

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของธาตุที่เป็นส่วนผสมของพิวเตอร์

พิวเตอร์เป็นโลหะผสม (Alloy) ที่มี ดีบุก (Sn) เป็นส่วนประกอบพื้นฐาน และมีการเติมธาตุอื่นๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการใช้งาน เช่น ทองแดง (Cu) และพลวง (Sb)

2.1.1 ดีบุก (Tin)

2.1.1.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

สัญลักษณ์ธาตุ	Sn (มาจากคำในภาษาลาตินว่า Stannum)
เลขอะตอม	50
น้ำหนักอะตอม	118.7 amu
จุดหลอมเหลว	231.97 องศาเซลเซียส (505.08 K)
จุดเดือด	2270 องศาเซลเซียส (2875 K)
ความหนาแน่น	7.31 g/cm ³ ที่ 20 องศาเซลเซียส
โครงสร้างผลึก	Tetragonal
ความแข็ง	7 – 9 kg/mm ²
สถานะ	ของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง
อนุกรมเคมี	โลหะหลังทรานซิชัน
สี	เทาเงิน มีความแวววาว เป็นมัน



ภาพที่ 2.1 ลักษณะของดีบุก (Sn)

2.1.1.2 การใช้ประโยชน์

1. ใช้ทำแผ่นดีบุก(tinplate) ซึ่งเป็นแผ่นเหล็กกล้าบาง มีปริมาณคาร์บอนต่ำ เคลือบด้วยผิวดีบุก โดยกระบวนการ Electro deposition ปริมาณกึ่งหนึ่งของดีบุกที่ผลิตได้นำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตแผ่นดีบุกนี้ แผ่นดีบุกใช้ทำกระป๋องและภาชนะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระป๋องและภาชนะบรรจุอาหาร
2. ใช้ทำโลหะเชื่อมกับโลหะอื่น เช่น เชื่อมกับตะกั่วเกิดโลหะเชื่อมที่นิยมนเรียกว่า soft solders เชื่อมกับทองแดงเรียกว่า tin-bronzes เชื่อมกับพลวงและทองแดงใช้ทำ Pewterware เป็นต้น
3. ใช้เคลือบผิวโลหะอื่นๆ
4. ใช้เตรียมสารประกอบต่างๆของดีบุก

2.1.1.3 ความเป็นพิษของดีบุก

ดีบุกเป็นธาตุที่พบได้ตามธรรมชาติ แต่จะพบดีบุกในดินและอาหารต่างๆในปริมาณน้อย ดีบุกใช้ในการผลิตกระป๋อง ตะกั่วขั้วดี เหล็ก ท่อทองแดง ตัวดีบุกเองไม่มีพิษร้ายแรงต่อร่างกายมนุษย์แต่สารอินทรีย์ของดีบุกจะมีพิษร้ายแรง เช่น DIMETHYL TIN, DIALKYL TIN AND TRIPHENYL TIN

2.1.2 ทองแดง (Copper)

2.1.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

สัญลักษณ์ธาตุ	Cu
เลขอะตอม	29
น้ำหนักอะตอม	63.546 amu
จุดหลอมเหลว	1084 องศาเซลเซียส (1357.77 K)
จุดเดือด	3562 องศาเซลเซียส (2835 K)
ความหนาแน่น	8.92 g/cm ³ ที่ 20 องศาเซลเซียส
โครงสร้างผลึก	Isometric : Cubic face centered (FCC)
ความแข็ง (HV)	77 – 99 kg/mm ²
สถานะ	ของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง
อนุกรมเคมี	โลหะทรานซิชัน
สี	สีน้ำตาล



ภาพที่ 2.2 ลักษณะของทองแดง (Cu)

2.1.2.2 การใช้ประโยชน์

1. มีความแข็งแรงในช่วงที่พอใช้งานได้ ทั้งยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกลได้หลายระดับ (ขึ้นกับชนิดของทองแดง และกรรมวิธีการผลิต)
2. ความเหนียวของทองแดงสูงมาก สามารถขึ้นรูปโดยไม่เสี่ยงต่อการแตกหัก
3. เป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีมาก
4. เป็นตัวนำความร้อนที่ดีมาก
5. กลึงขึ้นรูปได้ง่าย เมื่อผสมธาตุบางตัวเข้าไป
6. ต้านทานความล้าได้ดีพอสมควร
7. ไม่เป็นสารแม่เหล็ก
8. ทนทานต่อการกัดกร่อน โดยเฉพาะเมื่อใช้กลึงกรดและน้ำทะเล
9. ทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดีพอสมควร

โดยทั่วไปเราเรียกว่า ทองแดงบริสุทธิ์ เมื่อทองแดงมีธาตุหรือสิ่งแปลกปลอมอื่นๆปนอยู่ไม่เกิน 0.5% โดยน้ำหนัก ส่วนทองแดงผสม คือ มีทองแดงผสมอยู่ระหว่าง 40-99% โดยน้ำหนัก

2.1.2.3 ความเป็นพิษของทองแดง

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง

เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นเหียนอาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กดระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน และดื่มน้ำที่ปนเปื้อนทองแดง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ จึงทำให้มีการสะสมอยู่ใน

ร่างกายเป็นปริมาณมาก ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของร่างกาย หรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases คือ ร่างกายสะสมธาตุอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งแรง มีน้ำมูกน้ำลายไหล ควบคุมการพูดลำบาก

ส่วนมากพบทั้งในรูปไอ และเกลือของทองแดง เนื่องจากการหลอมโลหะทองแดง ทองเหลือง การเชื่อมและบัดกรีโลหะโดยใช้โลหะผสมของทองแดง ซึ่งโทษ ทำให้เกิดการระคายเคืองและอักเสบที่ตา ระบบหายใจ ระบบ ทางเดินอาหารและประสาทสัมผัสเสีย ถ้าร่างกายได้รับไอทองแดงมาก ๆ จะทำให้เกิด การคลื่นไส้ อาเจียน เป็นไข้ (metal fume fever) อาจทำให้ผิวหนังและผมเปลี่ยน สีได้ ถ้าได้รับ ในปริมาณมาก ทำให้เนื้อเยื่อถูกอักเสบ และเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดโรคโลหิตจาง

2.1.3 พลวง (Antimony)

2.1.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

สัญลักษณ์ธาตุ	Sb (มาจากคำในภาษาละตินว่า Stibinum)
เลขอะตอม	51
น้ำหนักอะตอม	127.76 amu
จุดหลอมเหลว	630.63 องศาเซลเซียส (903.78 K)
จุดเดือด	1587 องศาเซลเซียส (1860 K)
ความหนาแน่น	6.697 g/cm ³ ที่ 20 องศาเซลเซียส
โครงสร้างผลึก	Rhombohedral หรือ Trigonal
ความแข็ง (HV)	50 – 69 kg/mm ²
สถานะ	ของแข็ง ณ อุณหภูมิห้อง
อนุกรมเคมี	กึ่งโลหะ
สี	พลวงที่เสถียรจะเป็นโลหะสีฟ้า และอโลหะที่ไม่เสถียรจะมีสีเหลือง หรือสีดำ



ภาพที่ 2.3 ลักษณะของพลวง (Sb)

2.1.3.2 การใช้ประโยชน์

1. พลวงผสมตะกั่วทำแผ่นธาตุแบตเตอรี่รถยนต์
2. ผสมตะกั่วและดีบุกในการทำตะกั่วตัวพิมพ์
3. ใช้ในการเป็นส่วนประกอบของกระสุนปืนใช้ในอุตสาหกรรมไม้ขีดไฟทาช้างกล่องไม้ขีด
4. อุตสาหกรรมทำยางพียูซีหุ้มสายไฟฟ้า และทำผ้าทนไฟ วัสดุทนไฟ เสื้อกันไฟ และในอุตสาหกรรมเครื่องเคลือบเป็นต้น

2.1.3.3 ความเป็นพิษของพลวง

โลหะพลวงและโลหะผสมทุกชนิดเป็นพิษ มีผลกระทบต่อร่างกายมนุษย์เช่นเดียวกับ สารหนู กระตุ้นประสาททั้งภายในและภายนอกร่างกาย มีผลกระทบต่อหัวใจ การหายใจและระบบประสาท

2.2 โลหะผสมพิวเตอร์ (Pewter)

เดิมเป็นชื่อเรียกโลหะผสมดีบุกและตะกั่ว ซึ่งใช้ทำภาชนะและเครื่องประดับต่างๆ มีประวัติการนำมาใช้ประโยชน์เป็นเวลายาวนาน โดยเริ่มพบพิวเตอร์อยู่ในผ้าพันศพสมัยของอียิปต์โบราณ การผลิตพิวเตอร์ในลักษณะ อุตสาหกรรม คาดว่าเริ่มมีมาตั้งแต่สมัยโรมันและแพร่หลายไปในหลายประเทศของยุโรป โดยผลิตเป็นชุดเครื่องใช้ในบ้าน สำหรับชนชั้นกลาง ในขณะที่พวกขุนนางและชนชั้นสูงอื่นๆ นิยมใช้เครื่องเงินเป็นหลัก พิวเตอร์ในสมัยโบราณจะมีดีบุกเป็นส่วนประกอบหลักถึง 70% และมีตะกั่วเพียง 30% นอกจากนี้ยังมีเหล็กและแร่ธาตุอื่นๆ เจือปนอยู่บ้างเล็กน้อย ในสมัยศตวรรษที่ 16 ใช้ส่วนประกอบของดีบุกสูงถึง 90% และพิวเตอร์ของอังกฤษซึ่งมีความแข็งแรงมาก จะมีส่วนประกอบของดีบุก 91% และพลวง 9% เป็นต้น เหตุที่ไม่ใช้ดีบุกล้วนๆ เนื่องจากดีบุกขาดคุณสมบัติบางประการ จึงจำเป็นต้องผสมโลหะอื่นๆ ลงไปด้วยเพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการนำมาใช้ประโยชน์ ต่อมามีการใช้โลหะผสมที่มีตะกั่วและพลวงมากขึ้นในการทำพิวเตอร์และมีส่วนประกอบของดีบุกน้อยลง การผสมพลวงลงไปจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและทนต่อการขีดได้ดี นอกจากนี้ยังมีการผสมทองแดง และบิสมัทเพื่อให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และขึ้นรูปประดิษฐ์ได้ง่าย เมื่ออัตราส่วนของดีบุกลดลงน้อยกว่า 65% โลหะผสมนี้จะไม่เหมาะสำหรับการทำภาชนะเพื่อใช้ในการบริโภค เนื่องจากจะมีความเป็นพิษของสารตะกั่วและพลวง

2.2.1 คุณสมบัติทั่วไป

มาตรฐาน ASTM	B560-94
ส่วนประกอบ	ดีบุก (Sn) ทองแดง (Cu) พลวง (Sb)
จุดหลอมเหลว	244-295 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	7.25 g/cm ³ ที่ 20 องศาเซลเซียส

2.2.2 การใช้ประโยชน์

1. ใช้ทำอุปกรณ์เครื่องเรือน อุปกรณ์ตกแต่งบ้าน
2. ใช้แทนเงินเนื่องจากมีความมันวาว ใช้ทำเครื่องประดับ

2.3 แผนภูมิเฟส (Phase Diagram)

เฟส (phase) คือส่วนของระบบที่เป็นเนื้อเดียวและมีลักษณะทางกายภาพและเคมีที่สม่ำเสมอ ยกตัวอย่างของระบบที่มีหนึ่งเฟส เช่น ธาตุบริสุทธิ์ และสารละลาย (solution) ที่เป็นเนื้อเดียวกัน ในกรณีที่มีระบบมีหลายเฟส แต่ละเฟสจะแยกจากกันด้วยขอบเขตเฟส (phase boundary) เราเรียกระบบที่มีเฟสเดียวเรียกว่า ‘homogeneous system’ และระบบที่มีหลายเฟสเรียกว่า ‘heterogeneous system’ หรือของผสม (mixture) แผนภาพที่แสดงถึงเฟสต่างๆที่มีอยู่ในวัสดุ ณ สถานะหนึ่งๆ เรียกว่า แผนภาพเฟสที่สถานะสมดุล (phase equilibrium diagram) หรือแผนภาพเฟส (phase diagram) ซึ่งมีประโยชน์ในการบอกข้อมูลต่างๆ ดังนี้

1. คุณสมบัติของสาร / โลหะ/วัสดุ
2. Heat Treatment โลหะ
3. โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรดังต่อไปนี้
4. อุณหภูมิ (Temperature)
5. ส่วนผสม (Composition)
6. ความดัน (Pressure)
7. เฟส (Phase)

อุณหภูมิ (Temperature) เป็นตัวแปรที่สำคัญมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสาร เช่น ทำให้เปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มหรือลดลง จะทำให้สารเปลี่ยนคุณสมบัติต่างๆไปซึ่งรวมทั้งเฟสด้วย ดังนั้นในการปรับปรุงคุณสมบัติต่างของสารหรือโลหะมักจะใช้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (การใช้ความร้อนเป็นหลัก)

ส่วนผสม (Composition) หมายถึง ส่วนผสมของสารหรือโลหะต่างๆการที่สารผสมกันในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะทำให้คุณสมบัติต่างๆรวมทั้งเฟสของสารนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนผสมนั้นเสมอ ดังนั้นการนำสารมาใช้จำเป็นต้องทราบปริมาณและอัตราส่วนผสมต่างๆ เพื่อจะสามารถทราบถึงการทำงานที่เหมาะสม

ความดัน (Pressure) คือ ความดันเป็นตัวแปรที่มีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสาร เช่น ทำให้เปลี่ยนสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เช่นเดียวกับอุณหภูมิทุกประการ ดังนั้นเมื่อเราเปลี่ยนแปลงความดัน เช่น การเก็บก๊าซในถังจำเป็นต้องเพิ่มความดันทำให้ก๊าซเปลี่ยนสถานะเป็นของเหลวและมีปริมาณลดลง (ในขณะที่อุณหภูมิเท่าเดิม) ซึ่งเป็นไปตามกฎของบอย (Boyle's Law) ดังนั้น

อาจกล่าวได้ว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงความดันของสารที่อุณหภูมิคงที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเทียบได้กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารที่ความดันคงที่

2.3.1 กฎของกิบส์ (Gibbs' Phase Rule)

จากกฎทางเทอร์โมไดนามิกส์ทำให้สามารถทราบความสัมพันธ์ระหว่างเฟส (P) ที่สามารถมีได้ที่สภาวะสมดุลในระบบ จำนวนที่ต่ำที่สุดของตัวผสม (C) ซึ่งสามารถทำให้เกิดระบบที่ว่ำนั้น และระดับของความอิสระ (F) ความสัมพันธ์ทั้ง 3 อย่างนี้สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$P + F = C + 2 \quad (2.1)$$

P คือ จำนวนเฟส

F คือ degree of freedom หรือจำนวนตัวแปร

C คือ จำนวนส่วนประกอบของระบบ

ในสมการนี้ระดับความอิสระก็คือ จำนวนตัวแปรอุณหภูมิความดัน และส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงโดยไม่เปลี่ยนจำนวนเฟสในสภาวะสมดุล โดยทั่วไปความดันจะคงที่ที่ 1 atm จึงเหลือตัวแปรภายนอกเพียงตัวเดียวจะได้สมการดังนี้

$$P + F = C + 1 \quad (2.2)$$

กรณีที่พิจารณาบริเวณที่มีหนึ่งเฟส ตัวแปรของสภาวะแวดล้อมจะมีได้ 2 ตัว คือ อุณหภูมิและองค์ประกอบ หมายความว่าทั้งอุณหภูมิ และองค์ประกอบสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยยังคงเฟสเดิมหนึ่งเฟสไว้ได้ นั่นคือมี $F = 2$

กรณีที่พิจารณาบริเวณที่มีสองเฟส ตัวแปรของสภาวะแวดล้อมจะมีได้หนึ่งตัวคือ หมายความว่าถ้าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบต้องคงที่ หรือถ้าองค์ประกอบเปลี่ยน อุณหภูมิต้องคงที่เพื่อที่จะคงเฟสสองเฟสเดิมเอาไว้ นั่นคือมี $F = 1$

สุดท้ายคือกรณีพิจารณาบริเวณที่มีสามเฟส จะต้องมีสภาวะแวดล้อมคงที่ เปลี่ยนแปลงค่าใดค่าหนึ่งไม่ได้ นั่นคือ $F = 0$

2.3.2 Unary Phase Diagram

แผนภาพสมดุลของระบบสารเดี่ยว คือแผนภาพที่แสดงเฟสของสารเดี่ยวหรือสารบริสุทธิ์นั่นเอง ซึ่งอาจเป็นธาตุเดี่ยว 1 ธาตุ เช่นทองแดงหรือสารประกอบเพียงสารเดี่ยว เช่น น้ำ จะเห็นได้ว่าในระบบสารเดี่ยว จะไม่มีตัวแปรส่วนผสมหรืออาจจะกล่าวได้ว่าส่วนผสมเท่ากับหนึ่งนั่นเอง ดังนั้นตัวแปรในระบบสารเดี่ยวจึงมีแค่ 2 ตัวแปร คือ

1. อุณหภูมิ มักจะแสดงในแผนภาพเป็นแกนตั้ง (แกน Y)
2. ความดัน มักจะแสดงในแผนภาพเป็นแกนนอน (แกน X)

2.3.2.1 การเกิดสมดุลสองเฟส

การเกิดสมดุลสองเฟส หมายถึง การที่สารสามารถแสดง เฟสได้สมดุลกันสองภาคพร้อมกัน ดังนั้นถ้าต้องการให้เกิดสมดุล 2 เฟส เปลี่ยนได้ก็ตัวแปร จากกฎของกิบส์ ถ้า $P = 2$, $C = 1$ ได้ $F = 1$ แสดงว่าถ้าต้องการให้เกิดเฟสสมดุลกันจะสามารถเปลี่ยนตัวแปรได้เพียง 1 อีก 1 ต้องคงที่ เช่น เปลี่ยนแปลงตัวแปรอุณหภูมิโดย ให้ความดันคงที่หรือเปลี่ยนแปลงตัวแปรความดันจะให้อุณหภูมิกคงที่

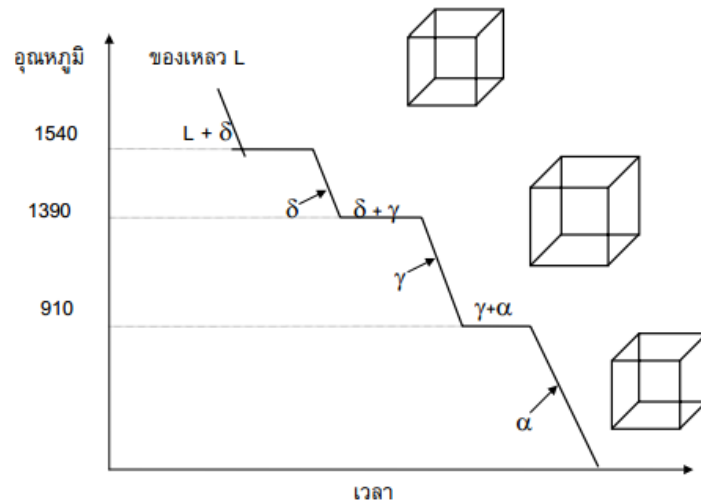
2.3.2.2 การเกิดสมดุลสามเฟส

การเกิดสมดุลสามเฟส หมายถึง สารสามารถมีสามเฟสสมดุลกันอยู่ได้พร้อมกัน ดังนั้นถ้าต้องการให้เกิดสมดุล 3 เฟส จะสามารถเปลี่ยนได้ก็ตัวแปร จากกฎของกิบส์ ถ้า $P = 3$, $C = 1$ ได้ $F = 0$ แสดงว่าไม่สามารถเปลี่ยนตัวแปรได้เลย ทั้งอุณหภูมิ และความดัน ต้องคงที่จึงจะเกิดจุดที่สามเฟสสมดุลกัน เรียกจุดสมดุลสามเฟส หรือ Triple Point จุดสมดุลสามภาค หมายถึง จุดที่สารมี 3 เฟสเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งถ้าเราจะเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความดันเพียงเล็กน้อย การเกิดสมดุลเฟสก็จะหมดไป วัสดุหลายชนิดขอบเขตสองดุลสองเฟสอยู่ในแนวระดับ เช่น เหล็ก ดังนั้นเมื่อพิจารณาเหล็กบริสุทธิ์จุดหลอมเหลวไม่ขึ้นกับความดัน แต่การกลายเป็นไอหรือก๊าซของเหล็กกลับขึ้นกับความดัน เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าเหล็กบริสุทธิ์มี 5 เฟส คือ

1. เฟสก๊าซ
2. เฟสของเหลว
3. เฟสของแข็ง แบ่งเป็น 3 เฟส คือ
 - δ Fe เฟสโครงสร้าง B.C.C
 - α Fe เฟสโครงสร้าง F.C.C
 - γ Fe เฟสโครงสร้าง B.C.C

ดังนั้นเกิด Triple Point 3 จุด ถ้าปล่อยให้เหล็กบริสุทธิ์ที่หลอมละลาย (เฟสของเหลว) ที่ $2200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ปล่อยให้เย็นตัวลงที่ความดันบรรยากาศเมื่อถึง $1540\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะเกิดการแข็งตัวเป็นของแข็งเฟส δ ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น BCC ถ้าปล่อยให้เย็นตัวลงมาถึง $1390\text{ }^{\circ}\text{C}$ จะแข็งตัวเป็นเฟสของแกมมา γ ที่มี

โครงสร้างผลึกเป็น FCC จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงมาอีก 910°C เหล็กจะเปลี่ยนแปลงเฟสเป็นเฟสแอลฟา α ที่มีโครงสร้างผลึกเป็น BCC ดังภาพที่ 2.4

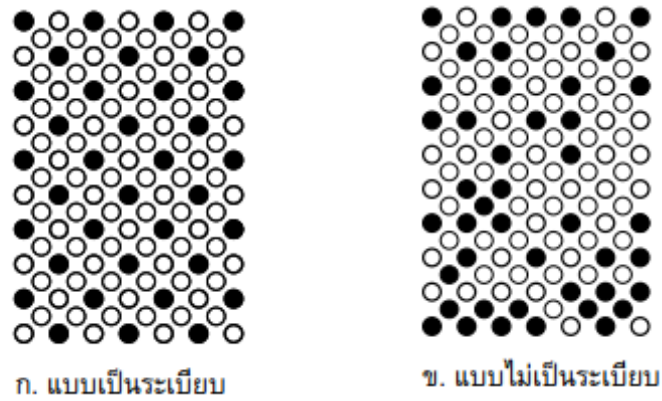


ภาพที่ 2.4 กราฟการแข็งตัวและการเปลี่ยนแปลงเฟสของเหล็กบริสุทธิ์

2.3.3 Binary Phase Diagram

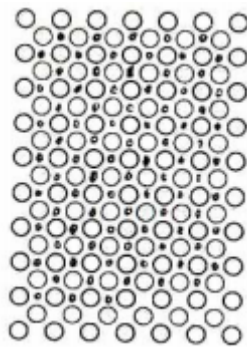
แผนภาพสมดุลเฟสระบบ 2 ธาตุ เป็นแผนภาพจากสมดุลเฟสที่ใช้กับระบบธาตุหรือสารละลายรวมกัน 2 ชนิด เช่น ธาตุกับธาตุ ได้แก่ เหล็กผสมกับคาร์บอน หรือสารประกอบผสมกับสารประกอบ เช่น เกลือผสมกับน้ำ นิกเกิลออกไซด์กับแมกนีเซียมออกไซด์ เป็นต้น ธาตุหรือสารประกอบนั้นอาจจะละลายกันได้ทั้งในสภาพของเหลวหรือของแข็ง โดยถ้าสารละลายในสถานะของแข็ง เราเรียกว่า สารละลายของแข็ง (Solid Solution) การละลายในสภาพของแข็ง เช่น นิกเกิลกับทองแดงสามารถละลายรวมกันได้ทุกส่วนผสม ทั้งสภาพของแข็งและของเหลว อาจเรียกว่ามีความสามารถในการละลายในสภาพของแข็งได้ดี การละลายในสภาพของแข็งมีอยู่ 2 ชนิดคือ

1) สารละลายของแข็งชนิดแทนที่ หรือ Substitutional Solid Solution หมายถึง การที่ธาตุทั้งสองธาตุมีขนาดอะตอมใกล้เคียงกัน ผสมกันโดยการแทนที่อะตอมของกันและกัน ซึ่งการละลายชนิดแบบนี้ อาจมีทั้งแบบเป็นระเบียบแบบไม่เป็นระเบียบดังภาพที่ 2.5 จะเป็นได้ว่าการละลายชนิดแบบเป็นระเบียบอะตอมของธาตุจะสลับตำแหน่งกันอย่างเป็นระเบียบหรือการเรียงตัวของอะตอมทั้งสองธาตุวางตำแหน่งของอะตอมแบบกระจายตัวกันทั่ว สำหรับการละลายชนิดแทนที่ไม่เป็นระเบียบจะมีการเรียงตัวของอะตอมสับสนไม่เป็นระเบียบ



ภาพที่ 2.5 สารละลายของแข็งชนิดแทนที่

2) สารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว หรือ Interstitial Solid Solution



ภาพที่ 2.6 สารละลายของแข็งชนิดแทรกตัว

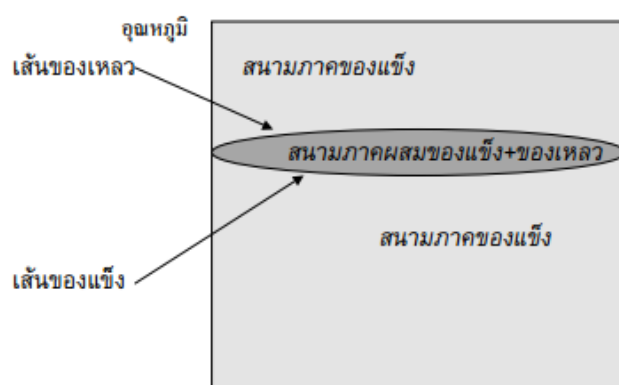
เมื่อธาตุหรือสารผสมกันจะเกิดความสัมพันธ์ที่ความดันและอุณหภูมิหนึ่ง มักกำหนดให้ความดันคงที่ ณ ความดันบรรยากาศเสมอ ดังนั้นสูตรของกิบส์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปดังนี้

$$P + F = C + 1 \quad (2.3)$$

ในระบบนี้ ค่า $C = 2$ เสมอ (เนื่องจากการผสมระหว่างสองสารเท่านั้น) ดังนั้นถ้าต้องการสมดุลหนึ่งเฟส ($P = 1$) การเปลี่ยนแปลงเฟสจะเกิดขึ้นกับตัวแปรได้ $F = 2$ ก็คือ อุณหภูมิและส่วนผสมนั่นเอง

2.3.3.1 การเกิดสมดุลสองเฟส

ถ้าต้องการสมดุลสองเฟส ($P = 2$) การเปลี่ยนแปลงสมดุลสองเฟสจะขึ้นกับตัวแปรได้หนึ่งตัวแปร ($F = 1$) ซึ่งก็คืออุณหภูมิคงที่หรือส่วนผสมอย่างใดอย่างหนึ่ง หมายความว่า ถ้ากำหนดอุณหภูมิคงที่ การเปลี่ยนแปลงสองเฟสจะเกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงได้เพียงส่วนผสมเท่านั้น หรือกำหนดส่วนผสมคงที่ไว้ การเปลี่ยนแปลงสองเฟสจะเกิดขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเท่านั้น การเกิดสมดุลสองเฟสจะเกิดโดยขนานด้วยเส้น 2 เส้นที่เป็นสมดุลของอุณหภูมิและความดันคงที่ ซึ่งทำให้เกิดความสมดุลของสองเฟสขึ้น เรียกเส้นบนว่า เส้นของเหลว และเรียกเส้นล่างว่า เส้นของแข็ง ดังภาพที่ 2.7 การเกิดสมดุลเฟสจะเกิดบริเวณที่เรียกว่า สนามภาค หรือ Phase Field ดังนั้น Phase Field คือ บริเวณที่ธาตุหรือสารผสมนั้นมีเฟสเดียวกัน แม้ส่วนผสมจะต่างกันก็ตาม เช่น มีเฟสของแข็ง หรือภาคของเหลว หรือภาคของแข็งผสมของเหลว ดังภาพที่ 2.7



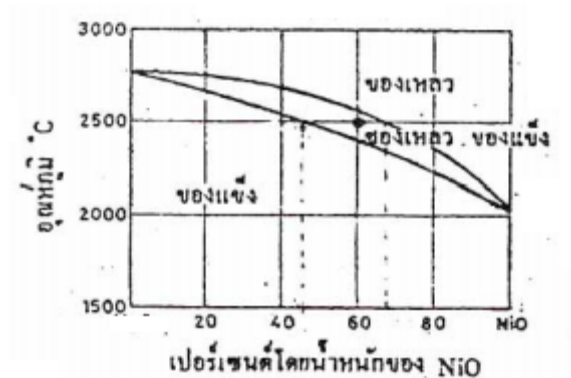
ภาพที่ 2.7 เส้นของแข็งและเส้นของเหลว

ความหมายของเส้นของเหลว คือ เป็นเส้นที่เกิดการสมดุลของของเหลวโดย สารจะเกิดการหลอมละลายกลายเป็นของเหลวหมดเมื่อให้ความร้อนหรือเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่าเส้นของเหลวนี้ ความหมายของเส้นของแข็ง คือ เป็นเส้นที่เกิดการสมดุลของสองเฟส ที่สารจะแข็งตัวเป็นของแข็งหมดเมื่อสารเย็นตัวหรือให้อุณหภูมิต่ำกว่าเส้นของแข็ง

2.3.3.2 ระบบสมดุลเฟสของระบบ 2 ธาตุ

1. ระบบสารละลายของแข็ง (Solid Solution System)

เป็นระบบสาร 2 ชนิด สามารถละลายเข้ากันได้หมดทุกส่วนผสม ทั้งในสภาพของเหลวและของแข็ง ดังภาพที่ 2.8 แสดงแผนภาพสมดุลของ MgO กับ NiO ซึ่งทั้งสองชนิดสามารถละลายเข้ากันได้หมดทั้งสภาพของแข็งและของเหลว

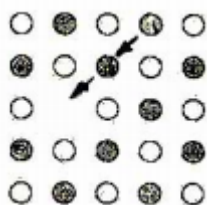


ภาพที่ 2.8 แผนภาพสมดุลของ MgO กับ NiO

แผนภาพของระบบสารละลายของแข็ง มักประกอบด้วย 3 Phase Field คือ สนามภาคของเหลว (L Phase) สนามภาคของเหลว + ของแข็ง (L+S Phase) และสนามภาคของแข็ง (S Phase) โดยแบ่ง Phase Field ด้วยเส้นของเหลว (Liquidus) และเส้นของแข็ง (Solidus) ทั้งสองเส้นไม่มีโอกาสมาพบกันยกเว้นจุดปลายเท่านั้น การแข็งตัวของโลหะผสมในระบบสารละลายความแข็ง โลหะจะเป็นตัวโครงสร้างกิ่งไม้ (Dendrites) เกรนกิ่งไม้จะใหญ่หรือเล็กขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของโลหะผสมนั้น ในขณะที่โลหะผสมสารละลายของแข็งเกิดการแข็งตัว โลหะทั้งสองชนิดจะละลายเข้ากันด้วยการแพร่ (Diffusion)

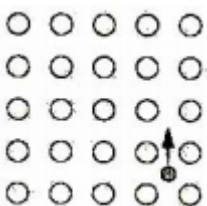
กลไกการแพร่ในสารละลายของแข็ง สามารถแบ่งได้เป็น 4 ลักษณะใหญ่ คือ

1. กลไกการแพร่แบบแทนที่ช่องว่างของอะตอม (Vacancy Atomic Site Mechanism)



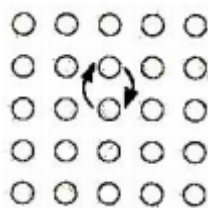
ภาพที่ 2.9 กลไกการแพร่แบบแทนที่ช่องว่าง

2. กลไกการแพร่แบบแทรกตัวระหว่างอะตอม (Interstitial Atomic Mechanism)



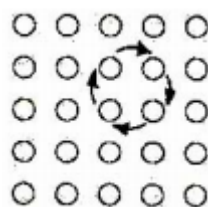
ภาพที่ 2.10 กลไกการแพร่แบบแทรกตัวระหว่างอะตอม

3. กลไกการแพร่แบบสลับกันสองอะตอม (Two Atom Interchange Mechanism)



ภาพที่ 2.11 กลไกการแพร่แบบสลับกันสองอะตอม

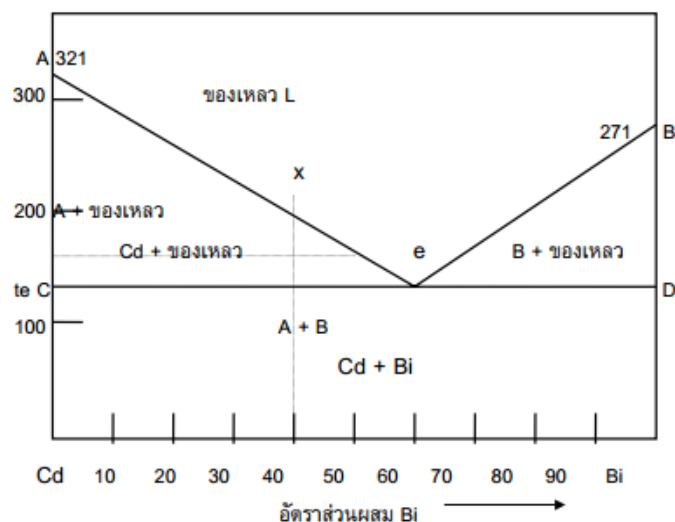
4. กลไกการแพร่แบบสลับกันสี่อะตอม (Four Atom Interchange Mechanism)



ภาพที่ 2.12 กลไกการแพร่แบบสลับกันสี่อะตอม

2. ระบบยูเทคติก (Eutectic System)

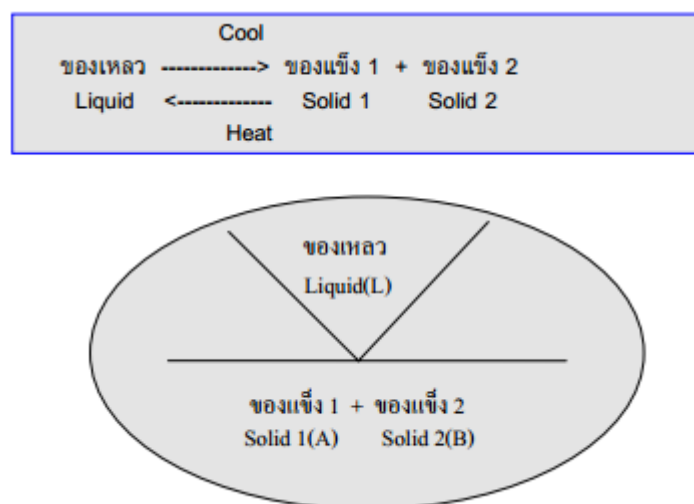
ในระบบนี้โลหะหรือสารละลายต่างละลายได้ดีในสภาพของเหลวแต่แยกตัวอย่างเด็ดขาดในสภาพของแข็ง จากภาพที่ 2.13 จะเห็นว่าอุณหภูมิแข็งตัวของธาตุทั้งสองจะลดลง เมื่อมีธาตุหรือสารอื่นเพิ่มขึ้นเป็นไปตามเส้น Ae สำหรับธาตุ A และเส้น Be สำหรับธาตุ B ทั้งสองเส้นจะมาบรรจบกันที่ e โดยจุด e เป็นจุดที่อุณหภูมิแข็งตัว (หลอมละลาย) ของสารผสมนั้นต่ำสุด เรียกว่า จุดยูเทคติก (Eutectic Point) และอุณหภูมิดังกล่าวจะมีแต่อุณหภูมิเดียว เรียกว่า อุณหภูมิยูเทคติก สารผสมจะแข็งตัวพร้อมกันที่อุณหภูมินี้ โลหะผสมยูเทคติกจะแสดงคุณสมบัติเหมือนธาตุบริสุทธิ์ การแข็งตัวของสาร A จะแข็งตัวหมดเมื่อสาร A เย็นตัวถึงเส้น AeD ส่วนการแข็งตัวของสาร B เป็นไปตามเส้น BeC โดยแข็งตัวหมดเมื่อเย็นตัวต่ำกว่าเส้นดังกล่าว แผนภาพสมดุลของระบบยูเทคติกสามารถแบ่งได้เป็น 4 Phase Field คือ (1) ของเหลว (2) ของเหลว + ของแข็ง A (3) ของแข็ง และ (4) ของแข็ง + ของแข็ง B



ภาพที่ 2.13 แผนภาพสมดุลของ Cd-Bi

2.1 ปฏิกิริยายูเทคติก (Eutectic Reaction)

ปฏิกิริยายูเทคติกโดยทั่วไป คือ ปฏิกิริยาที่สารผสมที่ละลายกันอย่างสมบูรณ์ในสภาพของเหลว เมื่อเย็นตัวลงแล้วสารผสมทั้งสองแยกตัวออกจากกันเนื่องจากไม่สามารถละลายเข้ากันได้ ในสภาพของแข็ง เกิดเป็นสารสองชนิดซึ่งต่างกัน ปฏิกิริยานี้เกิดเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังสมการของปฏิกิริยายูเทคติก แบบทั่วไป



ภาพที่ 2.14 ลักษณะเฟสบนแผนภาพสมดุลระบบยูเทคติก

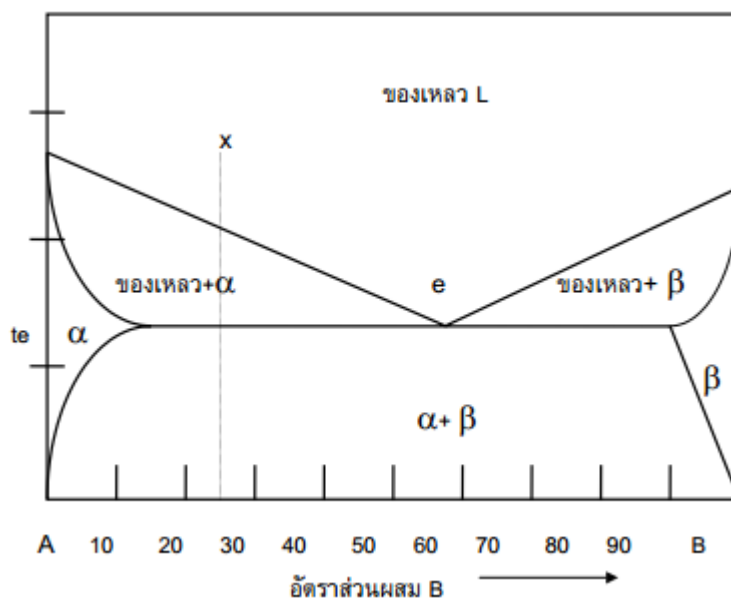
เมื่อสารผสมทั้งสองเย็นตัวลงแล้วเกิดปฏิกิริยายูเทคติก จะทำให้ของแข็งที่เกิดขึ้นมีโครงสร้างพิเศษ เรียกว่า โครงสร้างยูเทคติก ซึ่งคือโครงสร้างผลึกสลับกันระหว่างโครงสร้างผลึก A และโครงสร้างผลึก B ดังภาพที่ 2.15



ภาพที่ 2.15 โครงสร้างยูเทคติก

3. ระบบผสมระหว่างระบบสารละลายของแข็งกับระบบยูเทคติก

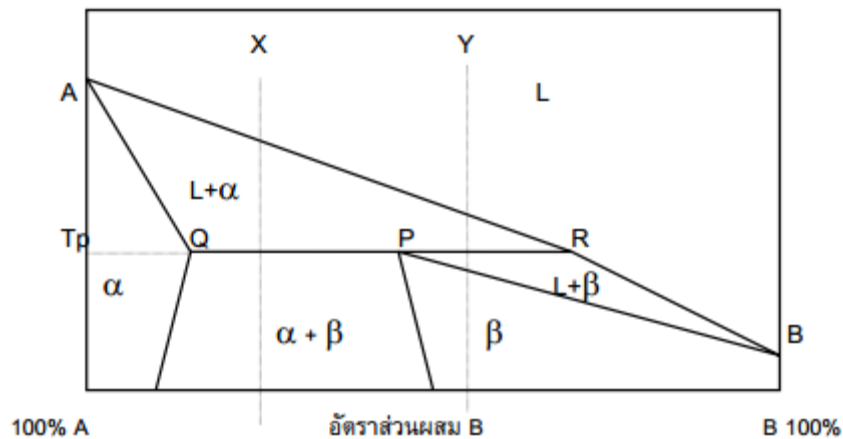
เกิดขึ้นเมื่อสารละลายเข้ากันได้บ้างบางส่วนในของแข็ง และละลายได้หมดในของเหลว สันามภาคที่ปรากฏในแผนภาพสมดุลของระบบนี้มี 6 Phase Field คือ (1) ของเหลว (2) ของเหลว + ของแข็ง α (3) ของแข็ง β (4) ของเหลว + ของแข็ง β (5) ของแข็ง α และ (6) ของเหลว + ของแข็ง α + ของแข็ง β และเมื่อแข็งตัวจะประกอบด้วยโครงสร้าง (1) ของแข็ง α (2) ของแข็ง β และ (3) ของแข็ง α + ของแข็ง β



ภาพที่ 2.16 แผนภาพสมดุลเฟสระบบผสมระหว่างระบบสารละลายของแข็งกับระบบยูเทคติก

4. ระบบเพอริเทคติก (Peritectic System)

เกิดขึ้นเมื่อโลหะสองชนิด มีความแตกต่างของอุณหภูมิหลอมละลายมากๆ ปฏิกริยาเพอริเทคติก คือ การที่สารละลายของแข็งที่มีส่วนผสมคงที่ทำปฏิกิริยากับเฟสของเหลวที่มีส่วนผสมคงที่



ภาพที่ 2.17 แผนภาพสมดุลเฟสระบบเพอริเทคติก

สนามเฟสที่ปรากฏในแผนภาพสมดุลของระบบนี้มี 6 Phase Field คือ

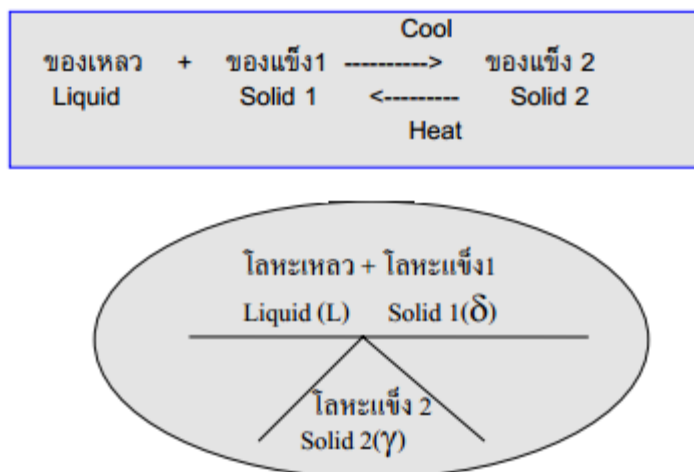
1. ของเหลว
2. ของแข็ง α
3. ของแข็ง β
4. ของเหลว + ของแข็ง α
5. ของเหลว + ของแข็ง β
6. ของแข็ง $\alpha+\beta$

เมื่อแข็งตัวจะประกอบด้วยโครงสร้าง

1. ของแข็ง α
2. ของแข็ง β
3. ของแข็ง $\alpha+\beta$

4.1 ปฏิกิริยาเพอริเทคติก (Peritectic Reaction)

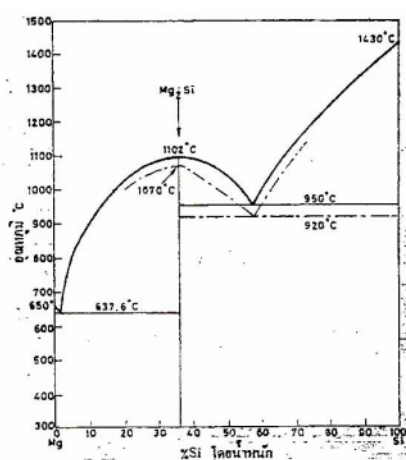
ปฏิกิริยาเพอริเทคติก คือ การที่สารละลายที่มีสภาพของเหลวกับสารของแข็ง เกิดปฏิกิริยารวมตัวเป็นสารของแข็งชนิดใหม่เมื่ออุณหภูมิลดลง สมการของปฏิกิริยาเพอริเทคติกแบบทั่วไปแสดงดังภาพที่ 2.18 ในทางกลับกันเราสามารถเพิ่มอุณหภูมิแล้วทำให้ของแข็ง 2 ชนิด หลอมละลายกลายเป็นของเหลวบางส่วน และบางส่วนกลายเป็นของแข็ง (โลหะแข็ง 1) แผนภาพแสดงสมดุลของระบบเพอริเทคติกดังภาพที่ 2.18



ภาพที่ 2.18 ลักษณะเฟสบนแผนภาพสมดุล

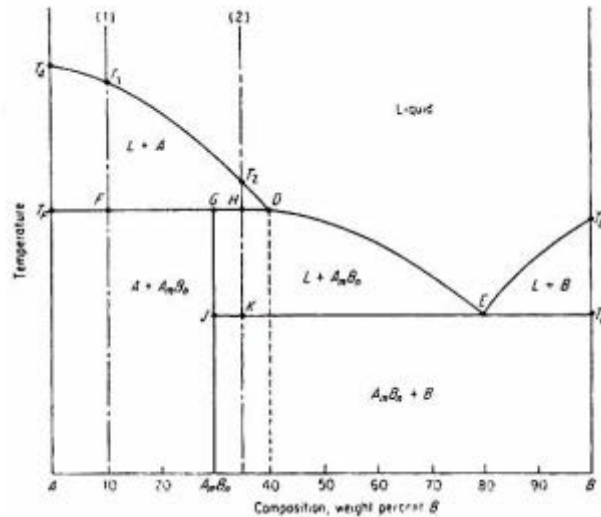
5. ระบบสารประกอบโลหะ (Intermetallic Compound)

โลหะผสมบางตัวจะเกิดสารประกอบขึ้น ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายโลหะบริสุทธิ์ตัวหนึ่งในระบบ คือ มีอุณหภูมิหลอมละลายคงที่ ทำให้สมดุลผิดไปจากเดิมเกิดระบบซ้อนกัน ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 แผนภาพสมดุลเฟสของระบบสารประกอบ Mg-Si

จากรูปจะเห็นได้ว่า โลหะผสม Mg-Si จะเกิดสารประกอบโลหะ Mg_2Si ที่ส่วนผสม Mg 63% Si 37% มีจุดหลอมละลายคงที่ ณ $1102^{\circ}C$ และทำตัวคล้ายสารบริสุทธิ์แบ่งแผนภาพเป็นระบบยูเทคติกได้ 2 ระบบ คือ Mg- Mg_2Si และ Mg_2Si -Si บางกรณีเกิดเป็นระบบอื่นขึ้นในระบบสารประกอบโลหะ เช่น ระบบเพอริเทคติกผสมกับระบบยูเทคติกซ้อนขึ้นมาในระบบสารประกอบดังภาพที่ 2.20

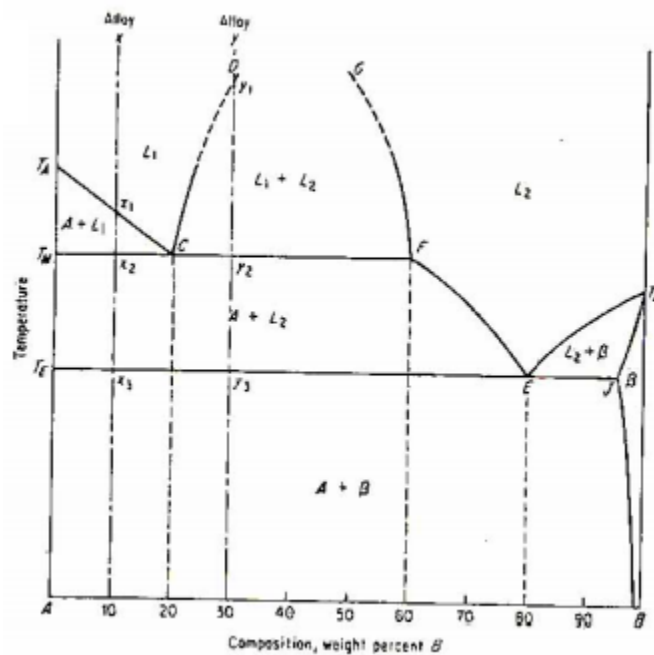


ภาพที่ 2.20 แผนภาพสมดุลของสารประกอบโลหะที่มีระบบเพอริเทคติกและระบบยูเทคติกซ้อนกันอยู่

จากภาพที่ 2.20 จะเห็นได้ว่าระบบสารประกอบโลหะถูกแบ่งเป็นระบบเพอริเทคติก และระบบยูเทคติกที่ส่วนผสม A 70% B 30% ซึ่งที่ส่วนผสมนี้เกิดเป็นสารประกอบโลหะที่มีจุดหลอมละลาย T_p เมื่อโลหะผสมแข็งตัว ในช่วงระบบเพอริเทคติกก็จะเกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติกได้ของแข็งผสมระหว่างธาตุ A กับสารประกอบโลหะ (AB) หรือ $A + (AB)$ โดยธาตุ A จะแข็งตัวก่อน และเมื่อถึงอุณหภูมิ T_p โลหะเหลวจะเกิดปฏิกิริยาเพอริเทคติกได้สารประกอบโลหะ AB แต่ถ้าโลหะผสมนั้นมีส่วนผสมของ B มากกว่า 30% เมื่อโลหะแข็งตัวจะเกิดปฏิกิริยายูเทคติกที่อุณหภูมิ T_e ทำให้โลหะที่แข็งมีส่วนผสมของสารประกอบโลหะกับธาตุ B หรือ $(AB+B) + AB$ โดยสารประกอบ AB จะแข็งตัวก่อน และโลหะเหลวที่เหลือจะแข็งตัวที่อุณหภูมิ T_e กลายเป็นโครงสร้างของแข็งยูเทคติก หรือ $(AB+B)$ นั่นเอง

6. ระบบโมนอเทคติก (Monotectic System)

แผนภาพสมดุลระบบโมนอเทคติก หมายถึง แผนภาพของระบบที่สารผสมสองสารสามารถละลายเข้ากันได้บ้างในสภาพของเหลว แต่จะแยกตัวออกจากกันเมื่อแข็งตัวเป็นสภาพของแข็ง ดังภาพที่ 2.21

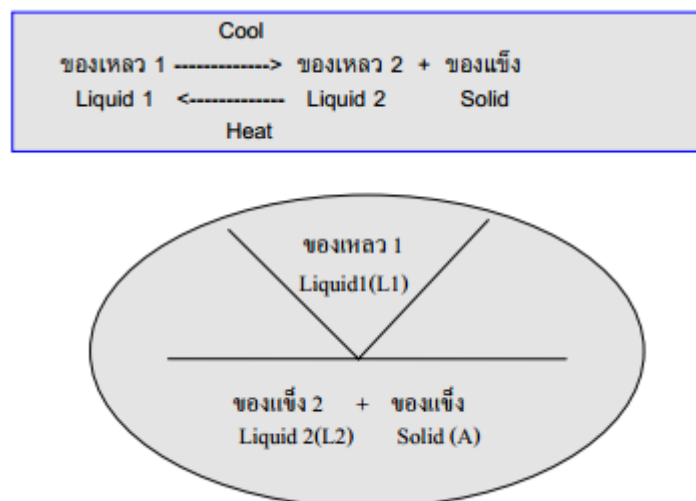


ภาพที่ 2.21 แผนภาพสมดุลระบบโมโนเทคติก

จากแผนภาพสมดุลของโมโนเทคติกในภาพที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่าสารสองสารนี้มีบางส่วนผสมจะสามารถละลายเข้าด้วยกัน เป็นของเหลว 1 (L_1) หรือเป็นของเหลว 2 (L_2) และมีบางส่วนผสมที่ของเหลวทั้งสองแยกตัวกันอยู่ในรูปของเหลว 1 และของเหลว 2 (L_1+L_2) เมื่อสารผสมนี้เย็นตัว จะได้ของแข็งผสมระหว่าง A และของแข็ง β ($\alpha + \beta$) ที่ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันในสภาพของแข็ง เมื่อให้ของเหลว 1 เย็นตัวลงสามารถเกิดปฏิกิริยาอย่างหนึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยาโมโนเทคติก

6.1 ปฏิกิริยาโมโนเทคติก (Monotectic Reaction)

ปฏิกิริยาโมโนเทคติกโดยทั่วไป คือ ปฏิกิริยาที่สารผสมในสภาพของเหลวเย็นตัวลงแล้วสารผสมตัวหนึ่งแยกตัวออกจากอีกตัวหนึ่ง เนื่องจากสารตัวหนึ่งแยกออกแล้วเกิดการแข็งตัว ในขณะที่อีกสารหนึ่งยังหลอมละลายอยู่ เกิดปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิลดลง ดังสมการของปฏิกิริยาโมโนเทคติกแบบทั่วไป ดังภาพที่ 2.22

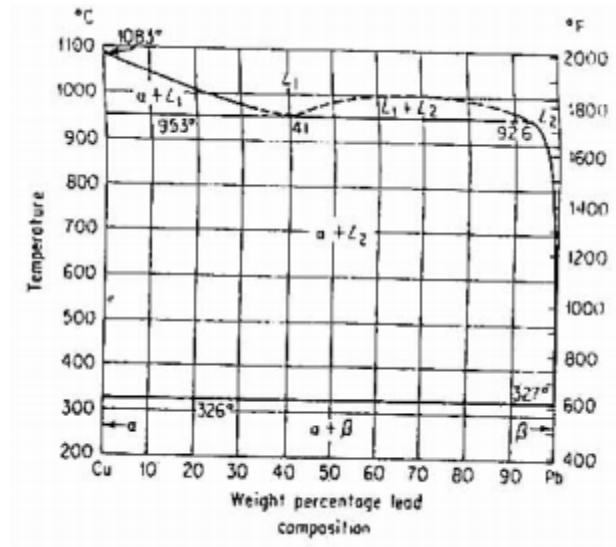


ภาพที่ 2.22 แสดงลักษณะเฟสบนแผนภาพสมดุลระบบโมโนเทคติก

จะเห็นได้ว่าปฏิกิริยาโมโนเทคติกจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งๆเสมอ อุณหภูมินี้เรียกว่า อุณหภูมิโมโนเทคติก หรือ TM

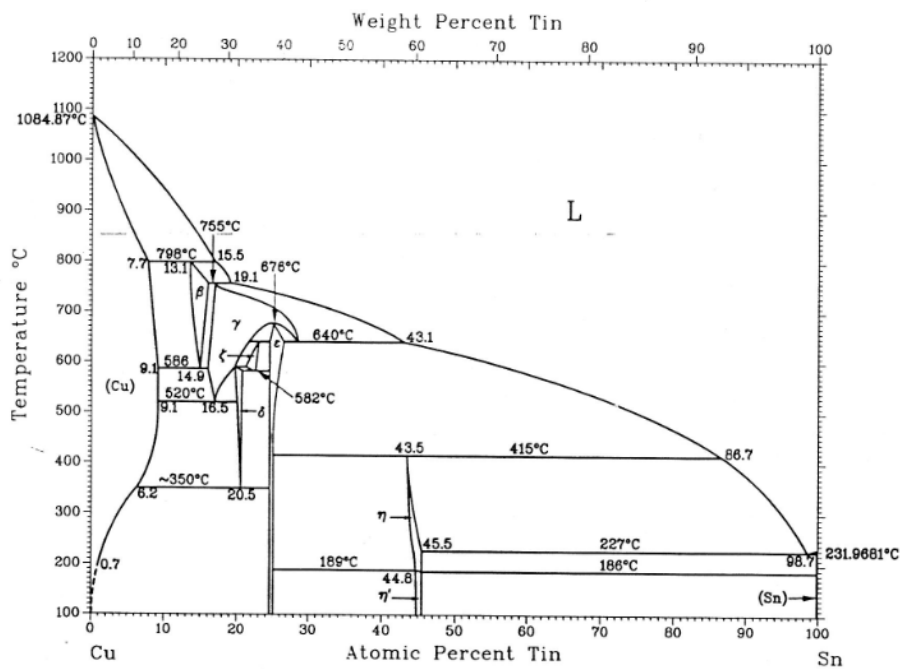
7. ระบบสารที่ไม่ละลายทั้งในของเหลวและของแข็ง (Insoluble in Liquid and Solid State System)

แผนภาพสมดุลระบบสารที่ไม่ละลาย หมายถึง แผนภาพของระบบที่สารผสมสองสารไม่สามารถละลายเข้ากันได้เลยทั้งในสภาพของเหลว และสภาพของแข็ง กล่าวคือ เมื่อสารผสมกันจะแยกตัวในสภาพของเหลวแล้ว จะแยกตัวออกจากกันเมื่อแข็งตัวเป็นสภาพของแข็ง ซึ่งหมายความว่าไม่มีกลไกการแพร่เกิดขึ้นเลย ดังภาพที่ 2.23 เป็นโลหะผสมทองแดงกับตะกั่ว ซึ่งเป็นโลหะผสมที่มีระบบใกล้เคียงกับระบบสารที่ไม่ละลาย ภาพที่ 2.23 แสดงให้เห็นว่าโลหะผสมทองแดง-ตะกั่ว มีบริเวณที่เกิดของเหลว 2 เกิดขึ้นคือ L1 และ L2 และแผนภาพสมดุลจะแสดงปฏิกิริยาโมโนเทคติก ที่ระดับอุณหภูมิ 926-953°C ดังนั้นเมื่อโลหะผสมเย็นตัวลงถึงระดับดังกล่าว ของเหลว 1 จะเกิดปฏิกิริยาโมโนเทคติก กลายเป็นของแข็ง α ผสมกับของเหลว 2 (L2) เมื่อเย็นตัวมาจนถึงระดับอุณหภูมิ 326 °C จะเกิดปฏิกิริยายูเทคติก โดยของเหลว 2 (L2) จะเกิดปฏิกิริยาละลายมาเป็นของแข็ง α และของแข็ง β ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำเนื่องจากจุดหลอมละลายของตะกั่วที่ต่ำกว่าอยู่ที่ 326 °C



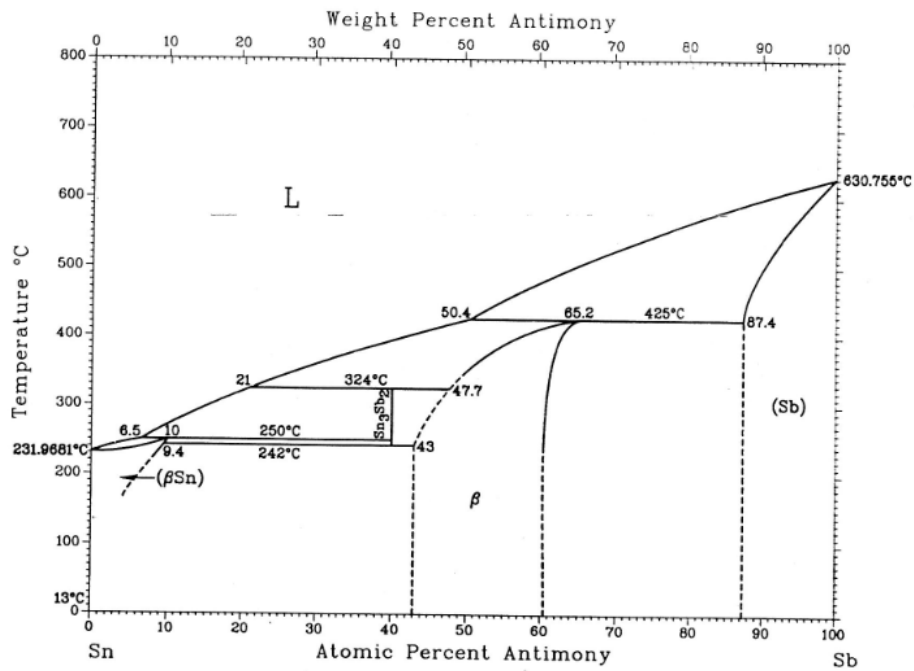
ภาพที่ 2.23 แผนภาพสมดุลเฟสทองแดง - ตะกั่ว

2.3.3.3 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและทองแดง



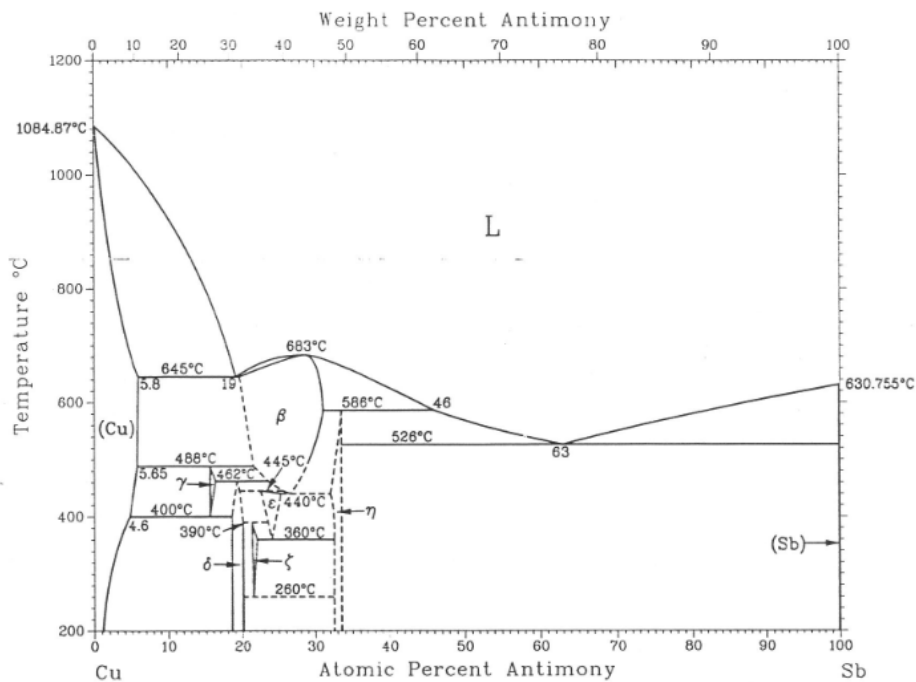
ภาพที่ 2.24 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและทองแดง

2.3.3.4 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและพลวง



ภาพที่ 2.25 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมดีบุกและพลวง

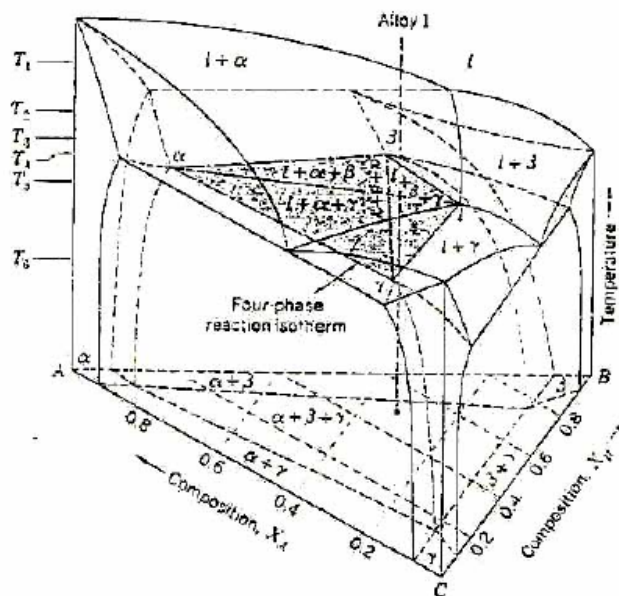
2.3.3.5 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดงและพลวง



ภาพที่ 2.26 แผนภูมิเฟสของโลหะผสมทองแดงและพลวง

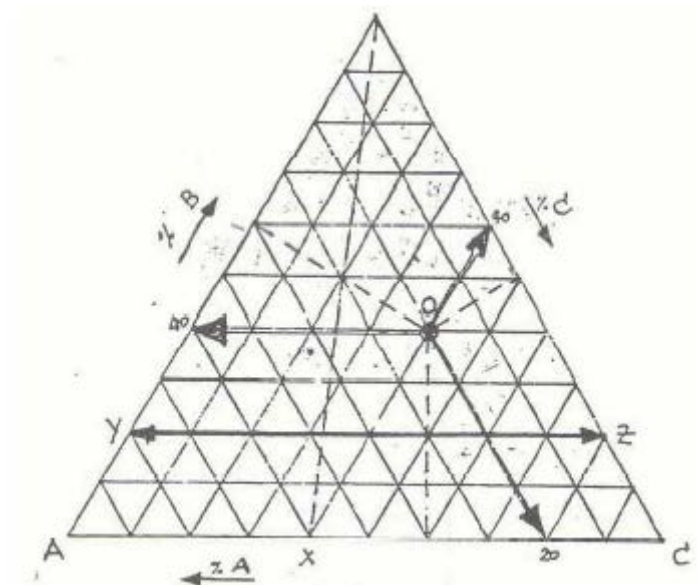
2.3.4 Ternary Phase Diagram

แผนภาพสมดุลเฟสระบบ 3 ธาตุ เป็นแผนภาพสมดุลเฟสที่แสดงการผสมของสารผสม 3 สาร มีลักษณะเป็นรูป 3 มิติ ดังภาพที่ 2.27 โดยแนวตั้งเป็นตัวแปรอุณหภูมิ และแนวนอนเป็นตัวแปรส่วนผสม เขียนเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าโดยจะให้แต่ละมุมของสามเหลี่ยมจะมีส่วนผสม 100% และสารผสมจะเปลี่ยนไปตามด้านของสามเหลี่ยม ฉะนั้นภายในสามเหลี่ยมจะเป็นสารผสมของสามธาตุ



ภาพที่ 2.27 แสดงแผนภาพสมดุลเฟสของระบบ 3 ธาตุ

การใช้งานแผนภาพสมดุลระบบ 3 ธาตุจะใช้เพียงบางส่วน เช่น เมื่อพิจารณาเฉพาะแต่ละด้าน ได้แก่ด้าน AB, AC และ BC จะเห็นได้ว่าเป็นระบบ 2 ธาตุของธาตุผสม A-B, B-C และ A-C ตามลำดับ หรือพิจารณาแนวนอนที่อุณหภูมิหนึ่ง จะได้แผนภาพ 3 มิติ เป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า เรียกว่า Concentration Triangle ดังภาพที่ 2.28



ภาพที่ 2.28 แผนภาพสมมูลที่ตัดในแนวระดับได้ Concentration Triangle

แผนภาพสมมูลที่เป็น Concentration Triangle มีลักษณะดังนี้

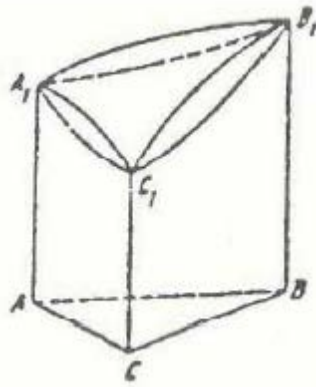
1. ธาตุที่เป็นส่วนผสมจะถูกกำหนดไว้ที่มุมทั้งสามของสามเหลี่ยม
2. แต่ละด้านของสามเหลี่ยมแทนโลหะผสมของ 2 ธาตุ เช่น โลหะผสม AB BC และ AC
3. จุดใดๆภายในแผนภาพสามเหลี่ยม จะแสดงโลหะผสม 3 ธาตุ
4. อัตราส่วนผสมของ 2 ธาตุบนเส้นโยงจากยอดสามเหลี่ยมมายังด้านตรงข้ามมีค่าอัตราส่วนคงที่เสมอ
5. โลหะผสมบนเส้นขนานกับยอดสามเหลี่ยม จะมีธาตุของยอดสามเหลี่ยมเท่ากันตลอด

2.3.4.1 ระบบสมดุลเฟสระบบ 3 ธาตุ

ระบบสมดุลเฟสระบบ 3 ธาตุ แบ่งได้คล้ายระบบสมดุล 2 ธาตุ ที่อาศัยความสามารถละลายของธาตุในสถานะของเหลว และของแข็ง โดยอาจแบ่งได้ดังนี้

1. ระบบสารละลายของแข็ง

ธาตุทั้งสามสามารถละลายเข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ในทุกส่วนผสมทั้งสถานะของเหลวและของแข็ง จะเกิดเฟสเดี่ยวของแข็ง ของเหลว+ของแข็ง และของเหลว ดังภาพที่ 2.29

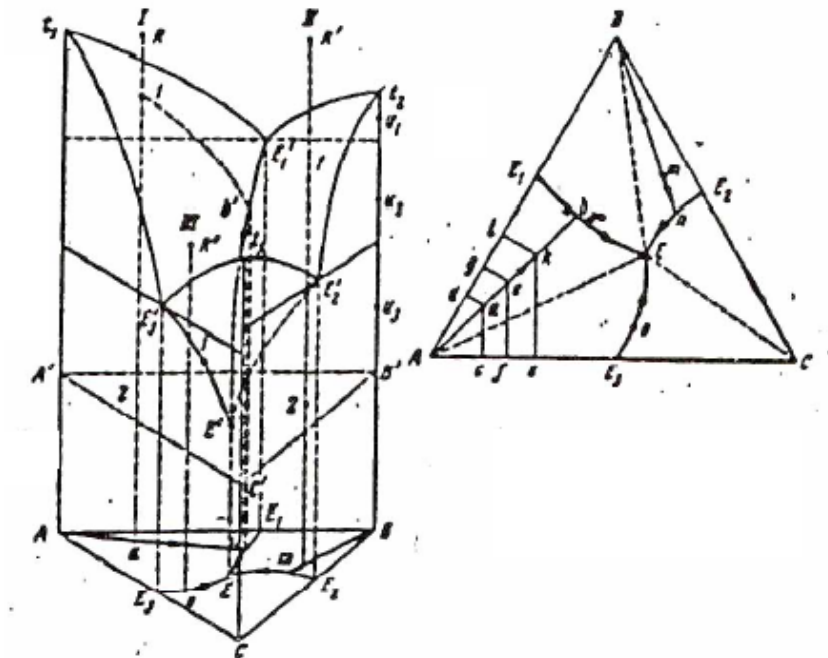


ภาพที่ 2.29 แผนภาพสมมูลเฟสระบบ 3 ชาติของระบบสารละลายของแข็ง

จากภาพที่ 2.29 แผนภาพสมมูลระบบ 3 ชาติ แสดงให้เห็นว่าลักษณะที่แผนภาพปรากฏจะเหมือนกับนำแผนภาพสมมูล 2 ชาติของระบบสารละลายของแข็ง 3 ภาพมาต่อกันเป็นสามมิติ

2. ระบบยูเทคติก

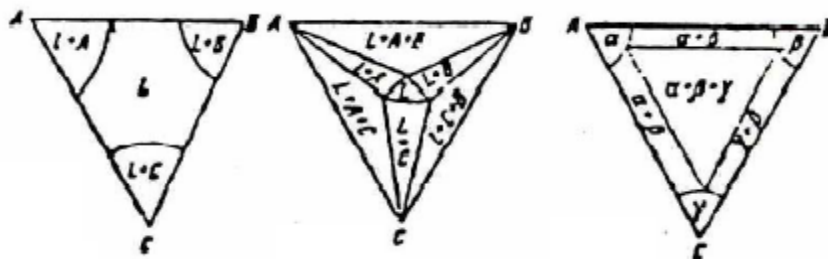
ธาตุทั้ง 3 สามารถละลายเข้าได้อย่างสมบูรณ์เฉพาะสถานะของเหลว และละลายไม่ได้ในสถานะของแข็งเกิดเป็นโครงสร้างยูเทคติก ดังภาพที่ 2.30



ภาพที่ 2.30 แผนภาพระบบยูเทคติก

3. ระบบผสมสารละลายของแข็งกับยูเทคติก

เกิดเมื่อส่วนผสมละลายได้ทุกสถานะที่บางส่วนผสมเท่านั้น ทำให้เกิดจุด Ternary Eutectic ดังภาพที่ 2.31



ภาพที่ 2.31 แผนภาพระบบสารละลายของแข็งกับยูเทคติก

ดังนั้น โครงสร้างที่เกิดขึ้นมีทั้ง ผลึกโคด A,B,C ผลึกโครงสร้าง Binary Eutectic (A+B),(A+C),(B+C) และ ผลึกโครงสร้าง Ternary Eutectic (A+B+C)

2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments: DOE)

การออกแบบการทดลอง Design of Experiments เป็นเครื่องมือคุณภาพที่ถูกใช้ในอุตสาหกรรมนานพอสมควรแล้ว มีจุดประสงค์ที่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอิสระซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า ปัจจัยของกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง แล้วดูผลที่เกิดขึ้นกับตัวแปรตอบสนองของกระบวนการนั้น ในทางปฏิบัติทางอุตสาหกรรม การทดลองที่ได้รับการออกแบบการทดลองมาจะมีการทำงานอย่างเป็นระบบในการสืบค้นในตัวแปรในกระบวนการหรือตัวแปรของผลิตภัณฑ์ หลังจากที่ทำกำหนัดเงื่อนไขของกระบวนการ หรือองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์และมีผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ จึงจะสามารถทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มความสามารถในการผลิต ความน่าเชื่อถือ คุณภาพ และประสิทธิภาพ เนื่องด้วยทรัพยากรที่มีจำนวนจำกัด ดังนั้นการทดลองแต่ละครั้งจะต้องให้สาระข้อมูลที่สำคัญที่สุด ซึ่งการทดลองที่มีการวางแผนที่ดีจะทำให้ได้สาระข้อมูลที่สำคัญและมีคุณภาพมากกว่าทางทดลองที่เกิดขึ้นจากงานที่ไม่ได้รับการวางแผนมาก่อน โดยเฉพาะการทดลองตามแผนที่วางไว้จะสามารถวิเคราะห์เกี่ยวกับอิทธิพลของปัจจัยที่ต้องการศึกษาได้ดีกว่า

2.4.1 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การทดลองที่ได้รับการออกแบบมาโดยมากจะมี 4 ขั้นตอนคือ การวางแผน (Planning) การคัดเลือก (Screening) การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) และการทวนสอบ (Verification)

2.4.1.1 การวางแผน

การวางแผนที่ดีจะช่วยทำให้เกิดปัญหาระหว่างการทดลองน้อยลง ตัวอย่างเช่น บุคลากร อุปกรณ์ ที่ทำการทดลอง เงินทุน และกรรมวิธีการผลิต ซึ่งอาจส่งผลให้ไม่สามารถทำการทดลองได้ครบสมบูรณ์ ถ้าโครงการที่ทำการทดลองนี้มีความสำคัญอันดับรองลงมากกว่าอีกโครงการหนึ่ง ซึ่งทำให้ต้องมีการแบ่งใช้ทรัพยากรบางส่วนไป การแบ่งการทดลองเป็นส่วนๆ ทำให้ผลการทดลองที่ได้มานั้นยังไม่สามารถใช้ได้ และเมื่อทรัพยากรที่ถูกแบ่งไปใช้นั้นกลับคืนมาก็สามารถทำการทดลองได้เหมือนเดิมและดำเนินต่อจากตอนที่หยุดไว้ก่อนหน้านี้ การเตรียมการทดลองขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหาที่กำลังเจอและนี่เป็นขั้นตอนที่อาจจะต้องทำการ

1. กำหนดปัญหา ซึ่งปัญหาที่มีขอบเขตชัดเจนจะช่วยทำให้การกำหนดตัวแปรที่ถูกต้อง เพื่อให้สามารถตอบคำถามได้ตามต้องการ
2. กำหนดวัตถุประสงค์ ซึ่งวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนจะมั่นใจได้ว่าการทดลองที่จะทำนั้นสามารถตอบสนองคำถามได้ตรง และสาระของข้อมูลที่จะได้นี้ใช้ได้จริง
3. การสร้างแผนการทดลองเพื่อให้ได้สาระข้อมูลที่ต้องการ ในขั้นตอนนี้ควรมีการทบทวนถึงสิ่งต่างที่มีความเกี่ยวข้องกัน
4. กระบวนการและการวัดจะต้องอยู่ภายใต้การควบคุม โดยหลักทางทฤษฎีทั้งกระบวนการและระบบการวัดควรจะอยู่ภายใต้การควบคุมทางสถิติด้วยการใช้หลักการทางการควบคุมกระบวนการทางสถิติ ในกรณีที่กระบวนการไม่ได้อยู่ภายใต้การควบคุมแบบสมบูรณ์ แต่อย่างน้อยกระบวนการนั้นๆ ก็ควรจะสามารถทำซ้ำและให้ค่ากระบวนการแบบเดิม รวมทั้งต้องมีการวัดความแปรปรวนของกระบวนการ ซึ่งถ้าความแปรปรวนของกระบวนการนี้ที่ได้มามีค่ามากกว่าความแตกต่างหรืออิทธิพลที่กำลังพิจารณา ผลการทดลองที่ได้นี้อาจไม่ได้ประโยชน์มากนัก

2.4.1.2 การคัดเลือก

ในงานการพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือพิจารณาตามหลักการความสำคัญจำนวนน้อย การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสมของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งบอกด้วยว่าคำตอบสนองมีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง

2.4.1.3 การคัดเลือกการหาค่าที่ดีที่สุด

หลังจากการที่มีการคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญจำนวนน้อย ต้องการที่จะทำการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัยเหล่านี้ ซึ่งค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจะเป็นค่าอะไร ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลองด้วย

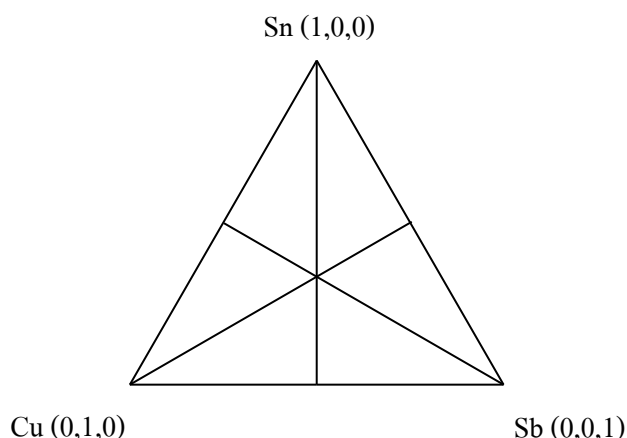
1. ในหัวข้อภาพรวม Fractional Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ตัวแบบของ Two-Level Fractional, Plackett-Burman และ General Full Factorial
2. ในหัวข้อภาพรวม Response Surface Design เป็นการอธิบายถึงวิธีการออกแบบและการวิเคราะห์ตัวแบบของ Central Composite Design และ Box-Behnken
3. ในหัวข้อ Response Optimization เป็นการอธิบายถึงวิธีการหาค่าที่ดีที่สุดในกรณีที่มีค่าตอบสนองมากกว่าหนึ่งค่า (Multiple Response) และมีหลายวิธีที่ใช้การหาค่าที่ดีที่สุดเพื่อเป็นเงื่อนไขของการเกิดค่าตอบสนองหลายๆค่าไปพร้อมกัน

2.4.1.4 การทวนสอบ

การทวนสอบเป็นการทดลองซ้ำเพื่อดูว่าค่าที่วิเคราะห์มาเป็นค่าที่ดีที่สุดนั้น ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีจริงหรือไม่ เช่น การทำการทดลองที่มีเงื่อนไขตามที่มาจากการหาค่าที่ดีที่สุด เพื่อหาขนาดของช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยของค่าตอบสนอง

2.4.3 การออกแบบส่วนผสม (Mixture Design)

แผนการทดลองแบบผสมเป็นเทคนิคซึ่งเหมาะสมสำหรับการพัฒนาสูตร เนื่องจากการทดลองแบบแฟคทอเรียลไม่เหมาะสมเมื่อมีส่วนผสมมากกว่า 1 ชนิด แผนการทดลองแบบผสมอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อส่วนผสมส่วนใดส่วนหนึ่งเปลี่ยน ส่วนประกอบที่เหลือในสูตรจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงด้วย โดยที่ผลรวมของส่วนประกอบทั้งหมดรวมกันเท่ากับ 1.0 หรือ 100% และผลตอบสนองขึ้นกับสัดส่วนของส่วนผสม ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด สามารถแสดงโดยใช้ระบบแกนเส้นตรง 3 เส้น ดังแสดงในภาพที่ 2.32 โดยที่จุดยอดของแต่ละแกนจะมีค่าเท่ากับ 1 หรือ 100% ส่วนปลายที่ตั้งฉากกับฐานจะมีค่าเท่ากับ 0



ภาพที่ 2.32 ความสัมพันธ์ของส่วนผสมในแผนการทดลองที่มีส่วนผสม 3 ชนิด

รูปแบบของการออกแบบส่วนผสม Mixture Design สามารถแบ่งได้ ดังนี้

1. Simplex Lattice ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลอง จะต้องมีส่วนอยู่ในช่วงเดียวกัน และมีการออกแบบการทดลองที่จุดพิกัดอยู่บนแนวแกนในแต่ละด้านของการออกแบบ
2. Simplex Centroid ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลอง จะต้องมีส่วนอยู่ในช่วงเดียวกัน และมีการออกแบบการทดลองที่จุดพิกัดอยู่บนแนวแกนในแต่ละด้านของการออกแบบ และจุดกึ่งกลาง
3. Extreme Vertice สัดส่วนของแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องอยู่ในช่วง 0 – 100 % และเป็นการออกแบบการทดลองที่มีข้อจำกัดสัดส่วนหรือมีข้อจำกัดในการทดลอง
4. D-optimal ส่วนประกอบทั้งหมดในการทดลอง มีสัดส่วนที่ต่างกัน เป็นการเลือกค่าที่ดีที่สุดสามารถใช้ในกรณีที่พื้นที่ในการออกแบบมีข้อจำกัดหลายจุดที่สามารถเป็นไปได้การเลือกพิกัดในการทดลอง จะใช้อัลกอริทึมที่ค่าพิกัดจะไปตามจุดหลักๆ ใน Design Spec เพื่อหาค่าแนวโน้มของค่าดีเทอร์มิแนนต์ของ $x'x$ ที่มากที่สุด เมื่อได้ครบตามรอบที่กำหนดจะหยุดการสุ่ม แล้วนำ Candidate point ที่ได้มาสร้างเป็นการทดลอง

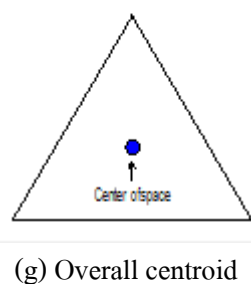
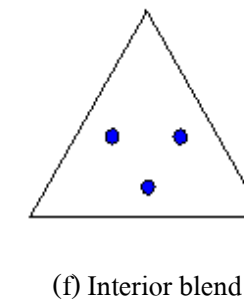
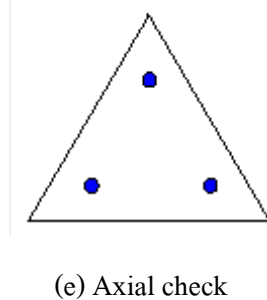
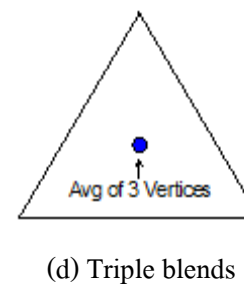
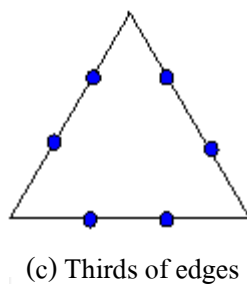
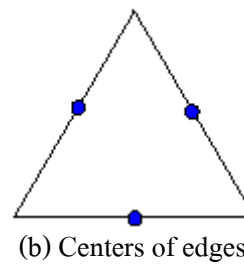
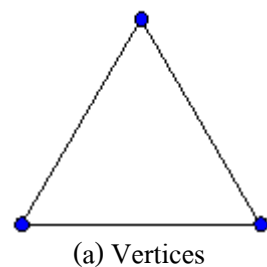
แผนการทดลองแบบผสมสามารถสร้างได้ 2 วิธี คือ

1. แผนอย่างง่ายโดยพิจารณาข้อจำกัดในส่วนประกอบว่ามีข้อกำหนดสูงต่ำเท่าไร แล้วนำมาสร้างพื้นที่ที่เป็นไปได้สำหรับข้อกำหนดของส่วนประกอบทุกตัว หลังจากนั้นจะกำหนดสิ่งทดลองโดยนิยามกำหนดสูตรที่ใช้ส่วนประกอบที่น้อยและมากที่สุดจะอยู่บริเวณมุมของพื้นที่ที่เป็นไปได้ และมักเลือกสูตรที่มีส่วนประกอบทุกตัวในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งมักอยู่ตรงกลางของพื้นที่ที่เป็นไปได้

2. จากแผนการทดลองมาตรฐาน ซึ่งมักนิยามกำหนดสิ่งทดลองให้เป็นไปตามรูปร่างที่สมมาตรของรูปทรงเรขาคณิต เช่น แผนการทดลองแบบซิมเพลก (simplex design) ซึ่งกำหนดที่จุดยอดของสามเหลี่ยมและจุดมัธยฐาน

2.4.4 จุดอ้างอิงในการทดลอง

ในการเลือกจุดที่จะใช้ในการทดลองนั้นจะเป็นการเลือกจุดจาก Candidate set ที่เป็นไปได้ ซึ่ง Candidate set นั้นสามารถแบ่งเป็นประเภทได้ดังนี้



ภาพที่ 2.33 จุดอ้างอิงที่ใช้ในการทดลอง

2.5 การทดสอบความแข็ง

ความแข็ง คือ คุณสมบัติที่สามารถต้านทานหรือทนต่อการเสียรูปแบบพลาสติก โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึงความต้านทานการตัด การขีดการขีด และการตัด การทดสอบความแข็งของวัสดุมีหลายวิธี และการทดสอบความแข็งเพียงวิธีเดียวไม่สามารถตอบเกี่ยวกับสมบัติที่แท้จริงของวัตถุได้อย่างสมบูรณ์ บางครั้งอาจจะต้องนำผลการทดสอบความแข็งที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบความแข็งวิธีอื่น โดยใช้ชิ้นงานทดสอบเดียวกัน การทดสอบความแข็งแต่ละวิธีจะมีจุดประสงค์ของการทดสอบความแข็งแตกต่างกันไป เช่น การทดสอบบางวิธีผลการทดสอบบอกถึงความยาก-ง่ายในการแปรรูปวัสดุนั้นๆ หรืออาจบอกถึงความต้านทานการสึกหรอ ความต้านทานต่อการนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักร หรือสมบัติในการที่จะนำไปทำคลวดสปริง ซึ่งจะเห็นว่าการทดสอบความแข็งให้ความหมายได้กว้างหลายประการ และยังไม่มีการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการทดสอบความแข็งแต่ละวิธีไว้ เพียงแต่มีข้อกำหนดเกี่ยวกับขีดจำกัดของการทดสอบแต่ละวิธีไว้เท่านั้น

2.5.1 วิธีการทดสอบความแข็ง

หากแบ่งประเภทของการทดสอบความแข็ง ตามลักษณะการทดสอบอาจแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

1. การทดสอบความแข็งโดยการขูดขีด ขัดสี (Scratching)
2. การทดสอบความแข็งจากการใช้แรงกดให้เกิดรอยที่ผิว (Indentation)

ซึ่งลักษณะการทดสอบทั้งสองแบบนี้ สามารถจำแนกออกเป็น 5 วิธีแตกต่างกันตามจุดประสงค์ของการใช้งาน หรือปัจจัยที่จะมีผลกระทบต่อวัสดุนั้นๆเมื่อใช้งาน ซึ่งมีวิธีการทดสอบ ดังนี้คือ

1. การวัดความต้านทานต่อการตัดหรือเจาะ (Resistance to cutting or drilling)
2. การวัดความต้านทานต่อการเสียดสี (Resistance to abrasion)
3. การวัดความต้านทานต่อการกดให้เกิดรอยบุ๋มถาวร (Resistance to permanent indentation)
4. การวัดการสะสมพลังงานภายใต้แรงกระแทก (Energy absorption under impact loads)
5. การวัดความต้านทานต่อการขีดข่วน (Resistance to scratching)

2.5.1.1 การวัดความต้านทานต่อการตัดหรือเจาะ

การทดสอบความสามารถในการนำไปตกแต่งด้วยเครื่องจักร (Machinability) เป็นการทดสอบความแข็งโดยการพิจารณาจากความยากง่ายของการนำไปตัดหรือเจาะด้วยเครื่องจักร ซึ่งเป็นวิธีที่อาศัยประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงานกับเครื่องจักร แล้วสรุปว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อนกว่ากันเท่านั้น แต่ไม่สามารถระบุค่าความแข็งเป็นตัวเลขได้ จึงไม่เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่ได้มาตรฐาน

2.5.1.2 การวัดความต้านทานต่อการเสียดสี

การทดสอบการเสียดสี (wear hardness test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่พิจารณาจากการสึกหรอของผิววัสดุเมื่อใช้งานที่ต้องเสียดสีกัน ถ้าวัสดุใต้อ่อนกว่าก็จะถูกเสียดสีทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่า การทดสอบโดยการเสียดสีนี้อาจจะใช้ตะไบทดสอบได้ (File test) คือ ทำการตะไบที่ผิวงานทดสอบ ถ้าผิวงานแข็งก็จะตะไบไม่เข้าผิวงานสึกหรอน้อย แต่ถ้าผิวงานอ่อนก็จะสามารถตะไบได้ลึก ผิวงานสึกหรอมาก ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นวิธีตรวจสอบที่ง่าย สะดวกรวดเร็ว แต่ไม่สามารถระบุค่าความแข็งของผิวทดสอบได้และผลการทดสอบก็ไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบด้วย การทดสอบโดยการเสียดสีนี้สามารถระบุได้เพียงว่าวัสดุใดแข็งหรืออ่อนกว่ากันเท่านั้น จึงไม่เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่ได้มาตรฐานเช่นเดียวกัน

2.5.1.3 การวัดความต้านทานต่อการขีดข่วน

การทดสอบการขีดข่วน (Scratch hardness test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่ได้รับความนิยมและนิยมใช้ของนักธรณีวิทยาที่ใช้ในการทดสอบความแข็งของหินแร่ การทดสอบการขีดข่วนเป็นวิธีการทดสอบที่สะดวกรวดเร็ว เพราะอาศัยหลักการที่ว่าวัสดุที่แข็งกว่าจะสามารถขีดข่วนให้วัสดุที่อ่อนกว่าเป็นรอยได้ แต่วัสดุที่อ่อนกว่าจะไม่สามารถขีดข่วนให้วัสดุที่แข็งกว่าเป็นรอยได้

2.5.1.4 การวัดการสะสมพลังงานภายใต้แรงกระแทก

การวัดการสะสมพลังงานภายใต้แรงกระแทกจะทดสอบโดยใช้ลูกตุ้มกระทบผิวแล้วสะท้อนกลับ (Rebound hardness test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งโดยการปล่อยลูกตุ้มให้กระทบผิวชิ้นงานทดสอบแล้วพิจารณาค่าความสูงของการสะท้อนกลับของลูกตุ้มหลังการตกกระทบ ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าเป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่ใช้แรงเคลื่อนที่กระทบผิววัสดุ ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกวิธีการทดสอบความแข็งแบบนี้ว่า การทดสอบความแข็งทางพลวัต (Dynamic hardness test) และเป็นวิธีที่นิยมใช้ทดสอบความแข็งโลหะที่อุณหภูมิสูง เพราะลูกตุ้มจะไม่ได้รับผลกระทบของความร้อน เนื่องจากระยะเวลาที่ตกกระทบและสัมผัสผิวชิ้นงานทดสอบนั้นน้อยมาก จากหลักการทดสอบดังกล่าวนี้ ถูกนำไปสร้างอุปกรณ์ทดสอบความแข็งที่นิยมใช้เรียกว่า ชอร์สเคลโรสโคป (Shore-scleroscope) จึงเรียกการทดสอบนี้ว่าการทดสอบความแข็งด้วยชอร์สเคลโรสโคป

2.5.1.5 การวัดความต้านทานต่อการกดให้เกิดรอยบุ๋มถาวร

การทดสอบโดยการกดให้เกิดรอยบุ๋ม (Indentation hardness test) เป็นวิธีการทดสอบความแข็งที่นิยมใช้ในงานวิศวกรรม เพราะเป็นวิธีการทดสอบที่ได้มาตรฐาน ให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องแน่นอนและสามารถระบุค่าความแข็งได้เนื่องจากใช้เครื่องทดสอบที่เป็นมาตรฐาน ในการทดสอบสำหรับหลักการของการทดสอบความแข็งโดยวิธีนี้คือใช้เครื่องทดสอบกดลงบนผิวชิ้นงานทดสอบ ทำให้เกิดรอยบุ๋ม

ถาวร (Permanent indentation แล้ววัดขนาดความโตหรือความลึกของรอยบุ๋ม ถ้าทดสอบกับวัสดุอ่อนก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดใหญ่หรือลึกมาก แต่ถ้าทดสอบกับวัสดุแข็งก็จะทำให้เกิดรอยบุ๋มขนาดเล็กหรือลึกลittle จากหลักการดังกล่าวถูกนำไปใช้สร้างเครื่องทดสอบมาตรฐานและวิธีการทดสอบที่เป็นมาตรฐาน

2.5.2 การทวนสอบเครื่องทดสอบความแข็ง (Verification of hardness testing machine)

เครื่องทดสอบความแข็งเมื่อถูกใช้งานไปนานๆค่าพิกัดต่างๆของเครื่อง เช่น แรงกด หัวกด อาจมีความคลาดเคลื่อนไปจากเดิมทำให้ค่าความแข็งที่ได้จากการทดสอบผิดพลาดไป จึงต้องมีการทวนสอบเพื่อปรับปรุงสภาพของเครื่องให้อยู่ในพิกัด การทวนสอบเครื่องทดสอบความแข็งสามารถทำได้ 2 วิธีคือ

2.5.2.1 การทวนสอบทางตรง

การทวนสอบทางตรงเป็นการตรวจสอบพิกัดการทำงานของอุปกรณ์ของเครื่องทดสอบความแข็ง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนคือ

1. การทวนสอบแรงหัวกด

สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์และวิกเกอร์ส จะใช้เครื่องมือวัดขนาดแรงกด (Elastic proving device) ซึ่งในแต่ละเครื่องจะมีแรงกดหลายขนาด ทำการวัดแต่ละขนาดของแรงกดจำนวน 3 ครั้ง เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนของขนาดแรงกดอยู่ในช่วง $\pm 0.2\%$ ตามมาตรฐาน ISO 156 และ 146 สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ทำการทดสอบเช่นเดียวกันเพียงแต่แรงกดแบ่งออกเป็นแรงกดนำ และแรงกดรวมตามมาตรฐาน ISO 716 เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 0.2\%$ เช่นเดียวกัน

2. การทวนสอบหัวกด

สำหรับหัวกดแบบทรงกลมของเครื่องทดสอบแบบบริเนลล์และร็อคเวลล์ หัวกดต้องเป็นเงาวาวและปราศจากรอยตำหนิ สำหรับหัวกดเพชรรูปพีระมิดและรูปกรวยของเครื่องทดสอบแบบวิกเกอร์และร็อค-เวลล์ ด้านข้างของพีระมิดและกรวยจะต้องเป็นเงาวาว ปราศจากรอยตำหนิ หัวกดของเครื่องทดสอบทั้ง 3 ชนิด จะต้องถูกนำมาวัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางมุมของยอดแหลมและวัดความแข็ง ค่าทั้งหมดนี้จะต้องอยู่ในเกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน ISO 156, 146, และ 716 มิฉะนั้นจะไม่ผ่านการทวนสอบ

3. การทวนสอบเครื่องมือวัด

สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบบริเนลล์และวิกเกอร์ส เครื่องมือวัดความแข็งเป็นแบบไมโครมิเตอร์สำหรับวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและเส้นทแยงมุมของรอยกด หลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาเทียบกับตารางเพื่อหาค่าความแข็ง เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน ISO 156 และ 146 กำหนดอยู่ในช่วง $\pm 0.5\%$ สำหรับเครื่องวัดความแข็งแบบร็อคเวลล์ เครื่องมือวัดจะใช้เป็นแบบเครื่องวัดความลึกของรอยกดแล้วอ่านค่าความแข็งได้โดยตรงจากนาฬิกาวัดความแข็ง

เกณฑ์กำหนดความคลาดเคลื่อนตามมาตรฐาน ISO 716 กำหนดไม่มีค่า $\pm 0.001\%$ หรือประมาณ $\pm 0.5\%$ ของแต่ละหน่วยสเกลที่ใช้วัด

2.5.2.2 การทดสอบทางอ้อม

การทดสอบทางอ้อม คือ การใช้แผ่นความแข็งมาตรฐานในการทดสอบเครื่องทดสอบความแข็งทั้ง 3 ชนิด โดยทดสอบแต่ละขนาดของแรงกดและหัวกด เพื่อตรวจสอบค่าความแข็งที่ได้มาเทียบกับค่าความแข็งของแผ่นความแข็งมาตรฐาน ตามมาตรฐาน ISO

2.5.3 การสอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐาน (Calibration of standardized block)

แผ่นความแข็งมาตรฐานเมื่อเก็บไว้นานๆ ค่าความแข็งอาจจะเปลี่ยนได้จึงจำเป็นต้องตรวจสอบและทำการสอบเทียบว่าอยู่ในมาตรฐานหรือไม่ การตรวจสอบแผ่นความแข็งมาตรฐานมีวิธีดังนี้

1. การตรวจสอบด้วยตาเปล่า แผ่นความแข็งต้องเป็นเนื้อเดียวกันตลอดและสม่ำเสมอ มีผิวที่เรียบ
2. แผ่นความแข็งมาตรฐานจะต้องไม่เป็นแม่เหล็ก
3. จะต้องมีผิวราบสองด้านขนานกัน
4. ผิวราบจะต้องไม่มีรอยขีดข่วน

ขั้นตอนการสอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐาน

1. เครื่องทดสอบความแข็งที่จะใช้สอบเทียบแผ่นความแข็งมาตรฐานจะต้องผ่านการรับรองในหัวข้อที่กล่าวมาแล้ว การทดสอบจะทำได้ในอุณหภูมิ $23 \pm 5^\circ \text{C}$
2. เครื่องทดสอบความแข็งแบบบริเนลล์ เวลาที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 6-8 วินาที เวลาถอยค้ำอยู่บนผิวอยู่ระหว่าง 10-15 วินาที
3. เครื่องทดสอบความแข็งวิกเกอร์ส เวลาที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 6-8 วินาที ความเร็วอยู่ระหว่าง 0.05-1 มม./วินาที
4. เครื่องทดสอบความแข็งแบบรอกเวลล์ เวลาที่ใช้กดอยู่ระหว่าง 1-10 วินาที เวลาที่ใช้กดแรงกดรวมอยู่ระหว่าง 3-5 วินาที
5. ทำการทดสอบหาค่าความแข็ง (Non-uniformity) ซึ่งได้จากการนำค่าความแข็งสูงสุดลบต่ำสุด กำหนดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนไว้ในมาตรฐาน ISO 726, 640 และ 674 ซึ่งเป็นการพิสูจน์ว่าแผ่นความแข็งมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้ได้หรือไม่

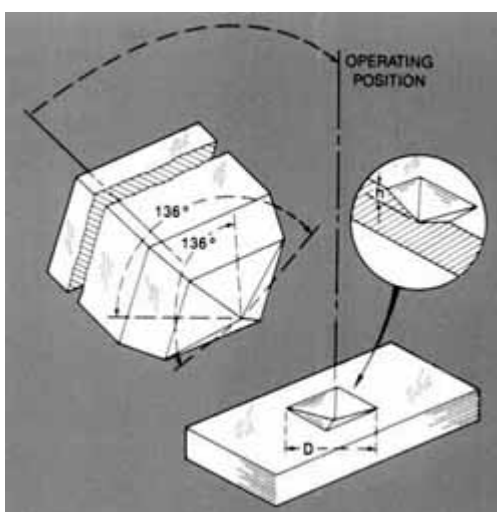
2.5.1 Vickers Micro Hardness

Vickers Micro Hardness คือ การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ ซึ่งเป็นการวัดความแข็งในระดับจุลภาค โดยใช้แรงกดขนาดน้อยๆ ตั้งแต่ 50 – 1000 กรัมแรง (gf) หรือ 0.4903 – 9.807 นิวตัน โดย

สามารถหาค่าความแข็งได้จากสูตรความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงกดหัวเพชรรูปพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมมุมระหว่างด้านประกอบมุมยอดที่อยู่ตรงข้ามเท่ากับ 136° กับพื้นที่ของรอยกดที่เกิดบนผิวของชิ้นงานทดสอบ คือ

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{(2F \sin 136^\circ / 2)}{d^2} = 1.8544 \left(\frac{F}{d^2} \right) \quad (2.4)$$

โดย HV คือ ความแข็งวิกเกอร์ F คือ แรงกด (กรัมแรง) S คือ พื้นที่ของรอยกด (mm^2) และ d คือ ค่าเฉลี่ยความยาวของเส้นทแยงมุม (mm)



ภาพที่ 2.34 Vickers Micro Hardness

หน่วยที่ใช้วัด คือ Vickers (HV) หรือ Diamond Pyramid Hardness เนื่องจากหัวกดเป็นเพชรรูปพีระมิดทำมุม 136° โดยใช้เวลาในการกด 10-15 วินาที รอยกดที่เกิดขึ้นจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส และความลึกของรอยกดจะมีค่าอยู่ที่ $1/7$ ของความยาวเส้นทแยงมุม

โดยปกติแล้วชิ้นงานที่จะทดสอบต้องมีการเตรียมพื้นผิว หากชิ้นงานมีขนาดเล็ก ยังต้องการความเรียบผิวมาก และในการวัดรอยกดจะใช้กล้องจุลทรรศน์ ที่มีกำลังขยายประมาณ 500 เท่า มีค่าความถูกต้อง ± 0.5 ไมครอน นอกจากนี้ผู้วัดที่แตกต่างกันก็ยังมีค่าความถูกต้องอยู่ที่ ± 0.2 ไมครอน ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการเพิ่มความระมัดระวังให้มากขึ้นและขึ้นกับประสบการณ์ของผู้วัดด้วย

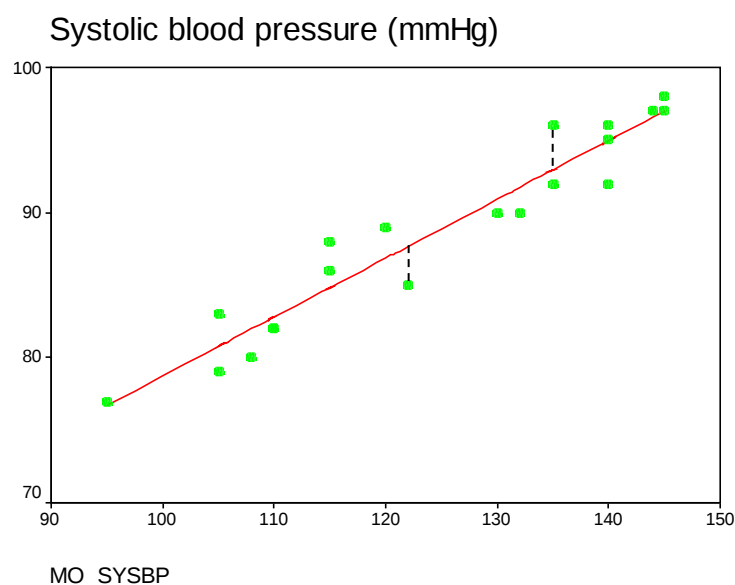
2.6 Regression

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นวิธีการทางสถิติอย่างหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยแบ่งเป็นตัวแปรอิสระ (Independent variable) และ

ตัวแปรตาม (Dependent variable) ผลของการศึกษาจะให้ทราบถึง ขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตาม และแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม ในการวิเคราะห์การถดถอย มักเรียกตัวแปรอิสระว่า ตัวทำนาย (Predictor) หรือตัวแปรกระตุ้น (Stimulus variable) ส่วนตัวแปรตาม มักเรียกว่า ตัวแปรตอบสนอง (Response variable) หรือตัวแปรเกณฑ์ (Criterion variable)

2.6.1 Linear Regression

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่ตัวแปรอิสระส่วนใหญ่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ส่วนตัวแปรตามเป็นจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเท่านั้น รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม สามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear model) ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (กรณีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย) จะเป็นการนำข้อมูลจากตัวแปรที่ทำการศึกษามาวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ที่สามารถบอกแนวโน้มของความสัมพันธ์โดยใช้แผนภาพเส้นตรงแทนได้ และจะทำการหาเส้นตรงที่ดีที่สุดเพื่อเป็นตัวแทนของรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษา เส้นตรงที่ดีที่สุดจะมีเพียงเส้นเดียว โดยถือหลักการว่าต้องมีผลรวมของระยะห่างกำลังสองจากเส้นกราฟถึงทุกๆจุดนั้นมีค่าน้อยที่สุด เรียกหลักการนี้ว่า วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Squares)



ภาพที่ 2.35 Linear Regression

จากเส้นตรงดังกล่าวใช้กระบวนการทางสถิติเพื่อหาค่าคงที่และสัมประสิทธิ์สมการ สร้างเป็นแบบจำลองในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ เรียกว่า สมการถดถอยเชิงเส้น หรือสมการพยากรณ์ หลังจากได้แบบจำลองแล้วจึงทำการตรวจสอบความสอดคล้องของแบบจำลอง เพื่อดูว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้น มีความสอดคล้องและเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ โดยมีการทดสอบทางสถิติดังต่อไปนี้

1. ทดสอบความเหมาะสมของโมเดล (เป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกันหรือไม่) จะใช้สถิติทดสอบ ANOVA
2. ทดสอบค่าคงที่ และค่าสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอย ทีละตัว โดยใช้สถิติทดสอบ t
3. พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบพหุ (Multiple R) และค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ (Standard Error of Estimate)

กระบวนการดังกล่าวทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นจนจบจะใช้การคำนวณและการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ ด้วยการคำนวณตัวเลขเอง หรือสามารถใช้โปรแกรมวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติทำการวิเคราะห์ให้ก็ได้ ข้อตกลงเบื้องต้นในการใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น

1. ตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม มีมาตรวัดเป็น Interval ขึ้นไป (อนุญาตให้ตัวแปรอิสระบางตัว มีมาตรวัดเป็น Norminal หรือ Ordinal ได้บ้าง โดยจะต้องทำการเปลี่ยนตัวแปรอิสระที่มีมาตรวัดเป็น Norminal หรือ Ordinal เหล่านั้น เป็นตัวแปรหุ่น แล้วจึงทำการวิเคราะห์การถดถอย โดยใช้ตัวแปรหุ่นที่เกิดขึ้นแทนตัวแปรเดิมที่มี)
2. ข้อมูลของตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม จะต้องสุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติ
3. ตัวแปรอิสระจะต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (การเกิดความสัมพันธ์กันเองของตัวแปรอิสระ เรียกว่า การเกิด Multicollinearity เฉพาะในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ)
4. ข้อมูลจะต้องไม่มีความสัมพันธ์ภายในตัวเอง
5. ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการพยากรณ์ จะต้อง
 - 5.1 มีการแจกแจงแบบปกติ (Assumption of Normality)
 - 5.2 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0
 - 5.3 มีความแปรปรวนคงที่ (Homogeneity of Variance)
 - 5.4 ความคลาดเคลื่อนเป็นอิสระกัน (Assumption of Autocorrelation)

ตัวแปรหุ่น (Dummy variable) เป็นการสร้างตัวแปรใหม่ขึ้นใช้แทนตัวแปรเดิม โดยอาศัยชุดตัวเลข 0 และ 1 เรียงประกอบกันเพื่อใช้แทนลักษณะต่างๆ ของข้อมูลในตัวแปรนั้น ซึ่งตัวแปรที่จะนำมาสร้างตัวแปรหุ่น จะต้องเป็นตัวแปรที่บรรจุข้อมูลเชิงคุณภาพ (มาตรวัดเป็นนามบัญญัติ หรืออันดับ)

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการสร้างตัวแปรหุ่น ของตัวแปร “สถานภาพสมรส”

สถานภาพสมรส (STATUS)	ค่าเดิมของข้อมูล (เป็นรหัส)	ตัวแปรหุ่น	
		STAT1	STAT2
โสด	1	1	0
แต่งงาน	2	0	1
อื่นๆ	3	0	0

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างการสร้างตัวแปรหุ่น ของตัวแปร “ระดับการศึกษา”

ระดับการศึกษา	ค่าเดิมของข้อมูล	ตัวแปรหุ่น			
		EDU1	EDU2	EDU3	EDU4
ไม่ได้รับการศึกษา	1	1	0	0	0
ประถมศึกษา	2	0	1	0	0
มัธยมศึกษา	3	0	0	1	0
อาชีวศึกษา	4	0	0	0	1
อุดมศึกษา	5	0	0	0	0

2.6.1.1 Simple Linear Regression

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย จะประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว และตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัว การวิเคราะห์เป็นการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสอง และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม เช่น

- การพยากรณ์ระดับ Carbon monoxide ในผู้สูบบุหรี่ เมื่อทราบปริมาณการสูบบุหรี่ต่อวัน
- การพยากรณ์น้ำหนักของทารก เมื่อทราบอายุของมารดา
- การพยากรณ์ผลการสอบปลายภาค เมื่อทราบผลการสอบกลางภาค เป็นต้น

1. แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (2.5)$$

$$Y' = b_0 + b_1 X \quad (2.6)$$

$$Z'_Y = B_1 Z_X \quad (2.7)$$

โดย X, Z_X	คือ ค่าของตัวแปรอิสระในรูปคะแนนดิบ และคะแนนมาตรฐาน
Y	คือ ค่าของตัวแปรตาม
Y', Z'_Y	คือ ค่าพยากรณ์ของตัวแปรตามในรูปคะแนนดิบ และคะแนนมาตรฐาน
β_0 และ β_1	คือ ค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรอิสระในสมการ (ประชากร)
b_0 และ b_1	คือ ค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรอิสระในสมการ (กลุ่มตัวอย่าง)
B_1	คือ สัมประสิทธิ์หน้าตัวแปรอิสระในสมการ (คะแนนมาตรฐาน)
ε	คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

โดย สมการที่ 2.5 แสดงสมการถดถอยของประชากร สมการที่ 2.6 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่าง และสมการที่ 2.7 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่าง ในรูปคะแนนมาตรฐาน

2. การหาค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ในสมการ

$$Y' = b_0 + b_1 X \quad (2.8)$$

โดย สมการที่ 2.8 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่าง สามารถหาค่าของ b_0 และ b_1 ได้จาก สูตร

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (2.9)$$

$$b_1 = r_{xy} \frac{S_y}{S_x} \quad (2.10)$$

โดย $\bar{Y}, \bar{X}$ คือ ค่าเฉลี่ยของตัวแปร Y และ X
 r_{xy} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร X กับ Y

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$r_{xy} = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[N \sum X^2 - (\sum X)^2][N \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (2.11)$$

โดย S_Y, S_X คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร Y และ X

3. การหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการพยากรณ์ (Standard Error of Estimation) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12 หรือสมการที่ 2.13

$$S_{Y.X} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{n - 2}} \quad (2.12)$$

$$S_{Y.X} = S_Y \sqrt{\frac{(1 - r^2)(n - 1)}{n - 2}} \quad (2.13)$$

4. การทดสอบความมีนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์การถดถอย มีสมมติฐานของการทดสอบ $H_0 : \beta = 0$ และ $H_1 : \beta \neq 0$ โดยสถิติทดสอบ เป็นการทดสอบแบบสองทาง

$$t = \frac{b - \beta}{\sqrt{\frac{S_{Y.X}^2}{(n-1)S_X^2}}} \quad (2.14)$$

$$df = n-2 \quad (2.15)$$

5. อาณาเขตวิกฤตและการสรุปผล จะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า t ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า $t_{\alpha, n-2}$ ที่เปิดจากตาราง หรือ t ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่า $-t_{\alpha, n-2}$

6. ช่วงความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ ของการประมาณค่า Y จากสมการที่ 2.8 สามารถใช้ค่า Y' มาประมาณค่า Y ที่จะเกิดขึ้นได้ เมื่อ $X=X_i$ ดังนี้

ช่วงความเชื่อมั่น $(1-\alpha)100\%$ ของ Y

$$Y = Y' \pm t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \cdot S_{Y.X} \sqrt{\left(1 + \frac{1}{n}\right) + \frac{(X_i - \bar{X})^2}{(n-1)S_X^2}} \quad (2.16)$$

2.6.1.2 Multiple Linear Regressions

จะประกอบด้วยตัวแปรตาม 1 ตัว และ ตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป การวิเคราะห์เป็นการหาขนาดของความสัมพันธ์ และสร้างรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการพยากรณ์ค่าของตัวแปรตาม โดยใช้ตัวแปรอิสระที่ศึกษา เช่น ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอายุ เพศ ปัญหาในการทำงาน ความขัดแย้ง ในครอบครัว กับความรู้สึกเก็บกด ของผู้ป่วยในโรงพยาบาลแห่งหนึ่ง เป็นต้น

1. แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (2.17)$$

$$Y' = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n$$

(2.18)

$$Z'_Y = B_1 Z_{X_1} + B_2 Z_{X_2} + \dots + B_n Z_{X_n} \quad (2.19)$$

โดยสมการที่ 2.17 แสดงสมการถดถอยของประชากร สมการที่ 2.18 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่าง และสมการที่ 2.19 แสดงสมการถดถอยของกลุ่มตัวอย่างในรูปคะแนนมาตรฐาน การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบเชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระหลาย ๆ ตัว กับตัวแปรตาม ดังนั้นในการสร้าง

แบบจำลองสมการพหุคูณ จะพิจารณาจากการมีตัวแปรอยู่ในระบบสมการ ซึ่งเรียกว่า การนำตัวแปรเข้าระบบสมการที่นิยม มีทั้งหมด 4 วิธี คือ

1. All Enter ตัวแปรอิสระทุกตัวมีอิทธิพลต่อตัวแปรตามจึงนำตัวแปรอิสระทุกตัวเข้าระบบสมการพร้อมๆกันในทีเดียว
2. Forward กำหนดให้เริ่มต้นสร้างสมการยังไม่มีตัวแปรใดอยู่ในระบบสมการ จากนั้นให้เริ่มทำการสร้างระบบสมการโดยนำตัวแปรอิสระที่มีขนาดของอิทธิพลสูงสุด (โดยพิจารณาจากค่า Partial F ไม่ได้ดูจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์) เข้าไปสร้างสมการกับตัวแปรตามก่อน จากนั้นจึงนำตัวแปรอิสระที่เหลือที่มีขนาดของอิทธิพลรองลงไปเข้าทีละตัว และจะหยุดการนำตัวแปรอิสระเข้าระบบสมการหากพบว่าตัวแปรนั้นมีขนาดของอิทธิพลน้อย (ไม่นับสำคัญ) หรือไม่มีอิทธิพลเลย
3. Backward กำหนดให้เมื่อเริ่มสร้างสมการมีตัวแปรอิสระทุกตัวอยู่ครบในระบบสมการ จากนั้นให้ทำการดึงตัวแปรอิสระที่มีขนาดของอิทธิพลน้อยที่สุด (ไม่นับสำคัญ) ออกจากสมการทีละตัว (โดยพิจารณาจากค่า Partial F) จนกระทั่งเหลือตัวแปรในระบบสมการเฉพาะที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม
4. Stepwise นำตัวแปรอิสระเข้าสมการทีละตัวเช่นเดียวกับ Forward และเมื่อตัวแปรนั้นเข้าไปอยู่ในระบบสมการแล้ว จะทำการตรวจสอบย้อนกลับโดยวิธี Backward อีกทีหนึ่ง ในทุกครั้งที่มีการนำตัวแปรอิสระเข้าสมการ

สำหรับการประมาณค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ในสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุ จะใช้วิธีการประมาณที่เรียกว่า การประมาณโดยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Estimation: MLE) โดยวิธีดังกล่าวนี้สามารถประมาณค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ในสมการได้ทั้งในกรณีที่ตัวแปรอิสระมีจำนวน 1 ตัว หรือมากกว่า 1 ตัว โดยมีข้อกำหนดเพิ่มเติมสำหรับตัวแปรอิสระแต่ละตัว คือ ตัวแปรอิสระจะต้องไม่มีความสัมพันธ์กันเอง (Intercollinearity หรือเกิด Multicollinearity) การหาค่าคงที่ และสัมประสิทธิ์ในสมการ จะใช้วิธีการคำนวณโดยรูปแบบเมตริกซ์ ซึ่งในที่นี้จะไม่กล่าวถึง

2.7 ANOVA

เป็นวิธีการทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Mean) ของประชากรที่มีตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป

2.7.1 จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ทดสอบความแตกต่างระหว่าง ค่าเฉลี่ย (Mean) ของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 2 กลุ่มขึ้นไป อันเกิดจากการจัดกระทำที่ต่างกัน จุดเด่นของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

1. ใช้ในการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยจากกลุ่มตัวอย่างมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไป
2. ใช้วิเคราะห์ข้อมูลสำหรับการวิจัยที่ออกแบบซับซ้อนหรือมีตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัวได้
3. สามารถทดสอบได้ว่าตัวแปรอิสระสองตัวหรือมากกว่ามีปฏิสัมพันธ์ (interaction) กันหรือไม่

2.7.2 ข้อตกลงเบื้องต้น

เนื่องจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนใช้ F เป็นสถิติทดสอบ โดยที่ F เป็นอัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean Square Between) กับความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean Square Within) การวิเคราะห์ความแปรปรวนจึงมีข้อตกลงเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ดังนี้

1. กลุ่มตัวอย่างได้มาโดยสุ่มจากประชากร (Random Sampling) และหากกลุ่มตัวอย่างเลือกมาโดยการสุ่มจากประชากรที่มีการกระจายเป็นโค้งปกติ ในการคำนวณค่า F ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Mean Square Between) และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Mean Square Within) จะเป็นอิสระจากกัน
2. ข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์จะต้องได้มาจากประชากรที่มีความแปรปรวนเท่ากันทุกกลุ่ม (Variance Homogeneity)
3. ความเป็นปกติ (Normality) ตัวอย่างแต่ละกลุ่มสุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงปกติ หากจำเป็นต้องแปลงข้อมูล (Transformation) ให้มีการแจกแจงแบบโค้งปกติก่อน หรือเพิ่มตัวอย่างให้มีขนาดมากขึ้น และใช้กลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเท่าๆ กันในแต่ละกลุ่มจะหลีกเลี่ยงการละเมิดข้อตกลงข้อนี้ได้
4. ข้อมูลของตัวแปรตามที่จะนำมาวิเคราะห์ต้องอยู่ในมาตราอันดับหรืออัตราส่วน ส่วนตัวแปรอิสระเป็นตัวแปรประเภทพหุวิภาค (Polytomous)

2.7.3 หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน

ความแปรปรวนของข้อมูลหรือคะแนน หรือค่าการวัดนั้น พิจารณาจากแหล่งที่มา แบ่งได้เป็น 3 แหล่ง คือ

1. ความแปรปรวนรวม (Total group Variance หรือ mean square total: MS_T) เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากคะแนนแต่ละตัวเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของกลุ่มรวม
2. ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-Treatment Variance หรือ mean square between group: MS_B) เป็นความแปรปรวนของค่าตัวแปรตามระหว่างตัวแปรต้นแต่ละกลุ่ม ซึ่งความแปรปรวนที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของตัวแปรต้น หรืออาจเกิดจากอิทธิพลของตัวแปรต้นเกิดขึ้นอย่างสุ่ม (Chance) ที่เนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างตัวอย่างหรือเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการทดลอง เช่น ใช้การวัดที่แตกต่างกัน

3. ความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within Treatment Variance หรือ mean square within group: MS_w) เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากคะแนนแต่ละตัวในแต่ละกลุ่มเบี่ยงเบนจากค่าเฉลี่ยของแต่ละกลุ่ม ซึ่งความแปรปรวนชนิดนี้ คือ ความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนนั่นเอง

การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นการนำความแปรปรวนของตัวแปรหรือปรากฏการณ์มาแบ่งเป็นส่วน ๆ ตามความต้องการของผู้วิจัย แล้วนำความแปรปรวนแต่ละส่วนมาเปรียบเทียบกับตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย กล่าวคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็นการเปรียบเทียบความแปรปรวนอันเกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม ซึ่งเป็นผลของตัวแปรอิสระกับความแปรปรวนภายในกลุ่มหรือความคลาดเคลื่อนว่าตัวใดมีค่ามากกว่ากัน ในการทดสอบสมมติฐานจึงใช้อัตราส่วนของความแปรปรวนอันเกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่ม (Between-group Variance) กับความแปรปรวนภายในกลุ่ม อันเกิดจากความคลาดเคลื่อน (Within-group หรือ Error Variance) เป็นหลักในการตัดสินใจ และเรียกอัตราส่วนนี้ว่า F-ratio

2.7.4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

2.7.4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว หรือ One-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวเดียวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ (Qualitative Variable) ที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่าง ๆ เช่น เก่ง-ปานกลาง-อ่อน ดีมาก-ดี-พอใช้-แย่มาก เป็นต้น ส่วนตัวแปรตามอาจมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ (Quantitative Variable) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้ สูตรและตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สูตรความแปรปรวนทางเดียว

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean square	F-statistic
Between groups (Treatment)	$SSB = \sum_{i=1}^k \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T^2}{n}$	k-1	$MSB = \frac{SSB}{k-1}$	$F = \frac{MSB}{MSW}$
Within groups (Error)	$SSW = SST - SSB$	n-k	$MSW = \frac{SSW}{n-k}$	
Total	$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - \frac{T^2}{n}$	n-1		

โดย $SST = SSB + SSW$ จากตารางที่ 2.3 สามารถเขียนโดยสรุปได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สรุปสูตรความแปรปรวนทางเดียว

Source of Variance	df	Sum Square (SS)	Mean Square (MS)	F-ratio
Between Groups	k-1	SSB	MSB	$f = \frac{MSB}{MSW}$
Within Groups	n-k	SSW	MSW	
Total	n-1	SST		

2.7.4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง หรือ Two-way ANOVA เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นซึ่งเป็นสิ่งทดลองจำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียงตัวเดียว โดยที่ตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอาจมีลักษณะเชิงคุณภาพที่จำแนกออกเป็นระดับหรือประเภทต่างๆ ส่วนตัวแปรตามมีลักษณะเชิงปริมาณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นว่าจะส่งผลอย่างไรกับตัวแปรตาม ตามสมมติฐานการวิจัยที่กำหนดไว้โดยที่การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง นอกจากจะสามารถศึกษาผลของตัวแปรทั้งสองตัวไปพร้อมๆ กันแล้ว ยังสามารถศึกษาผลร่วม (Interaction) ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวด้วยว่าตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นตัวหนึ่งนอกจากจะส่งผลต่อตัวแปรตามแล้ว ยังส่งผลใดๆต่อตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นอีกตัวแปรหนึ่งหรือไม่

2.7.5 การทดสอบเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparisons)

ในการทดสอบ F-test จะเห็นว่าเป็นการทดสอบโดยรวม (Over all test) ซึ่งเป็นการทดสอบว่าจะมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันหรือไม่ ถ้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Significant) ก็จะบอกเพียงว่ามีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่มีค่าแตกต่างกันแต่จะไม่บอกว่าเป็นคู่ใด ซึ่งจะต้องทำการทดสอบหลังการวิเคราะห์ (Post-hoc test or postetior) โดยวิธีการเปรียบเทียบพหุคูณ (Multiple comparisons) ซึ่งมีหลายวิธีในโปรแกรม SPSS ที่นิยมใช้ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

- 1) การเปรียบเทียบรายคู่ เมื่อค่าความแปรปรวนแต่ละกลุ่มไม่แตกต่างกัน ได้แก่ LSD (Least-significant), Bonferroni, Sidak, Shceffer, RE-D-WF, R-E-G-WQ, S-N-K (Student-Nbewman-Keuls), Turkey, Turkey's-b, Duncan, Hochberg's GT2, Gabriel, Waller-Duncan, Dunett

2) การเปรียบเทียบรายคู่ เมื่อค่าความแปรปรวนแต่ละกลุ่มแตกต่างกัน ได้แก่ Tamhane's t2, Dunnett's t3, Gamea-Howell, Dunnett's C

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการผลิตผลิตภัณฑ์จากฟิวเตอร์เป็นการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดเล็กถึงขนาดกลาง และการผลิตส่วนใหญ่อยู่ในประเทศบราซิล และประเทศกลุ่มอาเซียนโดยเฉพาะประเทศไทยและมาเลเซีย [3, 4] การวิจัยเกี่ยวกับโลหะชนิดนี้จึงอาจจะอยู่ในวงจำกัด ซึ่งจากการสำรวจผลงานวิจัยที่ปรากฏมาก่อน ยังไม่พบผลการศึกษาเกี่ยวกับฟิวเตอร์ที่เผยแพร่ในเอกสารทางวิชาการใดๆ ทั้งในระดับชาติและระดับนานาชาติ แต่พบว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับอัลลอยระหว่างคีนุก ทองแดง และพลวง ในการทำเป็นโลหะบัดกรีแบบไร้สารตะกั่ว (Lead-free solders) ที่ใช้กับอุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นอัลลอยที่มีส่วนผสมจากธาตุชนิดเดียวกันกับฟิวเตอร์แบบไร้สารตะกั่ว แต่ในการศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาในเรื่องของจุดหลอมเหลวของอัลลอย [15-18]

ความแข็งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการขึ้นรูปโลหะ โดยทั่วไปแล้วโลหะที่มีความแข็งสูงจะขึ้นรูปได้ยากและมีโอกาสเกิดการแตกร้าวได้ง่ายกว่าโลหะที่มีความแข็งต่ำ นอกจากนี้โลหะที่มีความแข็งสูงจะสามารถทนต่อการสึกหรอ หรือทนต่อการขีดขีดได้ดีกว่าโลหะที่มีความแข็งต่ำ [11, 19] ถึงแม้จะเป็นที่ทราบกันดีว่า ส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาคมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับความแข็งของโลหะ [11] แต่ยังไม่พบเอกสารทางวิชาการเกี่ยวกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมหรือโครงสร้างจุลภาคกับความแข็งของฟิวเตอร์โดยตรง ซึ่งจากการสำรวจผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า ได้มีบทความวิจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของโลหะชนิดต่างๆ กับส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สำหรับวัสดุในกลุ่มโลหะความแข็งเป็นคุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาคของโลหะ โดยโลหะแต่ละชนิดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับส่วนผสมและโครงสร้างจุลภาคของโลหะในรูปแบบที่แตกต่างกันไป [12-14, 20-26] และพบว่าได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งกับส่วนผสมอีกด้วย [22]

สำหรับวิธีการออกแบบของผสม เป็นวิธีการทางสถิติที่เรียกว่า วิธีพื้นผิวผลตอบ (Response surface method) ชนิดหนึ่ง ที่สามารถใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติที่ต้องการศึกษาของของผสมกับสัดส่วนขององค์ประกอบแต่ละชนิดในของผสมนั้น โดยการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวจะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และแผนภาพ Contour plot ที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งวิธีการออกแบบของผสมมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น Simplex lattice design, Simplex centroid design, Extreme vertice design และ D-optimal design นอกจากนี้การใช้วิธีการออกแบบของผสมยังช่วยลดจำนวนการทดลองลงได้เป็นจำนวนมาก เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า การประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบของผสมสามารถใช้ได้ดีกับการวิจัยด้านต่างๆ หลายด้าน เช่น วัสดุศาสตร์ อาหาร และยา [27-30]

