บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

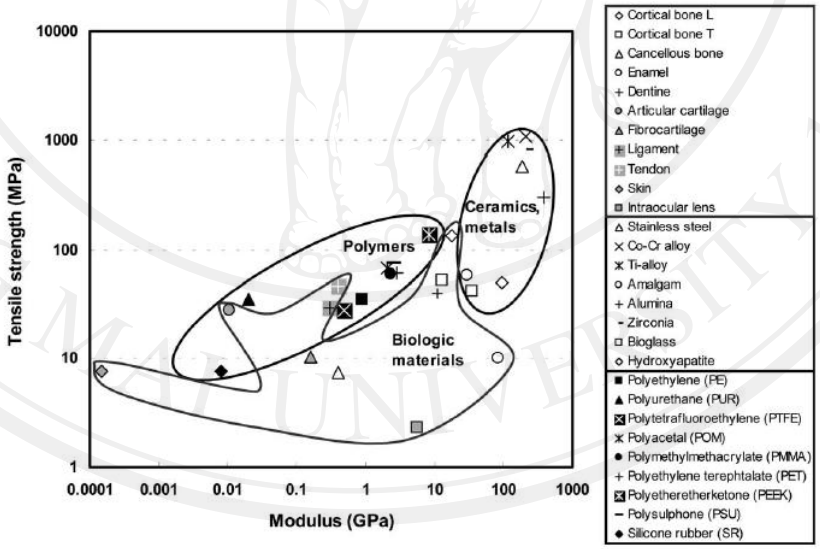
2.1.1 วัสดุทดแทนกระดูก

โดยธรรมชาติเนื้อเยื่อในสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่รวมถึงกระดูกเมื่อได้รับอุบัติเหตุหรือการบาดเจ็บ มีศักยภาพในการซ่อมหรือสร้างตัวเองได้เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม แต่ในกรณีกระดูกที่หักไม่สามารถสมานติดกันได้เอง เนื่องจากกระดูกที่หักบางส่วนหลุดหายไปเกิดเป็นช่องว่างระหว่างปลายกระดูกซึ่งมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่ปลายกระดูกทั้งสองจะมีการสร้างหรืองอกขึ้นมาเชื่อมต่อกันได้ (สุกิจ, (2534)) จึงได้มีการนำวัสดุสำหรับทดแทนกระดูกมาใช้เพื่อรักษาความเสียหายดังกล่าว

ในปัจจุบันมีการลงทุนในการพัฒนาวัสดุทางชีวภาพ (Biomaterials) สำหรับการซ่อมแซมหรือทดแทนเนื้อเยื่อชนิดแข็ง โดยทั่วไปแล้วการนำวัสดุที่ใช้สำหรับทดแทนกระดูกต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติการเข้ากันดีได้กับเนื้อเยื่อในร่างกาย และชีวกลศาสตร์ (Biomechanical) ซึ่งวัสดุทางชีวภาพควรมีคุณสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมในการแทนที่กระดูก และความสามารถในการยึดติดกับกระดูก (Bone-Bonding) หรือเร่งปฏิกิริยาการสร้างเนื้อเยื่อ (Bioactivity) ตัวอย่างของวัสดุทางชีวภาพ เช่นวัสดุแทนที่กระดูกประเภทโลหะ เช่น สแตนเลส ไทเทเนียม โลหะผสมโคบอลต์โครเมียม ซึ่งใช้เป็นอวัยวะเทียมถาวร เช่น สะโพกเทียม รากฟันเทียม เป็นต้น หรือใช้เป็นวัสดุปลูกฝังชั่วคราว เช่น เพลท หมุด แท่งและสกรู สำหรับยึดกระดูก แต่มีข้อเสียคือมีความแข็งเชิงกลสูง เนื่องจากโมดูลัสความยืดหยุ่นของโลหะไม่เหมาะสมกับกระดูก และมีไอออนปลดปล่อยออกมาจากอุปกรณ์ที่ใส่เข้าไป การใช้วัสดุจำพวกเซรามิก (Bioceramic) เช่น แคลเซียมฟอสเฟต (Hydroxyapatite, Tricalcium Phosphate) แก้ว และเซรามิก (Bioglass) ซึ่งวัสดุปลูกฝังดังกล่าวสามารถสร้างยึดติดกับกระดูกได้ เนื่องจากเข้ากับกระดูกในร่างกายได้ ทำให้มีการเจริญของเนื้อเยื่อกระดูก โดยไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาหรือขัดขวางการเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อกระดูก แต่มีข้อเสียคือเปราะ และมีความแข็งแรงไม่เพียงพอต่อประโยชน์ในด้านการรับน้ำหนัก พอลิเมอร์ที่ใช้ทางการแพทย์ เช่น Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE), Poly-Methyl Methacrylate (PMMA), Polyetheretherketone (PEEK), Polyethylene (PE), Polyethylmethacrylate

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(PEMA), Polylactide (PLA), Polyglycolide (PGA) ฯลฯ ถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปลูกฝังทางด้านการศัลยแพทย์อย่างกว้างขวาง เช่น หลอดเลือดเทียม ด้ายเย็บแผล เป็นต้น จากรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งตึง (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) ของวัสดุสำหรับประโยชน์ทางชีวการแพทย์ จากรูปแสดงให้เห็นว่าวัสดุประเภทโลหะและเซรามิกจะมีความแข็งตึงและแข็งแรงมากกว่าเนื้อเยื่อแข็งทางชีวภาพ (Biological Hard Tissue) ของมนุษย์กว่ามาก ส่วนพอลิเมอร์ค่อนข้างใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อแข็งมากกว่า(มอดูลัสลดลง) ซึ่งเนื้อเยื่อทางชีวภาพ (Biological Tissues) มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าวัสดุอื่นๆ ถึงแม้ว่าพอลิเมอร์จะมีความเหนียวแต่ก็มีความแข็งไม่เพียงพอที่จะแทนที่เนื้อเยื่อชนิดแข็งในด้านการรับน้ำหนัก สิ่งที่น่าสนใจคือพอลิเมอร์และวัสดุอื่นๆ มาผสมกันเป็นวัสดุร่วม (Composite) เพื่อให้ได้คุณสมบัติทางกลและทางชีวภาพที่ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อแข็งทางชีวภาพ จึงได้มีการนำพอลิเมอร์มาใช้เป็นวัสดุร่วมกับวัสดุทางชีวภาพตัวอื่น ซึ่งไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นวัสดุที่น่าสนใจเนื่องจากมีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาการสร้างเนื้อเยื่อทำให้วัสดุทดแทนกระดูกมีคุณสมบัติความแข็งคงตัวและมีความแข็งแรงที่เหมาะกับกระดูกชนิดเนื้อแน่น (Liu (1997), Mano *et al.* (2004))



รูปที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งแรงต่อแรงดึงและค่ามอดูลัสของวัสดุสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุร่วมในการใช้งานด้านการแพทย์ (Mano et al.,2004)

2.1.2 การสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์

ในปัจจุบันมีการนำกระดูกวัวมาประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ เช่น มนต์สรวง และมินตรา (2554) ได้ทำการเตรียมไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกโค โดยการแช่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 50% กับน้ำในอัตราส่วน 1 : 2 โดยปริมาตร เป็นเวลา 7 วัน แล้วนำมาเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

สิทธิพร และคณะ (2554) ได้ทำการผลิตวัสดุทดแทนกระดูก โดยการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัว ด้วยการต้มกระดูกในน้ำเดือดเป็นเวลา 7 วัน วันละ 8 ชั่วโมง แล้วนำมาเผาแคลไซน์ (Calcinations) ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2.1.3 คุณสมบัติไฮดรอกซีอะพาไทต์-พอลิเมอร์คอมโพสิท

มีผู้ให้ความสนใจและศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์ เพื่อการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของกระดูกเทียม เช่น Baker and Khor (2003) ศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์กับพอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyetheretherketone, PEEK) ไบโอคอมโพสิทด้วยการขึ้นรูปแบบฉีด โดยใช้ปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่แตกต่างกันคือ 0%, 10%, 20%, 30% และ 40% ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่าความแข็งแรงต่อการดึงอยู่ในช่วง 49.0 – 83.3 MPa ค่าความแข็งจุลภาคอยู่ในช่วง 12.00 – 37.47 VHN ความแข็งแรงต่อแรงอัดอยู่ในช่วง 113.00 – 139.00 MPa สรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์จะส่งผลให้ค่ามอดูลัสของยัง ความแข็งแรงต่อแรงอัด และค่าความแข็งจุลภาคมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันค่าความแข็งแรงต่อการดึงและค่าความเครียดต่อการแตกหักจะมีค่าลดลง

นิธินาถ (2549) ผลิตวัสดุทดแทนกระดูกจากพอลิเมอร์คอมโพสิทโดยใช้ไฮดรอกซีอะพาไทต์จากกระดูกวัวเป็นสารตัวเติมในเมตริกซ์ของพอลิเมอร์พอลีโพรพิลีน (Polypropylene: PP) ใช้ปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์ 20%, 40%, 50%, 60% และ 70% โดยน้ำหนัก ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการฉีด จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์ในคอมโพสิทจะเพิ่มค่ามอดูลัสของยัง ค่ามอดูลัสของการโค้งงอ และค่าความแข็งแรงต่อการดึง แต่ค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก ค่าความเครียด ณ จุดแตกหัก และค่าความแข็งแรงต่อการโค้งงอมีค่าลดลง โดยพอลีโพรพิลีนคอมโพสิทที่มีปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์ 60% โดยน้ำหนัก มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุด และมีปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์ผสมอยู่สูงสุดที่สามารถทำให้การผสมโพรพิลีนกับไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นไปอย่างทั่วถึง

Chow *et al.* (2008) ศึกษาผลของการเติมไฮดรอกซีอะพาไทต์ลงในพอลิเมทิลเมทาไครเลต (Polymethyl Methacrylate, PMMA) ต่อคุณสมบัติเชิงกล โดยใช้อัตราส่วนของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่แตกต่างกันคือ 0%, 5%, 10%, 15% และ 20% ผสมกับเมทิลเมทาไครเลต ที่อัตราส่วน 2.5:1 ขึ้นรูปด้วยการอัดที่ความดัน 14 MPa ที่อุณหภูมิห้องนาน 30 นาที นำมาต้มใน Water Bath ที่อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ค่ามอดูลัสของการโค้งงอเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงของการโค้งงอลดลง พบว่าที่ปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์ 5% มีคุณสมบัติการดัดงอดีที่สุด คือค่ามอดูลัสของการโค้งงอเท่ากับ 2582.5 MPa และค่าความแข็งแรงของการโค้งงอเท่ากับ 65.4 MPa และความแกร่งต่อการแตกหักดีที่สุด

2.1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกล และความพรุน

จากการศึกษาพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของไฮดรอกซีอะพาไทต์-คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส-พอลิเมทิลเมทาไครเลตคอมโพสิท คือ อุณหภูมิในการบ่มตัว (Curing Temperature) ซึ่งขึ้นอยู่กับ ปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์ ปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ปริมาณพอลิเมทิลเมทาไครเลต อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาหรือพอลิเมอร์ไรเซชัน (Serbetci *et al.* (2004)) โดยที่อุณหภูมิในการพอลิเมอร์ไรเซชันที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 60 – 80 องศาเซลเซียส (Deb, 2008) เช่น Kim *et al.* (2004) ศึกษาการขึ้นรูปซีเมนต์กระดูกจากไฮดรอกซีอะพาไทต์-ไคโตซาน-พอลิเมทิลเมทาไครเลต ที่อัตราส่วนผสมของพอลิเมทิลเมทาไครเลตคอมโพสิท ไฮดรอกซีอะพาไทต์ และไคโตซานที่แตกต่างกันคือ 100:0:0, 50:40:10, 40:50:10 และ 30:60:10 จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณไฮดรอกซีอะพาไทต์และไคโตซานลงในพอลิเมทิลเมทาไครเลตทำให้มีคุณสมบัติทางกลมีค่าลดลง ได้แก่ค่ายังมอดูลัส และความแข็งแรงต่อแรงกด การเติมไฮดรอกซีอะพาไทต์และไคโตซานทำให้มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการยึดติดกับเซลล์ที่ดีกว่าพอลิเมทิลเมทาไครเลตเพียงอย่างเดียว

Jiang *et al.* (2009) ทำการขึ้นรูปนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Nano-Hydroxyapatite) ไคโตซาน (Chitosan) และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl Cellulose) คอมโพสิท จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนของนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์:ไคโตซาน:คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่ 40:30:30% มีความแข็งแรงต่อแรงกดที่ดีที่สุดคือ 119.91 MPa เนื่องจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นตัว Cross-Linking ช่วยในการปรับปรุงการเชื่อมต่อระหว่างนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์กับเฟสออแกนิกด้วยพันธะไอออนิก นอกจากนี้ยังช่วยให้วัสดุเข้ากันได้ดีทางชีวภาพกับเนื้อเยื่อของร่างกาย และลดต้นทุนในการผลิต

Hoey and Taylor (2009) ศึกษาการเตรียมซีเมนต์กระดูก (Bone Cement) จากการทดลองพบว่าความพรุนที่เกิดขึ้นมีสองรูปแบบคือ ความพรุนขนาดใหญ่ (Large Pore) ซึ่งเกิดจากการเตรียม Bone Cement ที่ไม่เต็มและการแข็งตัวก่อนกำหนด ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายสูงคือความแข็งต่อความล้า (Fatigue Strength) และเกิดการชักนำในเซลล์ต่ำ ส่วนความพรุนขนาดเล็ก (Small Pore) ซึ่งเกิดจากการระเหยของมอนอเมอร์ ทำให้เกิดความพรุนขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร (Micropores) สำหรับความพรุนขนาดใหญ่กว่า 1 มิลลิเมตร (Macropores) เกิดจากอากาศในระหว่างผสม และการหดตัวของซีเมนต์ขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่ผิวหน้าของซีเมนต์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Han *et al.* (2011) ขึ้นรูปพอลิเมทิลเมทาไครเลตและไคโตซานโอลิโกแซกคาไรด์ (Chitosan Oligosaccharide) ที่อัตราส่วนผสมของไคโตซานโอลิโกแซกคาไรด์ที่แตกต่างกันคือ 10, 15 และ 20 w/v% จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณไคโตซานโอลิโกแซกคาไรด์เพิ่มขึ้น ทำให้มีค่าความแข็งแรงต่อแรงกดเพิ่มขึ้นช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลระหว่างเฟสของวัสดุร่วม และมีเปอร์เซ็นต์ของความพรุนเพิ่มขึ้นถึง 21.12% นอกจากนี้ยังพบว่าเปอร์เซ็นต์ของความพรุนขึ้นอยู่กับปริมาณไคโตซานโอลิโกแซกคาไรด์ที่เติมลงไป ซึ่งจะเกิดจากการละลายของไคโตซานโอลิโกแซกคาไรด์

จากการศึกษาพบว่าได้มีการใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปหรืออุณหภูมิในการพอลิเมอร์ไรเซชันที่แตกต่างกัน เช่น Espigares *et al.* (2002) เตรียมซีเมนต์กระดูกจากอะคริลิกผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ และส่วนผสมของแป้งข้าวโพดกับเซลลูโลสอะซิเตท ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง

Moursi *et al.* (2002) เตรียมวัสดุร่วมระหว่างอะคริลิกผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

Chow *et al.* (2008) เตรียมวัสดุร่วมระหว่างอะคริลิกผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ ที่อุณหภูมิ 78 องศาเซลเซียส นาน 90 นาที

Simitzis *et al.* (2010) เตรียมซีเมนต์กระดูกจากอะคริลิกผสมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

2.1.5 เทคนิคการออกแบบการทดลอง

การออกแบบพื้นที่การตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM) เป็นวิธีที่นิยมมากในการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) ถูกนำมาใช้เพื่อออกแบบและประเมินความเหมาะสมทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของการทดลอง เพื่อให้ได้ผลตอบของการทดลองอันเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัยหรือกระบวนการร่วมการทดลองหลายปัจจัย ซึ่งการศึกษาการทดลองทีละปัจจัย (One-Variable-at-a-Time Technique) เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย มีข้อเสียคือไม่ได้ศึกษาถึงปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ทำให้ไม่สามารถอธิบายผลกระทบทั้งหมดของตัวแปรในการทดลองได้ จึงการนำ RSM มาใช้เนื่องจากสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นกับผลตอบ โดยแสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบเมื่อระดับของปัจจัยเปลี่ยนแปลง และสามารถหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่ให้ผลตอบที่ดีที่สุด หรือสามารถเลือกจุดที่เหมาะสมได้จากผลตอบหลายๆ ค่าได้ Bas and Boyac (2007), Shahsavani and Grimvall (2009) ในปัจจุบันมีการนำ RSM มาประยุกต์ใช้งานมากมาย เช่น พลวริน และอิสรา (2551) ทำการพัฒนาเทียนหอม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แบบแท่ง เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตเทียนหอมคือ พาราฟิน พีอีแวกซ์ สเตียริคแอซิค น้ำมันหอม ไมโครแวกซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเทียน และขนาดไส้เทียน ด้วยวิธี Combined Mixture-Process Design จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้มีปริมาณน้ำตาเทียนน้อยที่สุดดังนี้ พาราฟิน 74.43% พีอีแวกซ์ 9.95% สเตียริค แอซิค 2.68% น้ำมันหอม 4.97% ไมโครแวกซ์ 7.98% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเทียน 15.00 mm. และขนาดไส้เทียน 1.99 mm.

สราวุฒิ และอิสรา (2551) ทำการพัฒนาผลิตภัณฑ์ลูกชิ้นหมู เพื่อหาปริมาณส่วนผสมของลูกชิ้นหมูที่มีความเหมาะสมคือ เนื้อหมู น้ำแข็ง และกลูเตน ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมของลูกชิ้นที่เหมาะสมคือ เนื้อหมู 46.36% น้ำแข็ง 32.58% และกลูเตน 3.55%

เสริมศักดิ์ และชาญณรงค์ (2554) ศึกษาหาอัตราส่วนผสมแบบหล่อทรายที่เหมาะสมที่สุดคือ ทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 เบนโทไนต์ และน้ำ ด้วยเทคนิคการทดลองแบบส่วนผสมและวิธีพื้นผิวผลตอบสนอง โดยผลตอบสนองที่ใช้ชี้วัดคุณภาพของแบบหล่อทรายคือความแข็งแรงอัดในสภาพเปียก ความสามารถในการปล่อยซึมอากาศ จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมคือทรายที่ผ่านการใช้งานแล้วครั้งที่ 1 ร้อยละ 93.3 เบนโทไนต์ร้อยละ 5 และน้ำร้อยละ 1.7 ซึ่งทำให้ได้ค่าของความแข็งแรงอัดในสภาพเปียกและความสามารถในการปล่อยซึมอากาศที่ทำนายได้เท่ากับ 7.7 และ 30 ตามลำดับ

2.1.6 เทคนิคฟัซซีหลายพื้นผิวผลตอบ

การหาค่าที่เหมาะสมด้วยเทคนิคหลายพื้นผิวผลตอบ (Optimization of Multi Response Surface) ในการออกแบบที่แข็งแกร่ง (Robust Designs) ถูกนำไปใช้เพื่อกำหนดลักษณะที่เหมาะสมในการหาขอบเขตที่เหมาะสมของกระบวนการและลดความแปรปรวนของผลตอบ เทคนิคหลายพื้นผิวผลตอบมีหลายชนิดเช่น ฟังก์ชั่นความพึงพอใจ (Desirability Function) แบบจำลองความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (Polynomial Regression Models) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis) แบบจำลองฟัซซี (Fuzzy Regression Model) เป็นต้น ซึ่งวิธีแบบจำลองฟัซซีมีวัตถุประสงค์คือ การรวมแบบจำลองเชิงถดถอย แบบจำลองถดถอยที่ได้รวมถึงค่าสัมประสิทธิ์ความคลุมเครือใช้สำหรับพิจารณาความไม่แน่นอนของข้อมูลที่เก็บได้ นำการตัดสินใจแบบหลายวัตถุประสงค์มาใช้ (Multi Objective Decision Making; MODM) วิธีแบบจำลองฟัซซีใช้สำหรับแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นคือ การนำระดับความพึงพอใจของแต่ละวัตถุประสงค์มารวมกันเป็นวัตถุประสงค์เดียว โดยมีเป้าหมายคือความพึงพอใจและความแข็งแกร่งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแบบจำลองที่ได้จะมีความสามารถในการกำหนด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

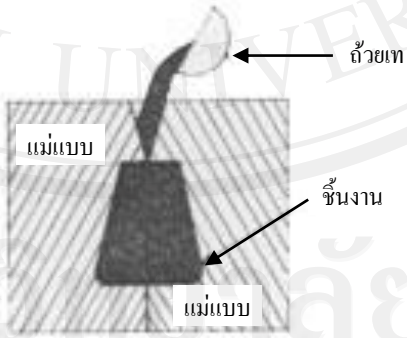
น้ำหนักความสำคัญของแต่ละเป้าหมาย Bashiri and Hosseininezhad (2009) ได้มีการนำแบบจำลองฟัซซีมาใช้งานหลายหลายเพื่อหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับปัญหาหรือกระบวนการที่มีหลายผลตอบสนอง เช่น สุรเดช และคณะ (2550) ใช้วิธี Fuzzy Multiple Model ในการออกแบบสมการการบินของต้นแบบเครื่องบินไร้คนบังคับ Pioneer แบบไม่เชิงเส้น

Iqbal and Dar (2011) นำกฎของฟัซซีในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการวัดประสิทธิภาพของกระบวนการ ใช้กฎของฟัซซีเป็นเครื่องมือในการทำนายการวัดประสิทธิภาพในการกำหนดตัวแปรของกระบวนการที่แตกต่างกันทางกายภาพคือ ความเร็วในการตัด อัตราการป้อน และความลึกในการตัดได้อย่างถูกต้อง เพื่อเพิ่มผลความแม่นยำของการทำนาย และปรับรูปทรงของชุดความคลุมเครือของตัวแปรตอบสนอง

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 กระบวนการหล่อขึ้นรูป (Precision Molding and Casting Processes)

การขึ้นรูปด้วยวิธีการหล่อเป็นกรรมวิธีการผลิตที่ง่าย ไม่ต้องใช้แรงอัดและความร้อน การลงทุนต่ำ โดยปกติวิธีนี้ใช้พลาสติกเหลวหล่อลงในแม่แบบ ผลิตภัณฑ์ที่ใช้กรรมวิธีการขึ้นรูปนี้ เช่น แผ่นพลาสติกใสอะคริลิค หรือเพลกซี่กลาส ทำให้ได้เนื้อพลาสติกที่ใส และผิวที่เป็นมันเรียบ เหมาะสำหรับการผลิตชิ้นงานที่ยาก มีรายละเอียดมาก หรืองานที่ค่อนข้างซับซ้อน เช่น ชิ้นงานแกะสลัก ชิ้นงานที่มีรูปทรงเหลี่ยม ก้อน แผ่น ท่อ ฯลฯ หรือทรงอิสระต่างๆ วิธีการขึ้นรูปแบบเทหล่อโดยการเทของเหลวที่ต้องการขึ้นรูปลงในแม่แบบ จนกระทั่งของเหลวเกิดการจับตัวกัน นำชิ้นงานที่ได้ออกจากแบบพิมพ์ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงวิธีการขึ้นรูปแบบหล่อ

ที่มา http://www.elecnet.chandra.ac.th/learn/courses/5513101/termwork/plastics2/pro2.html

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

แบบหล่อถาวร (Permanent Mold)

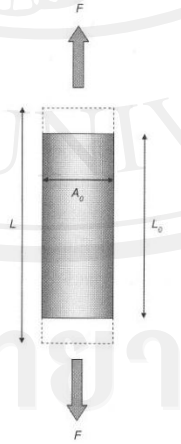
Permanent Mold หมายถึง แบบหล่อที่สามารถนำกลับมาใช้ได้อีกหลายๆครั้ง ซึ่งแตกต่างจากแบบหล่อที่ทำจากทราย ซึ่งจะต้องทำลายแม่พิมพ์จึงจะสามารถเอาชิ้นงานหล่อออกมาได้ สำหรับแบบหล่อถาวรจะต้องออกแบบให้แยกออกจากกันได้เพื่อที่จะนำชิ้นงานหล่อออกมาหลังจากที่ปล่อยให้งานแข็งตัวสมบูรณ์แล้ว วัสดุที่ทำแบบหล่อส่วนมากจะใช้เหล็กหล่อ หรือเหล็กกล้า บางครั้งก็ใช้ แกร์ไฟต์ (Graphite) ทองแดง และอลูมิเนียม

2.2.2 คุณสมบัติเชิงกล

การทดสอบสมบัติทางกล คือการตรวจวัดสมบัติของวัสดุในการรับภาระหรือแรงกระทำในลักษณะต่างๆในเชิงปริมาณ เพื่อสามารถนำค่าดังกล่าวไปใช้เพื่อประโยชน์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์นั้นๆ ไม่ว่าจะเป็นการตรวจสอบคุณภาพ การเปรียบเทียบ หรือการจัดลำดับ

2.2.2.1 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงคือการให้แรงดึงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นงานทดสอบในทิศทางตรงกันข้ามจนชิ้นงานนั้นเกิดการผิดรูปในช่วงพลาสติก (Plastic Deformation) และมีการแตกหักเกิดขึ้นในที่สุด ในการทดสอบแรงดึงจะเป็นผลให้เกิดความเค้น (Stress) และความเครียด (Strain) ในชิ้นงานทดสอบ ความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากการที่ชิ้นงานถูกดึงด้วยแรงดึงอย่างช้าๆในแนวแกน โดยขนาดแรงดึงและความยาวของชิ้นทดสอบจะเปลี่ยนไปในแต่ละช่วงของการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 2.3 และสามารถเขียนสมการหาค่าความเค้นและความเครียดดังสมการ



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงดึง (เสกศักดิ์, 2550)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

- ความเค้นทางวิศวกรรม

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \qquad (2.1)$$

เมื่อ σ = ความเค้นทางวิศวกรรม

F = แรงดึง

A_0 = พื้นที่หน้าตัดเริ่มต้นของชิ้นงาน

โดยแรงเค้นในหน่วย U.S. คือปอนด์ต่อตารางนิ้ว (lb/in^2 หรือ psi) และในหน่วย SI คือนิวตันต่อตารางเมตร (N/m^2) หรือ ปาสคาล (Pa) เมื่อ $1N/m^2 = 1$ Pa

- ความเครียดทางวิศวกรรม

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \qquad (2.2)$$

เมื่อ ε = ความเครียดทางวิศวกรรม

ΔL = ความยาวที่เปลี่ยนไป

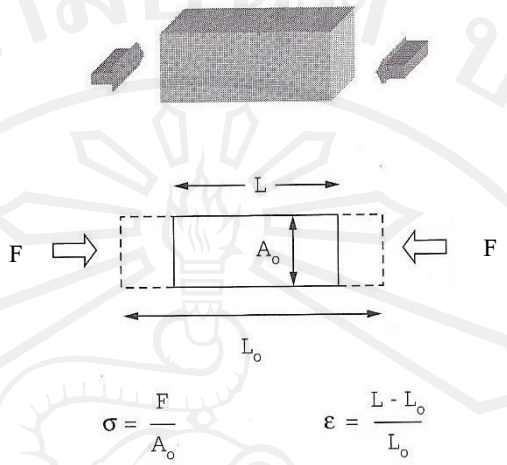
L = ความยาวสุดท้ายของชิ้นงานทดสอบ

L_0 = ความยาวเริ่มต้นของชิ้นงานทดสอบ

2.2.2.2 การทดสอบแรงอัด (Compression Testing)

การทดสอบแรงอัดมีลักษณะคล้ายคลึงกับการทดสอบแรงดึงเพียงแต่ลักษณะของแรงที่ใช้ทดสอบนั้นเกิดขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม การทดสอบแรงอัดเป็นการให้แรงในแนวเส้นตรงแก่ชิ้นงานทดสอบในทิศทางตรงกันข้ามที่วิ่งเข้าหากันเพื่อสร้างแรงอัดขึ้นในชิ้นงานทดสอบ แรงเค้นอัดเกิดจากแรงอัดที่ให้กับชิ้นงานทดสอบ ซึ่งทำให้ชิ้นงานทดสอบเกิดการหดตัวหรือ อัดตัวภายใต้แรงอัดนั้น ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดต้องมีลักษณะสั้นและมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความยาว ดังแสดงในรูปที่ 2.4

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.4 การทดสอบแรงอัด (เสกศักดิ์, 2550)

2.2.3 คุณสมบัติเชิงกายภาพ

2.2.3.1 ความพรุน (Porosity)

ความพรุนหมายถึงปริมาตรที่ว่างระหว่างเนื้อวัสดุที่เนื้อไม่เต็ม (Unconsolidate) ทำให้มีช่องว่างและอากาศสามารถผ่านไปได้ ซึ่งความพรุนของวัสดุสามารถหาได้จากความหนาแน่น ความหนาแน่นหมายถึงค่ามวลต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของสาร เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดที่อาจแปรผันได้ตามปัจจัยต่างๆ เช่น ของเหลว ความหนาแน่นจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิและความดันที่เปลี่ยนแปลง ส่วนของแข็งความหนาแน่นขึ้นอยู่กับ ขนาดและมวลขององค์ประกอบมลทิน การจัดเรียงตัวของอะตอมในระบบผลึกและปริมาณความพรุนในโครงสร้างของวัสดุ ค่าความหนาแน่นเป็นตัวชี้วัดถึงประสิทธิภาพในการอัดแน่นของวัสดุในระหว่างขั้นตอนการขึ้นรูป นอกจากนั้นยังเป็นตัวชี้วัดความเป็นความพรุน (Porosity) ของวัสดุ การหาค่าความหนาแน่นอาศัยหลักการของอาร์คีมิดิส (Archimedes' Principle) ที่กล่าวว่า เมื่อจุ่มของแข็งลงในของเหลวจะมีแรงพยุงเกิดขึ้นบนของแข็งนั้น โดยแรงพยุงที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่ด้วยปริมาตรของของแข็ง ด้วยหลักการนี้จึงทำให้สามารถใช้ค่ามวลของวัตถุขณะชั่งในอากาศและขณะชั่งในน้ำ สำหรับการคำนวณหาค่าความหนาแน่นได้

ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) คือความหนาแน่นที่รวมช่องว่างที่เกิดขึ้นทั้งหมดในโครงสร้าง โดยสามารถหาค่าความหนาแน่นปรากฏ ได้ดังสมการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\text{Apparent Density} = \left(\frac{W_{dry}}{W_{dry} - W_{sup}}\right)\rho_{H_2O} \quad (2.3)$$

ความหนาแน่นบัลค์ (Bulk Density) คืออัตราส่วนมวลของอนุภาคที่อยู่ภายในวัสดุต่อปริมาตรที่อนุภาคนั้นรวมตัวกันอยู่ ซึ่งนอกจากเนื้อสารแล้วในชิ้นงานยังประกอบด้วยความพรุนเปิด ความพรุนปิดและตำหนิต่างๆ ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุแต่ละชนิดที่มีค่าแตกต่างกัน โดยวัดจากอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักต่อปริมาตรของวัสดุซึ่งมีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือ กรัมต่อซีซี ซึ่งค่า Bulk Density นั้นมีความสำคัญในการคำนวณหาอัตราการไหล การลำเลียง การผสม การคัดร่อนขนาด การบดโม่ ฯลฯ โดยสามารถหาความหนาแน่นบัลค์ได้ดังสมการ

$$\text{Bulk Density} = \left(\frac{W_{dry}}{W_{sat} - W_{sup}}\right)\rho_{H_2O} \quad (2.4)$$

ความพรุนเปิด (Open Porosity) หรือความพรุนปรากฏ (Apparent Porosity) คือช่องว่างหรือที่ว่างภายในเนื้อวัสดุซึ่งความพรุนแต่ละความพรุนสามารถที่จะเชื่อมต่อกับความพรุนอื่นๆภายในเนื้อวัสดุได้ โดยสามารถหาค่าความพรุนเปิดได้ดังสมการ

$$\text{Apparent Porosity} = \left(1 - \frac{bulk\ density}{apparent\ density}\right)100\% \quad (2.5)$$

เมื่อ W_{dry} = น้ำหนักของชิ้นงานที่ชั่งขณะแห้งในอากาศ (g)
W_{sat} = น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งขณะที่อิ่มตัวในอากาศ (g)
W_{sup} = น้ำหนักของชิ้นงานเมื่อชั่งขณะอิ่มตัวในน้ำ (g)
ρ_{H_2O} = ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิขณะทำการทดลอง (g/cm^3)

2.2.4 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

เมื่อต้องการให้การทดลองเกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด จะต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ วิธีการออกแบบการทดลองในเชิงสถิติเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าต้องการหาข้อสรุปที่มีความหมายจากข้อมูลที่มีอยู่ และถ้ายิ่งปัญหาที่สนใจนั้นเกี่ยวข้องกับความผิดพลาดใน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การทดลอง (Experimental Error) วิธีการทางสถิติเป็นวิธีการเพียงอย่าเดียวเท่านั้นที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลอง คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกันอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลอง คือ

1. เรพลิเคชัน (Replication) หมายถึงการทำการทดลองซ้ำ เรพลิเคชันมีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการคือ ประการแรกเรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ตัวประมาณค่าความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้ ตัวอย่างเช่น ถ้า σ^2 คือความแปรปรวนของข้อมูลแต่ละตัว และมี n เรพลิเคต ดังนั้นค่าความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยของตัวอย่างนี้ คือ

$$\sigma_{\bar{y}^2} = \frac{\sigma^2}{n} \tag{2.6}$$

ผลในทางปฏิบัติคือ ถ้ามี $n = 1$ เรพลิเคต และค่าที่ได้จากการทดลอง $y_1 = 145$ (ใช้น้ำเป็นตัวดับความร้อน) และ $y_2 = 147$ (ใช้เกลือเป็นตัวดับความร้อน) ไม่สามารถที่จะสรุปอะไรเกี่ยวกับผลของการทดลองทั้งสองนี้ได้ นั่นคืออาจเป็นไปได้ว่าความแตกต่างที่สังเกตได้อาจจะเป็นผลมาจากความผิดพลาดในการทดลอง ในทางตรงกันข้าม ถ้า n มีค่ามากพอเพียง และความผิดพลาดจากการทดลองมีค่าน้อย ดังนั้น $\bar{y}_1 \leq \bar{y}_2$ สามารถสรุปได้ว่าการใช้น้ำเกลือเป็นตัวดับความร้อนนั้นจะทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานมากกว่าการใช้น้ำเป็นตัวดับความร้อนสำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม

2. แรนดอมไมเซชัน (Randomization) เป็นพื้นฐานหลักสำหรับการใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง แรนดอมไมเซชัน หมายถึงการทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือความผิดพลาด) จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การแรนดอมไมซ์การทดลองทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3. บล็อกกิง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิง

2.2.4.1 การคัดเลือกและการกลั่นกรองปัจจัย (Factor Identification and Screening)

ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุง การคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลง โดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรทำให้สามารถพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาตามหลักการความสำคัญจำนวนน้อย Vital Few การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (Optimal) ของตัวแปรนั้นๆ รวมทั้งบอกด้วยว่าค่าตอบสนอง (Response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง วิธีที่ใช้ในการคัดเลือกมีดังต่อไปนี้

- Two-Level Full และ Fractional Factorial เป็นวิธีที่วงการอุตสาหกรรมใช้กันแพร่หลาย
- Plackett-Burman แม้ว่าจะมี Resolution น้อย แต่มีประโยชน์อย่างมากต่อการทดลองเพื่อการคัดเลือก และการทดสอบเรื่อง Robustness ซึ่งใช้กันโดยทั่วไป
- General Full Factorial (ปัจจัยมีค่าระดับมากกว่า 2 ค่าขึ้นไป) อาจมีประโยชน์ในการทำการทดลองเพื่อการคัดเลือกขนาดเล็ก

2.2.4.2 การหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization)

เมื่อมีการคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญจำนวนน้อย ขั้นตอนต่อไปคือการหาค่าที่ดีที่สุดของปัจจัย ซึ่งค่าปัจจัยที่ดีที่สุดจะขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง ตัวอย่างเช่น วัตถุประสงค์คือการหาค่า Yield ของกระบวนการที่มีค่ามากที่สุดและมีค่าความแปรปรวนของกระบวนการน้อยที่สุด

2.2.4.3 วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM)

วิธีการพื้นผิวผลตอบเป็นการรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา เพื่อหาความสอดคล้องกับพื้นที่ของการตอบสนองและประเมินความเหมาะสมในสภาวะของการทดลอง การวิเคราะห์ได้ถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาคำตอบของการทดลองที่ประกอบด้วยจำนวนปัจจัยร่วมการทดลองหลายปัจจัย ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ ผลตอบที่เหมาะสมสามารถพิจารณาได้ใน 2 ลักษณะคือ ผลตอบที่มากสุด (Maximum) หรือผลตอบที่ต่ำสุด (Minimum) ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของการทดลอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

วิธีการพื้นผิวผลตอบประกอบด้วยกลุ่มของเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาจากค่าสังเกต เพื่อกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบ (Response Variable) ที่วัดได้ 1 หรือ 2 ค่า เช่น ผลผลิต ดัชนีค่าสี และความหนืด กับตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (Input Variables) เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน และความเข้มข้น เทคนิคดังกล่าวนี้นำมาใช้เพื่อให้คำตอบต่างๆ เช่น

1. ค่าตอบสนองได้รับผลกระทบจากชุดสิ่งทดลองบนพื้นที่เฉพาะที่น่าสนใจบางอย่างได้อย่างไร
2. ถ้าจำเป็นชุดของสิ่งทดลองอะไรที่จะให้ผลิตภัณฑ์หนึ่งเป็นที่น่าพอใจตรงตามข้อกำหนดจำเพาะพร้อมๆกัน
3. ค่าอะไรของสิ่งทดลองที่จะให้ผลผลิตในจุดที่สูงสุดของพื้นที่เฉพาะหนึ่งๆ และพื้นที่การตอบสนองอะไรที่ใกล้กับค่าสูงสุดนี้ได้

ตัวอย่างเช่น สมมติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \tag{2.7}$$

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนด $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \tag{2.8}$$

ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวผลตอบ (Response Surface) การนำค่า η มาพล็อตกับระดับของตัวแปร x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดี โดยมากแล้วจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังรูปที่ 2.5 ในการสร้างเส้นโครงร่าง เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวผลตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวนั้นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามหรือค่าตอบสนองต่อตัวแปรอิสระต่างๆ การค้นหาฟังก์ชันต่างๆ ใช้ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (Polynomial) ลำดับต้นๆ เช่น ลำดับหนึ่งหรือกำลังหนึ่ง (First

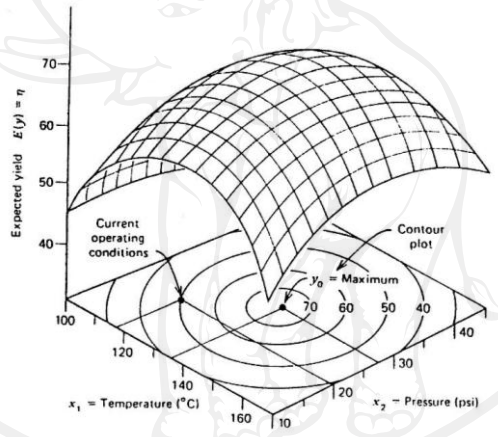
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Order) ลำดับสองหรือกำลังสอง (Second Order) เป็นต้น โดยทั่วไปฟังก์ชันซึ่งประมาณความสัมพันธ์แบบกำลังหนึ่ง มีแบบจำลองดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \ldots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.9)$$

สำหรับระบบมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้โพลีโนเมียลที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสองหรือกำลังสองซึ่งมีแบบจำลองดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_i^k \sum_j^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.5 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวผลตอบ (ปารเมศ, 2545)

โดยที่ β_0 = จุดตัด (Intercept) หรือ Grand mean

β_i = เป็นผลเชิงเส้นตรง (Linear Effect) ของ x_i

β_{ii} = เป็นผลเชิงเส้นโค้ง (Quadratic Effect) ของ x_i

β_{ij} = เป็นผลของปฏิกิริยาสัมพันธ์ (Interaction Effect) ของ x_i และ x_j

โดยที่ i < j

การออกแบบสำหรับฟิตแบบจำลองลำดับสองเป็นการสร้างแบบจำลองพหุนามกำลังสองของผลตอบซึ่งวิธีที่ผู้วิจัยนำมาใช้คือ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

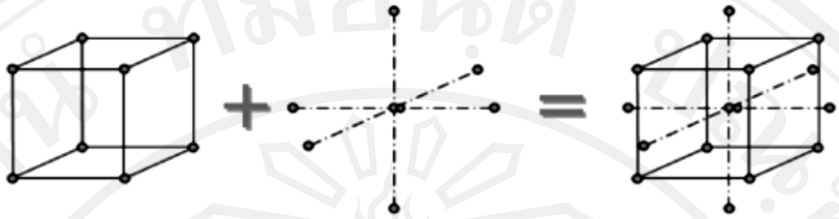
1. การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design ; CCD หรือ Box-Wilson Design) เป็นการทดลองที่ 3 ระดับ (นิยมแทนด้วยสัญลักษณ์ -1, 0, +1) เป็นการปรับตัวแปรที่ต้องการศึกษาตัวแปรละ 3 ค่า แต่แทนที่จะปรับตัวแปรแบบ Full Combination หรือ Full Factorial แต่เลือกบาง Runs หรือบางสภาวะการทดลองที่จำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองทางสถิติ โดย Model ที่ได้มีทั้ง Main Effect, Interaction และ Quadratic Terms

ตัวอย่างของ Central Composite Design สำหรับการศึกษาตัวแปร 3 ตัว ถูกแสดงไว้ดังรูปที่ 2.6 และตารางที่ 2.1 ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1. Factorial Points เป็นการนำ 2-Level Full Factorial มาเป็นส่วนหนึ่งของการทดลอง 2. Axial Points เป็นการปรับค่าตัวแปรใดตัวแปรหนึ่งในขณะที่ Fix ให้ค่าตัวแปรอื่นอยู่ที่ค่ากลาง (หรือค่า 0) และ 3. Center Points เป็นการปรับค่าของตัวแปรทุกตัวแปรที่ค่ากลาง (หรือค่า 0) สำหรับตัวอย่างในตารางที่ 1 เลือกค่า Alpha = 1 หรือ ระยะจาก Axial Point ไปยัง Center Point เป็น 1 (Design ที่ Alpha = 1 เรียกว่า Face Centered Design) (จรัล, 2552)

ตารางที่ 2.1 การเก็บข้อมูลของ Central Composite Design สำหรับ 3 Factors ที่ค่า Alpha = 1

A	B	C	Point Types
-1	-1	-1	Factorial Point
1	-1	-1	Factorial Point
-1	1	-1	Factorial Point
1	1	-1	Factorial Point
-1	-1	1	Factorial Point
1	-1	1	Factorial Point
-1	1	1	Factorial Point
1	1	1	Factorial Point
-1	0	0	Axial Point
1	0	0	Axial Point
0	-1	0	Axial Point
0	1	0	Axial Point
0	0	-1	Axial Point
0	0	1	Axial Point
0	0	0	Center Point
0	0	0	Center Point

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



Factorial Points Center Points & Axial Points Central Composite (Box-Wilson) Design

รูปที่ 2.6 Central Composite Design สำหรับ 3 Factors

2. การออกแบบส่วนผสม (Mixture Design) สำหรับการออกแบบส่วนผสมนั้น ปัจจัยจะเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบส่วนผสม โดยที่ปัจจัยเหล่านี้จะไม่เป็นอิสระต่อกัน ตัวอย่างเช่น ถ้า $x_1, x_2, \ldots, x_p$เป็นสัดส่วนของส่วนประกอบ p ของส่วนผสม (Mixture) ดังนั้น

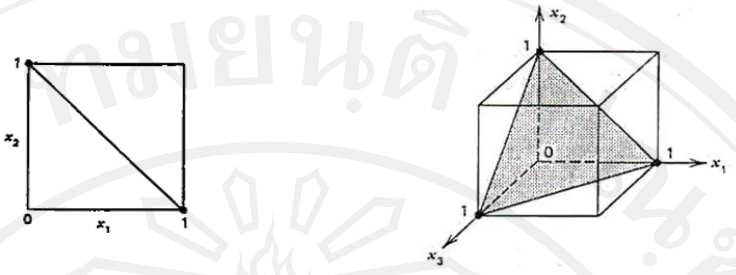
$$0 \leq x_1 \leq 1 \quad i = 1, 2, \ldots, p \tag{2.11}$$

และ

$$x_1 + x_2 + \ldots + x_p = 1 \tag{2.12}$$

ข้อจำกัดนี้ถูกแสดงดังรูปที่ 2.7 สำหรับ p = 2 และ p = 3 ส่วนประกอบ สำหรับกรณี 2 ส่วนประกอบ ช่องว่างระหว่างปัจจัยสำหรับการออกแบบจะรวมเอาค่าทั้งหมดของทั้งสองส่วนประกอบที่อยู่บนส่วนของเส้นตรง $x_1 + x_2 = 1$ ซึ่งแต่ละส่วนประกอบจะถูกจำกัดด้วยขอบเขต 0 หรือ 1 สำหรับแบบ 3 ส่วนประกอบ ช่องว่างระหว่างส่วนประกอบผสมจะเป็นรูปสามเหลี่ยมที่มีจุดยอดเกี่ยวข้องกับจุดที่เป็นส่วนผสมบริสุทธิ์ (Pure Blend) นั่นคือ ส่วนผสมที่มี 100 เปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบเดียว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



$x_1 + x_2 = 1$ (a)

$x_1 + x_2 + x_3 = 1$ (b)

รูปที่ 2.7 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี (a) p = 2 ส่วนประกอบ (b) p = 3 ส่วนประกอบ (ปารเมศ, 2545)

การออกแบบส่วนผสมมีแบบแผนการทดลองแบ่งได้เป็น 3 แบบดังนี้

1. การออกแบบซิมเพล็กซ์ (Simplex Design) ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาผลของส่วนประกอบของส่วนผสมกับตัวแปรผลตอบ การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ (Simplex Lattice Design) {p,m} สำหรับ p ส่วนประกอบจะประกอบด้วยจุดที่กำหนดโดยโคออร์ดิเนตดังต่อไปนี้ แต่ละส่วนประกอบจะใช้ m+1 โดยที่ m คือสัดส่วนแต่ละปัจจัยจาก 0 ถึง 1 (0 – 100 เปอร์เซ็นต์)

$$x_1 = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \ldots 1 \quad i = 1, 2, \ldots, p \tag{2.13}$$

และการรวมส่วนผสม ที่เป็นไปได้ของสัดส่วนจากสมการที่ 13 จะถูกนำมาใช้ ตัวอย่างเช่น ให้ p = 3 และ m = 2 ดังนั้น

$$x_1 = 0, \frac{1}{2}, 1 \quad i = 1, 2, 3 \tag{2.14}$$

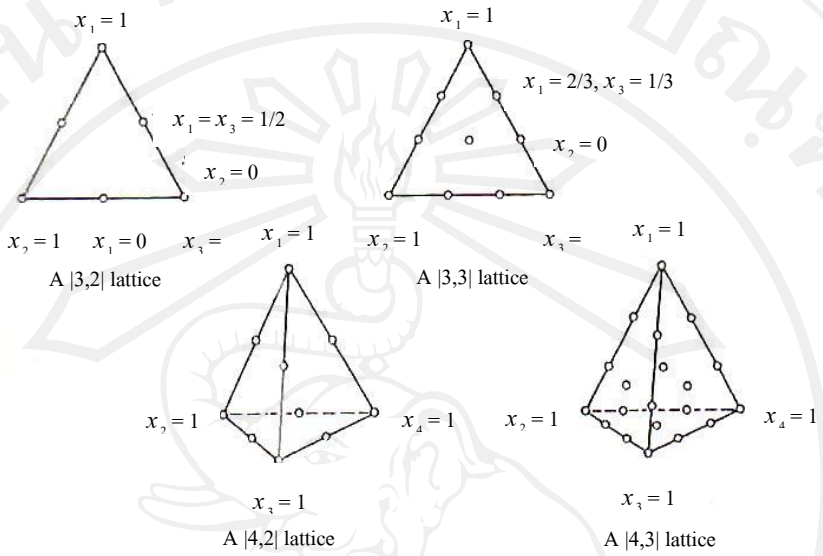
และโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์ ประกอบด้วย 6 รัน ต่อไปนี้

$$(x_1, x_2, x_3) = (1, 0, 0), (0, 1, 0), (0, 0, 1), (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0), (\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}), (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}) \tag{2.15}$$

การออกแบบนี้แสดงดังรูปที่ 8 จุดยอดทั้งสาม (1, 0, 0), (0, 1, 0) และ (0, 0, 1) จะมีส่วนผสมบริสุทธิ์ โดยที่จุด (1/2, 1/2, 0), (1/2, 0, 1/2) และ (0, 1/2, 1/2,) จะมีส่วนผสมแบบไบนารี หรือ

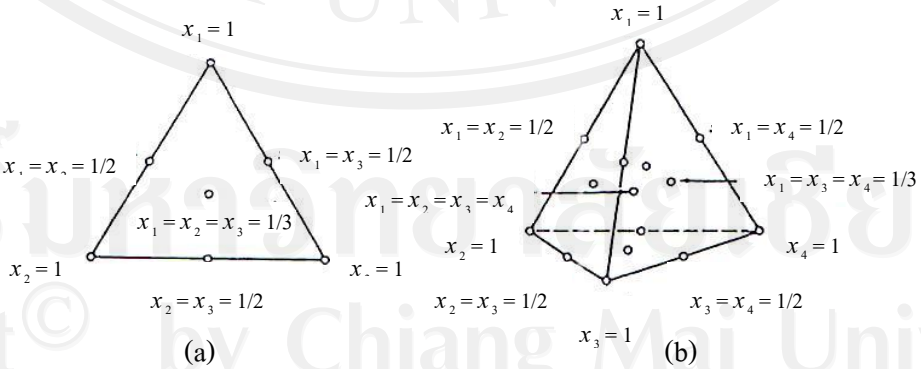
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ส่วนผสมของ 2 ส่วนประกอบ ที่ถูกวางไว้ที่จุดกึ่งกลางของด้านทั้งสามของรูปสามเหลี่ยม รูปที่ 2.8 แสดงการออกแบบโครงร่างตาข่ายซิมเพล็กซ์แบบ {3,3}, {4,2} และ {4.3}



รูปที่ 2.8 การออกแบบโครงตาข่ายซิมเพล็กซ์สำหรับ p = 3 และ p = 4 ส่วนประกอบ (ปารเมศ, 2545)

2. การออกแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์ (Simplex Centroid Design) ในการออกแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์ ที่มี p ส่วนประกอบจะมี $2^p - 1$ จุดที่เกี่ยวข้องกับ p วิธีเรียงสับเปลี่ยน (Permutation) ของ (1, 0, 0, …, 0), $\binom{p}{2}$ วิธีเรียงสับเปลี่ยนของ (1/2, 1/2, 0, …,0), $\binom{p}{3}$ วิธีเรียงสับเปลี่ยนของ (1/3, 1/3, 1/3, 0, …,0), … และเซ็นทรอยด์ทั้งหมด (1/p, 1/p, 0, …,0) แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การออกแบบซิมเพล็กซ์เซ็นทรอยด์ที่มี (a) p = 3 ส่วนประกอบ (b) p = 4 ส่วนประกอบ (ปารเมศ, 2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3. การออกแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทีส (Extreme Vertices Design) การออกแบบเอ็กซ์ทรีมเวอร์ทีส อาจเรียกว่า แบบมีข้อจำกัดเป็นสัดส่วน (Design With Constraints On Proportion) หรือ การออกแบบการทดลองผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained Mixture Design) เนื่องจากระดับในการทดลองของแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องเป็น 0-100% โดยอาจเป็น 20-30% (0.20-0.30) หรือ 10-25% (0.10-0.25) เป็นต้น เนื่องจากความจำเป็นโดยพื้นฐานในการทดลองบางอย่าง เช่น ในการผลิตอาหารบางชนิดที่มีส่วนผสมของกลูเตน (Gluten) โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Soy Protein Isolated) และน้ำ พบว่าต้องมีส่วนผสมของกลูเตนและโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองรวมกันอย่างน้อย 50% (โดยใช้ในปริมาณเท่ากันชนิดละ 25%) จึงสามารถจับเป็นก้อนเพื่อทำการรีดเป็นแผ่นได้ ดังนั้นส่วนผสมของกลูเตนและโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองที่ต่ำกว่า 50% จึงไม่เป็นที่สนใจ หากมีน้ำต่ำกว่า 30% จะไม่สามารถปั้นเป็นก้อนได้ ดังนั้นอาจกำหนดปริมาณขั้นต่ำของส่วนผสมแต่ละชนิดเป็น 25 25 และ 30% ตามลำดับ โดยที่ปริมาณขั้นต่ำของส่วนผสมทั้ง 3 รวมกัน ต้องไม่เกินหรือเท่ากับ 100% ไม่เช่นนั้นจะมีเพียงส่วนผสมเดียวที่เป็นไปได้ โดยกำหนดเงื่อนไขในรูปแบบของค่าขอบบน (Upper Bound: U) และค่าขอบล่าง (Lower Bound: L) ที่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของส่วนผสม ดังสมการ (ปารเมศ, 2545)

$$x_1 + x_2 + \ldots + x_p = 1, \quad 0 \leq L_i \leq x_i \leq U_i \leq 1 \ ; \ i = 1, 2, ..., p \qquad (2.16)$$

2.2.5 ฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) (ศันสนีย์ (2547), พยุง (2553))

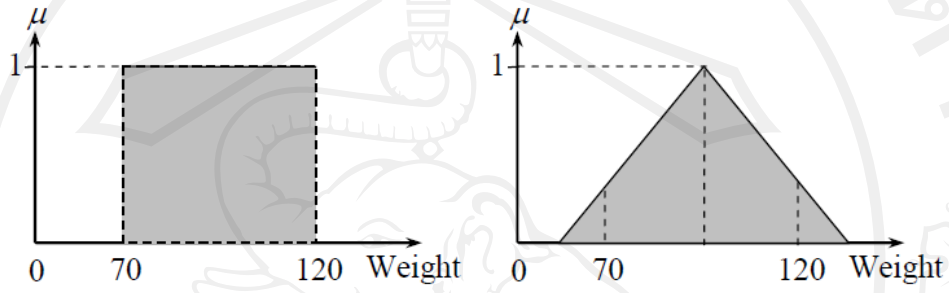
ฟัซซีลอจิกหรือตรรกะแบบคลุมเครือ เป็นคณิตศาสตร์แขนงใหม่ที่มีความสำคัญทางด้านวิศวกรรมต่างๆ ด้านวิทยาศาสตร์ ด้านการบริหาร ตลอดจนด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ ฟัซซีลอจิกถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ ที่ต้องใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล ช่วยในการสนับสนุน การตัดสินใจ การพยากรณ์ การคาดการเหตุการณ์

ฟัซซีลอจิกประกอบด้วยเซตแบบฉบับหรือแบบดั้งเดิม (Classical Set) ฟัซซีเซตหรือเซตคลุมเครือ (Fuzzy Set) ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) ตัวแปรภาษา (Linguistic Variable) และกฎฟัซซี (Fuzzy Rules) แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงเซตแบบฉบับหรือแบบดั้งเดิม ฟัซซีเซตหรือเซตคลุมเครือ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

1. เซตแบบฉบับ (Classical Set) หรือเซตทวินัย (Crisp Set) เป็นเซตที่มีค่าความเป็นสมาชิกเป็น 0 หรือ 1 {0, 1} เท่านั้น เซตแบบฉบับมีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกตามแนวคิดเลขฐานสอง โดยที่ตัวแปรหนึ่งๆ จะมีค่าความเป็นสมาชิกเพียงสองค่า คือ 0 ไม่เป็นสมาชิก และ 1 เป็นสมาชิก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2. ฟัซซีเซต (Fuzzy Set) เป็นเซตที่มีขอบเขตที่ราบเรียบ ทฤษฎีฟัซซีเซตจะครอบคลุมทฤษฎีเซตแบบฉบับ โดยฟัซซีเซตยอมให้มีค่าความเป็นสมาชิกของเซตระหว่าง 0 และ 1 ในโลกแห่งความเป็นจริงเซตไม่ใช่มีเฉพาะเซตแบบฉบับเท่านั้น จะมีเซตแบบฟัซซีด้วย ฟัซซีเซตจะมีขอบเขตแบบฟัซซีไม่ใช่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดจากขาวเป็นดำ รูปที่ 2.10 แสดงค่าความเป็นสมาชิกของเซตทวินัยและเซตแบบฟัซซี



รูปที่ 2.10 การกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของเซตทวินัยและเซตแบบฟัซซี (พยุง, 2553)

3. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership Function) เป็นฟังก์ชันที่กำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ต้องการใช้งาน โดยเริ่มจากการแทนที่กับตัวแทนที่มีความไม่ชัดเจน ไม่แน่นอน และคลุมเครือ ดังนั้นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจึงเป็นส่วนที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟัซซี เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดและแก้ไขปัญหา โดยที่ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะสมมาตรกันหรือไม่สมมาตรกันทุกประการก็ได้

ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึง 8 ชนิดดังนี้

3.1 ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Triangular Membership Function)

มีทั้งหมด 3 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c\}$

$$\text{Triangular}\,(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-a)/(b-a) & a \le x \le b \\ (c-x)/(c-b) & b \le x \le c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (2.17)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.2 ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function)

มีทั้งหมด 4 พารามิเตอร์คือ $\{a, b, c, d\}$

$$\text{Trapezoidal}\,(x{:}\ a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a)/(b - a) & a \le x < b \\ 1 & b \le x < c \\ (\mathrm{d} - x)/(d - c) & c \le x < d \\ 0 & x \ge d \end{cases} \tag{2.18}$$

3.3 ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian Membership Function)

มีทั้งหมด 2 พารามิเตอร์คือ {m, σ} โดยที่ m หมายถึงค่าเฉลี่ย และσ หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\text{Gaussian}\,(x{:}\ \mathrm{m}, \sigma) = \exp\left(-\frac{(x-m^2)}{\sigma^2}\right) \tag{2.19}$$

3.4 ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-Shaped Membership Function)

มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 3 ค่าคือ $\{a, b, c\}$

$$\text{Bell-Shaped}\,(x{:}\ a, b, c) = \frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \tag{2.20}$$

3.5 ฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function)

มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ $\{a, \mathrm{b}\}$

$$\text{Smooth}\,(x{:}\ a, b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & a \le x < \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \le x < b \\ 1 & x \ge b \end{cases} \tag{2.21}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

3.6 ฟังก์ชันตัวแซด (Z-Membership Function)

มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ {a, b}

$$Z\,(x;\,a,\,b) = \begin{cases} 1 & x < a \\ 1 - 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & a \le x < \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2 & \frac{a+b}{2} \le x < b \\ 0 & \mathrm{x} \ge \mathrm{b} \end{cases} \tag{2.22}$$

3.7 ฟังก์ชันเชิงเส้นทางบวก (Positive Linear Membership Function)

มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ {a, b}

$$\text{Poslinear}\,(x;\,a,\,b) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x-\,a)/(b\,-\,a) & a \le x < b \\ 1 & x \ge b \end{cases} \tag{2.23}$$

3.8 ฟังก์ชันเชิงเส้นทางลบ (Negative Linear Membership Function)

มีพารามิเตอร์ทั้งหมด 2 ค่าคือ {a, b}

$$\text{Neglinear}\,(x;\,a,\,b) = \begin{cases} 1 & x < a \\ (a-\,x)/(b\,-\,a) & a \le x < b \\ 0 & x \ge b \end{cases} \tag{2.24}$$

การเลือกฟังก์ชันของความเป็นสมาชิก เลือกตามความเหมาะสมและครอบคลุมข้อมูลที่รับเข้ามา โดยสามารถที่ทับซ้อนกันเพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบ ซึ่งมีความเป็นสมาชิกหลายค่าได้ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเปลี่ยนแปลงแก้ไขให้เหมาะกับงานที่กำลังปฏิบัติงานหรือตามความต้องการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved