สมมติฐานที่เกี่ยวข้องตามสมการที่ (23) และสมการที่ (24) ดังนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad (23)$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \text{ อย่างน้อยหนึ่งค่า} \quad (24)$$

หากสมมติฐานหลักไม่สามารถปฏิเสธได้ หรือเป็นจริงสามารถบ่งชี้ได้ว่า สัมประสิทธิ์ของตัวแปรนั้น ๆ สามารถตัดทิ้งออกจากตัวแบบความสัมพันธ์ที่ได้รับก่อนหน้านี้ โดย มีข้อสมมติของความแตกต่างระหว่างค่าสังเกตและค่าพยากรณ์จากตัวแบบ หรือค่าความผิดพลาด ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการทดลองเหมือนเช่นเดิมหรือกล่าวคือ ข้อมูลความผิดพลาดมีการแจกแจง แบบปกติ และเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนคงที่

### 1.2.8 การจำลองแบบปัญหาด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเศรษฐศาสตร์ ใช้ในการวิเคราะห์ต้นทุนที่ได้จากการปรับปรุงกระบวนการ โดยใช้การจำลองสถานการณ์ ซึ่งตัวแบบการจำลองสถานการณ์เป็นตัวแทนเชิงปริมาณที่มีความยืดหยุ่นสูง สามารถสร้างให้เข้ากับสภาพปัญหาทุกรูปแบบ โดยใช้หลักการทางสถิติจำลองสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต ใช้ในการศึกษาและวิเคราะห์สภาพการดำเนินงาน คาดการณ์สิ่งที่จะเกิดในอนาคต ประเมินผลของทางเลือกต่าง ๆ ช่วยให้สามารถวางแผน แก้ปัญหา และตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยวิธีการสุ่มตัวอย่างด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo sampling technique) และเพื่อที่จะเน้นถึงความจำเป็นในการใช้เทคนิคดังกล่าว การจำลองแบบปัญหาจึงถูกเรียกว่า การจำลองแบบปัญหาด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล (Monte Carlo Simulation)

การจำลองแบบปัญหาด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล เป็นจำลองสถานการณ์ (Simulation) ที่ใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่างหรือที่เรียกว่าตัวเลขสุ่มขึ้นมา และสร้างความน่าจะเป็นที่เหมาะสม ตัวเลขสุ่มที่ใช้อาจได้จากตารางตัวเลขสุ่ม (Random numbers table) ส่วนค่าความน่าจะเป็นสะสมคือค่าความน่าจะเป็นสะสมของข้อมูลที่ต้องการอาจได้มาจากข้อมูลในอดีตหรือการทดลอง หรือจากลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็น ซึ่งมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

- (1) สร้างตารางการกระจายของความน่าจะเป็นของข้อมูล (Probability distribution)
  - (2) สร้างตารางการกระจายของความน่าจะเป็นสะสม สำหรับแต่ละตัวแปรที่กำหนด
  - (3) กำหนดช่วงตัวเลขสุ่ม (Random number: R)
  - (4) คำนวณค่าตัวเลขสุ่มจากตารางตัวเลขสุ่มหรือจากคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถเลือกแถวหรือคอลัมน์ใดก็ได้ แต่ต้องเป็นระบบเดียวกัน
  - (5) สร้างตัวแบบจำลองสถานการณ์ ให้เข้ากับปัญหาตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้
  - (6) ทดสอบตัวแบบจำลองสถานการณ์ที่สร้างขึ้น ว่าได้ผลตามเป้าหมายที่วางไว้หรือไม่
  - (7) เมื่อผลการทดสอบเป็นไปตามเป้าหมาย จะกำหนดจำนวนครั้งในการจำลองสถานการณ์
  - (8) ทำการจำลองสถานการณ์เพื่อหาผลเฉลี่ยที่ต้องการ
- การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ จึงได้มีการประยุกต์ตัวแบบจำลองสถานการณ์ในลักษณะปัญหาปริมาณการผลิต เพื่อหาว่าอัตราส่วนผสมใดที่มีคุณภาพและมีต้นทุนที่เหมาะสมที่สุด เพื่อเป็นทางเลือกในการตัดสินใจต่อไป

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเหล็กหล่อที่ใช้ในการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเหล็กหล่อที่ใช้ในการวิจัย จะเป็นการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปรับปรุงคุณภาพของเหล็กหล่อ ทั้งทางด้านสมบัติเชิงกล องค์ประกอบของธาตุทางเคมี รวมทั้งการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค ซึ่งจะได้นำมาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานของผู้วิจัยต่อไป ในตอนแรกจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการอินนอคคูเลชั่น คือ กระบวนการเติมสารอินนอคคูแลนท์ลงไปในน้ำโลหะ เพื่อให้มีการตกผลึกของนิวเคลียสขึ้นในน้ำโลหะ ถ้ามีการตกผลึกของนิวเคลียสไม่เพียงพอจะมีผลต่อการแข็งตัวของน้ำโลหะ ซึ่งในกรณีของเหล็กหล่อนั้นในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะเหล็กหล่อ อะตอมคาร์บอนจะรวมตัวกันตกผลึกออกมาในน้ำโลหะระหว่างการแข็งตัว ดังนั้น ถ้าหากจำนวนในการตกผลึกของอะตอมคาร์บอนมีปริมาณน้อยและไม่เพียงพอ ก็จะส่งผลต่อการแข็งตัวของน้ำโลหะ โดย Patterson & Lalich (1987) ได้กล่าวว่า การทำงานของอินนอคคูแลนท์เป็นวิธีการควบคุมโครงสร้างจุลภาค และสมบัติเชิงกลซึ่งสามารถทำได้ทั้งเหล็กหล่อเทาและเหล็กหล่อเหนียวโดยการทำให้เกิด Undercooling ให้น้อยที่สุด ส่วน Haque & Young (1995) ได้ทำการศึกษากการควบคุมส่วนผสมของการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม โดยใช้เทคนิคการหลอม และมีการทำอินนอคคูเลชั่น พบว่า จะมีแนวโน้มของการได้เม็ดแกรไฟต์ที่กลมสูงขึ้นด้วย การควบคุมเคมีของเหล็ก การผสมแมกนีเซียม และการเสื่อมสลายของแมกนีเซียมทุกขั้นตอนในการทำงานล้วนเป็นขั้นตอนที่สำคัญในขบวนการผลิตเหล็กหล่อ แต่ทุกขั้นดังกล่าวจะมาจากที่การทำอินนอคคูเลชั่นที่ดี จึงจะได้ผลต่อคุณภาพของเหล็กหล่อตรงตามที่ต้องการ สามารถจะกล่าวได้ว่าการอินนอคคูเลชั่นมีความจำเป็นที่ต้องกระทำเพราะเหล็กหล่อจะมีแนวโน้มเกิดคาร์ไบด์ (Chilling tendency) ได้ง่าย เพราะเหล็กหล่อนก่อนการผสมแมกนีเซียมเป็นเหล็กที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เมื่อทำการผสมแมกนีเซียม และ ซีเรียม ซึ่งทั้งสองธาตุมีส่วนทำให้เหล็กมีการเย็นตัวที่เร็ว (Undercooling) การทำอินนอคคูเลชั่นจะช่วยเพิ่มปริมาณนิวเคลียสให้แกรไฟต์ได้มากและมีส่วนช่วยลดค่า Undercooling ที่จะเกิดคาร์ไบด์โอกาสที่จะเกิดคาร์ไบด์จึงเป็นไปได้ยาก และ Davis (1996) กล่าวว่า โดยทั่วไปการเติมสารอินนอคคูแลนท์ในเหล็กหล่อเทามักจะเติมจากเบ้าเท โดยเติมพร้อมกับสายน้ำเหล็กจะทำให้เกิดการกระจายตัวในน้ำเหล็กได้อย่างทั่วถึง แต่ไม่ค่อยนิยมทำกันนักเพราะอาจจะทำให้เกิดการหลอม (Sintering) และลดประสิทธิภาพของสารอินนอคคูแลนท์ และ Karsay (1975) กล่าวเกี่ยวกับสารอินนอคคูแลนท์ว่าโดยส่วนใหญ่ มักใช้ชนิดเฟอร์โรซิลิกอน แต่สามารถใช้ธาตุอื่นได้เช่น Ca, Ba, Al, Sr และ B ซึ่งจะทำให้การเกิดฟอร์มของออกไซด์มากกว่า  $\text{SiO}_2$  โดยแต่ละธาตุจะให้หน่วยยูเทคติกไม่เท่ากัน

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับทางด้านสมบัติเชิงกล องค์ประกอบของธาตุทางเคมีรวมทั้งการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของเหล็กหล่อ ซึ่ง เรวี่ณน์ เหล่าไพบุลย์(2542)ได้ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อจากโรงงาน เพื่อปรับปรุงเหล็กหล่อให้มีคุณภาพได้มาตรฐานอุตสาหกรรม ตลอดจนการนำเหล็กหล่อที่ผลิตได้ไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อ พบว่า มีเม็ดแกรไฟต์ 5 ประเภท คือ

A, B, C, D และ E ปั่นกันอยู่และมีโครงสร้างประกอบไปด้วย เกล็ดแกรไฟต์ เฟอร์ไรท์อิสระและ เหล็กฟอสไฟต์ มีธาตุผสมอยู่ 4.20%C, 3.3%Si, 0.305%P และ 0.70%S ค่าพลังงานในการรับแรงกระแทกเท่ากับ 2 จูล ค่าความแข็งวัดแบบบริเนลล์อยู่ในช่วง 212 HB-276 HB และต่อมา มงคล แดนสิงห์ (2549) ได้ศึกษาวิธีการลดของเสียจากการผลิตเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ในการผลิตของอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตและสร้างความเชื่อมั่นในระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างปริมาณการเติมสาร เฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียมต่างชนิดกัน คือ ชนิดที่มีส่วนผสมของแมกนีเซียมร้อยละ 4.86 และ 6.21 ตามลำดับ สำหรับการดำเนินการทดลอง เติมปริมาณสารเฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียม จะกำหนดเป้าหมายในการให้ปริมาณแมกนีเซียมตกค้างในชิ้นงานที่อัตราร้อยละ 0.045 โดยศึกษา การเปรียบเทียบสมบัติทางกลของเหล็กหล่อแกรไฟต์กลม ได้แก่ การทดสอบความแข็ง และการทดสอบแรงดึง รวมไปถึงการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค จากการทดลอง พบว่า สามารถลดปัญหาของเสียได้ ซึ่งค่าความกลมแกรไฟต์ที่พบจากการศึกษาต่ำกว่าร้อยละ 70 อันเนื่องมาจากการเติมสารเฟอร์โรซิลิกอนแมกนีเซียมที่ต่างชนิดกันได้ โดยผลการทดลองยังแสดงให้เห็นถึง สมบัติทางกลที่มีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ส่วนในด้านโครงสร้างจุลภาคก็สามารถอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่ยอมรับได้ และปิยรัตน์ ราชวาง (2546) ได้ศึกษาเกี่ยวกับตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อวิธีการตรวจวัดประสิทธิภาพของกระบวนการอินนอคูเลชันในงานหล่อเหล็กหล่อเทา วิธีการที่ใช้ในการตรวจวัดประสิทธิภาพของกระบวนการอินนอคูเลชันในงานหล่อเหล็กหล่อเทา คือ ปริมาณ Recalescence ที่วัดได้จากความแตกต่างระหว่าง อุณหภูมิยูเทคติกที่มีค่าสูงสุด และอุณหภูมิยูเทคติกที่มีค่าต่ำสุด ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่า Recalescence ได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารอินนอคูเลนต์ อุณหภูมิเท เวลาค้างนำโลหะภายในเบ้า ภายหลังจากทำอินนอคูเลชันและอัตราการเย็นตัว พบว่า อุณหภูมิของการเทมีผลต่อลักษณะกราฟแสดงการเย็นตัว คือ การเทน้ำโลหะภายหลังการทำอินนอคูเลชันลงสู่ชิ้นงานที่อุณหภูมิเต่ำ ส่งผลให้ชิ้นงานมีอัตราการเย็นตัวสูงกว่าการเทที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ปริมาณ Recalescence ของการเทที่อุณหภูมิสูง มีปริมาณต่ำกว่าการเทที่อุณหภูมิเต่ำ ซึ่งจากการศึกษาของงานวิจัยนี้ พบว่า อุณหภูมิเทที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการอินนอคูเลชันในการผลิตเหล็กหล่อเทาเกรด FC 200 และ FC 250 โดยใช้ชิ้นงานตามมาตรฐาน JIS G5501 นั้นอยู่ในช่วงประมาณ 1400-1500 องศาเซลเซียส และยังมีการศึกษาเกี่ยวกับเหล็กหล่ออีกวิธี โดยนุชนา พูลทอง (2545) ได้ศึกษาอิทธิพลของธาตุผสมและอัตราการเย็นตัวต่อโครงสร้างและสมบัติทางกลของเหล็กหล่อกึ่งแข็ง ผลการทดลองพบว่าเหล็กหล่อเทาที่หล่อด้วยกระบวนการปกติที่มีการเติมธาตุผสมมีความแข็ง (Hardness) และค่าความแข็งแรง (Tensile strength) สูงกว่าเหล็กหล่อเทาที่หล่อด้วยกระบวนการปกติและไม่เติมธาตุผสม แต่เมื่อนำเหล็กหล่อเทาที่ไม่เติมธาตุผสมมาผ่านการกวนในสถานะที่เป็นโลหะกึ่งแข็ง ธาตุผสมที่เดิมมีผลน้อยมากต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อที่ผ่านการขึ้นรูปโลหะกึ่งแข็ง แต่จะไม่มีผลต่อ

เปอร์เซ็นต์การยืดตัว ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่มีผลสูงที่สุดต่อค่าความแข็งแรงของเหล็กหล่อที่ผ่านการกลั่นในสถานะที่เป็นโลหะกึ่งแข็งคืออัตราการเย็นตัว

จากการศึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้น พบว่า มีการที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับปรับปรุงคุณภาพของเหล็กหล่อ ทั้งทางด้านสมบัติเชิงกล องค์ประกอบของธาตุทางเคมี รวมทั้งการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค โดยวิธีการต่างๆ ซึ่งยังไม่พบว่ามีงานวิจัยใดที่ศึกษาเกี่ยวกับการนำหลักการออกแบบการทดลองมาใช้ในการวางแผนการทดลอง เพื่อหาค่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตเหล็กหล่อเทา ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้ จึงเลือกศึกษาหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดในการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดของเหล็กหล่อเทา โดยมีส่วนผสม ได้แก่ เศษเหล็กหล่อ เศษเหล็กเหนียว ผงคาร์บอน และเฟอร์โรซิลิกอน ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม วิธีพื้นผิวผลตอบสนอง วิธีการแพร่กระจายความเคลื่อนไหว และเทคนิคมอนติคาร์โล โดยคำนึงถึงปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล ได้แก่ ความต้านทานต่อแรงดึง (Tensile strength) และความแข็ง (Hardness) ของชิ้นงานเหล็กหล่อเทา และพิจารณาองค์ประกอบธาตุทางเคมี รวมทั้งวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค เพื่อให้ทราบว่าอัตราส่วนผสมของเศษเหล็กหล่อ เศษเหล็กเหนียว ผงคาร์บอน และเฟอร์โรซิลิกอนในปริมาณเท่าใดที่เหมาะสมที่สุด