บทที่ 2
วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 เอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) คือการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่มีวัตถุประสงค์ที่จะเปลี่ยนปัจจัย (Factor) นำเข้าของกระบวนการ และสังเกตการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยนำออก ซึ่งเรียกว่า ผลตอบ (Response) ซึ่งวัตถุประสงค์ของการทดลองจึงเกี่ยวกับการหาตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุดต่อผลตอบ การออกแบบการทดลองจึงอาจจะนำมาใช้ทั้งการพัฒนากระบวนการที่มีปัญหาเพื่อให้กระบวนการนั้นมีสมรรถนะดีขึ้นหรือทำให้เกิดความมั่นคง (Robust or Insensitive) ต่อแหล่งความดันผันแปรที่อยู่ภายนอกได้ (Montgomery, 2002)

การออกแบบการทดลองได้ถูกนำมาใช้ในงานทางวิศวกรรมต่างๆมากมาย ดังเช่น ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ซึ่ง กฤษดา อัศวรุ่งแสงกุล (2542) ได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลต่อการเกิดรอยบิ่นและรอยร้าวในกระบวนการตัดขั้นตอนสุดท้ายของการตัดหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ทดิกส์และหาเงื่อนไขหรือวิธีการปรับปรุงที่เหมาะสม จากการวิเคราะห์วิธีการทางสถิติสามารถหาปัจจัยที่มีอิทธิพลนัยสำคัญต่อการเกิดรอยบิ่นและรอยร้าว คือ ความเร็วรอบในการตัด และทิศทางในการตัด ในขณะที่ ทรงพล พิเชษฐ์วัฒนา (2541) ได้ศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อแรงดึงระหว่างตัวเลื่อน (Silder) และส่วนโค้ง (Flexure) ของหัวอ่านเขียนข้อมูลฮาร์ทดิกส์ไดร์ฟและเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูลดังกล่าวภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปได้จริง

ในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวกับการแปรรูปและการผลิต เทคนิคการออกแบบการทดลองก็ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินผลของปัจจัยที่สนใจศึกษา ดังเช่น วิชัย รวิพัน (2540) ได้ทำการวิจัยเรื่องการออกแบบแผนการทดลองและการควบคุมการผลิตในแผนกบรรจุภัณฑ์โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อแรงดึงเทป และหาค่าของปัจจัยเหล่านั้นที่ทำให้ค่าแรงดึงเทปใกล้เคียง 70 กรัม (gramf.) ซึ่งเป็นความต้องการของลูกค้า และ สรียา กสิกพันธุ์ (2543) ได้ทำการวิจัยเรื่องการนำเศษแผ่นพาร์ทิเคิลจากการตัดริมมาเป็นส่วนผสมในการผลิตแผ่นพาร์ทิเคิล โดยได้ศึกษาหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงและความคงขนาดจองแผ่นพาร์ทิเคิลและหาเงื่อนไขส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำเศษแผ่นพาร์ทิเคิลจากการตัดริมเป็นส่วนผสมในการผลิตแผ่นพาร์ทิเคิล โดยอาศัยหลักการออกแบบการทดลอง เพื่อเพิ่มมูลค่าของเศษแผ่นพาร์ทิเคิลที่เหลือจากการใช้ประโยชน์ โดยแผ่นพาร์ทิเคิลที่ผลิตได้ต้องมีคุณภาพตรงตามมาตรฐานและเหมาะสมต่อการใช้งาน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ในส่วนที่เกี่ยวกับเครื่องจักรกลในการผลิต ทวีป จีระประดิษฐ์ (2538) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การศึกษาผลกระทบของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะในกรรมวิธีอีดีเอ็ม โดยได้ศึกษาเงื่อนไขการแปรรูปของโลหะของ 3 ตัวแปร ได้แก่ กระแส ช่วงพัลส์ และเซอร์โว ซึ่งมีผลกระทบต่ออัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ ความหยาบ และโอเวอร์คัต โดยอาศัยวิธีแฟกทอเรียลตามหลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเป็นพื้นฐานของการวิจัยและสร้างสมการออโธโกนอลโพลิเนอร์เมียลของอัตราการเกิดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอ ความหยาบ และโอเวอร์คัตในรูปของ 3 ตัวแปร โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Statistical Graphics มาช่วยในการวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น และ สุรพล สุรบรรเจิดพร (2542) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเชื่อมดีบุก-ตะกั่วบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติโดยวิธีการออกแบบการทดลอง โดยได้ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมดีบุก-ตะกั่วบนแผ่นวงจรพิมพ์ด้วยเครื่องเชื่อมอัตโนมัติและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองเพื่อลดจุดบกพร่องของรอยเชื่อม พร้อมพัฒนากระบวนการให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ตลอดจนระบบการควบคุมคุณภาพทางวิศวกรรมที่ รัชดาพร กริอุณะ (2542) ได้ทำการค้นคว้าอิสระเชิงวิทยานิพนธ์เรื่องวิธีของทาคุชิสำหรับการควบคุมคุณภาพทางวิศวกรรม โดยได้รายงานว่าวิธีของทาคุชิสำหรับการควบคุมคุณภาพทางวิศวกรรมเป็นการวางแผนการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่จะทำให้ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนจากค่าเป้าหมายน้อยที่สุด และเสียค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด และนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินการครั้งต่อไป แผนการทดลองที่ทาคุชิเลือกใช้ คือ การทดลองแฟคทอเรียลแบบสัดส่วน และได้ดัดแปลงการจัดเรียงแบบออโธกอนอลโดยวิธีของทาคุชิได้นำไปใช้ในทางอุตสาหกรรมเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการทดลอง

ในส่วนของการศึกษาวิจัยในช่วง 3 – 4 ปีที่ผ่านมา ได้มีการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองมาใช้กันเพิ่มมากขึ้นโดย พีรพันธ์ บางพาน (2546) ได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแกะเมล็ดลำไยด้วยเครื่องแกะเมล็ดลำไยชนิดจานหมุน โดยอาศัยเทคนิคการออกแบบการทดลองมาใช้ประเมินผล และหลักการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology; RSM) ด้วยการออกแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Design; CCD) ทดลองกับลำไยพันธ์อีดอ โดยกำหนดปัจจัย 3 ปัจจัย คือ ความดันในการแกะเมล็ดลำไย ความลึกในการแกะเมล็ดลำไย และขนาดของผลลำไย เพื่อให้ได้ข้อมูลในเชิงสถิติและถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ได้ไปสู่ชุมชนเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ในท้องถิ่นให้มีมูลค่าสูงขึ้น และ วรพจน์ ศิริรักษ์ (2549) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการเปรียบเทียบคุณภาพผิวเคลือบที่ได้จากการพ่นเคลือบอาร์คไฟฟ้าด้วยลวดโลหะที่ผลิตในประเทศไทย กับลวดโลหะที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ เพื่อช่วยลดต้นทุนในการพึ่งพาเทคโนโลยีต่างประเทศ โดยการหาค่าสภาะที่เหมาะสมของปัจจัยเพื่อให้ได้ผิวเคลือบที่มีคุณสมบัติที่ดี โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทรอเรียล 2^{6-2} เพื่อกรองปัจจัย 6 ปัจจัย จากนั้นใช้การ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) และแบบแฟกทรอเรียล 3 ระดับ ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาคุณสมบัติที่ดีที่สุดของผิวเคลือบ

ในทุกการศึกษาที่ผ่านมามีการใช้การออกแบบการทดลองหลายๆแบบ แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การศึกษา ระดับปัจจัย และข้อมูลดิบ ซึ่งในการศึกษาค้นคว้าอิสระนี้พอได้มาเป็นแนวทางในการศึกษา คือ การใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะที่สุดสำหรับการล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีพีเอชสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

ส่วนผลงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับกระบวนการล้างเมมเบรนนั้นไม่แพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ ซึ่งทำให้ผู้ค้นคว้าจึงต้องศึกษาจากหนังสือเรียน คู่มือจากผู้ผลิตเมมเบรน ประสบการณ์การทำงานและสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญในบริษัทและบริษัทผู้ออกแบบและก่อสร้างระบบผลิตน้ำเพื่อหาศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการล้างเมมเบรน

ในส่วนวิธีการล้างเมมเบรน ไพศาล วีรกิจ (2549) ได้เขียนรายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีการล้างเมมเบรนของระบบผลิตน้ำรีเวอร์สออสโมซิส และข้อจำกัดในการล้าง โดยการทำน้ำยาเคมีที่ผสมแล้วให้ร้อนขึ้นไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส จะช่วยให้การล้างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

บริษัท Dow Chemical (1993) มีรายละเอียดข้อจำกัดในการล้างของเมมเบรน FILMTEC^{TM} Membranes ขนาด 8 นิ้ว ยาว 40 นิ้ว รุ่น BW30LE-440 คือ อุณหภูมิที่เหมาะสมไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 1 - 12 และได้แนะนำค่าอัตราการไหลในการชะล้างสำหรับเมมเบรนขนาด 8 นิ้วไว้ที่ 6 – 9 ลูกบาก์ศเมตรต่อชั่วโมง (อัตราการไหลต่อ 1 หลอดบรรจุเมมเบรน) ซึ่งเอกสารแสดงในภาคผนวก ง

จากการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปและกำหนดปัจจัยในการล้างเมมเบรนได้ 3 ปัจจัย ดังนี้ คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิของสารเคมี และอัตราการไหลของสารเคมี ซึ่งในการศึกษาค้นคว้าแบบอิสระนี้จะทำการศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะที่สุดเพื่อหาสภาวะที่เหมาะที่สุดสำหรับการล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีพีเอชสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบผลิตน้ำรีเวอร์สออสโมซิส

2.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

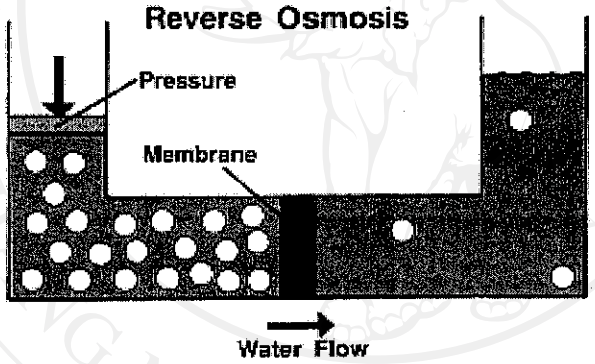
ในการค้นคว้าแบบอิสระนี้ ผู้ค้นคว้าจะทำการทดลองเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการล้างเมมเบรนด้วยสารเคมีพีเอชสูงของระบบผลิตน้ำรีเวอร์สออสโมซิส โดยมีแนวความคิดในการนำหลักการออกแบบการทดลองมาประเมินผลเพื่อให้มาซึ่งข้อมูลในเชิงสถิติตามหลักการและแนวความคิดดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.1 หลักการทำงานของระบบผลิตน้ำรีเวอร์สออสโมซีสและกระบวนการล้าง

2.2.1.1 หลักการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis; RO)

เมื่อนำของเหลวที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันมาใส่ในภาชนะใบหนึ่งและวางแผ่นเมมเบรนที่ยอมให้แต่ละของเหลวไหลผ่านมาวางกั้นระหว่างของเหลวทั้งสองนั้น โดยปรากฏการณ์ธรรมชาต ของเหลวที่เข้มข้นกว่าจะดูดเอาของเหลวที่เจือจางกว่าเข้ามาผสม เพื่อให้เกิดความเจือจาง และเมื่อเกิดความเจือจางเท่ากันทั้งสองฝ่ายแล้ว ปรากฏการณ์นี้จะหยุดเพราะเกิดการสมดุล และระดับของเหลวจะแตกต่างกัน ปราฏการณ์นี้เรียกว่า “Osmosis” ถ้าไม่ต้องการให้เกิดปรากฏการณ์นี้ก็ต้องใช้ความดันมากดดันของเหลวที่มีความเข้มข้นกว่าไว้ และความดันที่ต้องใช้นี้เรียกว่า “Osmotic Pressure” โดยถ้าต้องการให้ของเหลวที่มีความเข้มข้นมากกว่าไหลไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นเจือจางกว่า ต้องใช้ความดันที่มากกว่า “Osmotic Pressure” เข้ามาช่วยและกลายเป็นกระบวนการ “Reverse Osmosis” ดังรูป 2.1



รูป 2.1 หลักการของรีเวอร์สออสโมซิส

(กีรติ พัฒนสารินทร, 2546)

การที่ระบบสามารถกำจัดสารละลายต่างๆได้ เนื่องจากเมมเบรนยอมให้เฉพาะโมเลกุลของน้ำไหลผ่าน ไอออนต่างๆของเกลือจะถูกเมมเบรนผลักดันไม่สามารถผ่านได้ ส่วนโมเลกุลที่ไม่ถูกเมมเบรนผลักก็จะถูกกำจัดโดยการกรองติดค้าง (Seive) โดยระบบรีเวอร์สออสโมซิสมีความสามารถในการกำจัดสารละลาย และคอลลอยด์ อาทิเช่น สารละลายในน้ำ (Total Dissolved Solid) ความกระด้าง และสารอินทรีย์ต่างๆ เป็นต้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.1.2 ประสิทธิภาพการกรอง

ด้านคุณภาพในการกรอง คือ %Salt Rejection เป็นค่าที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของเมมเบรนในการกำจัดพวกเกลือแร่ต่างๆในน้ำ โดยสามารถอธิบายได้ดังสมการ 2.1

$$\%SaltRejection = \left(1 - \frac{EC_{Product}}{\frac{EC_{Feed} - EC_{Reject}}{2}}\right) \times 100 \quad (2.1)$$

โดยทั่วไป % Salt Rejection ของสารละลายอนินทรีย์และสารละลายอินทรีย์ มีค่าประมาณ 99% และ 95 - 99% ตามลำดับ ส่วน %Salt Rejection ของคอลลอยด์ต่างๆ เช่น แบคทีเรีย ความขุ่น ฯลฯ มักสูงถึง 100%

2.2.1.3 ปริมาณการกรอง

%Recovery หมายถึง อัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำสะอาดที่ผลิตได้ ต่อปริมาณน้ำดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำสะอาด ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\%Recovery = 100\frac{Q_{Product}}{Q_{Feed}} \quad (2.2)$$

$$\%Recovery = 100\frac{Q_{Product}}{Q_{Product} + Q_{Reject}} \quad (2.3)$$

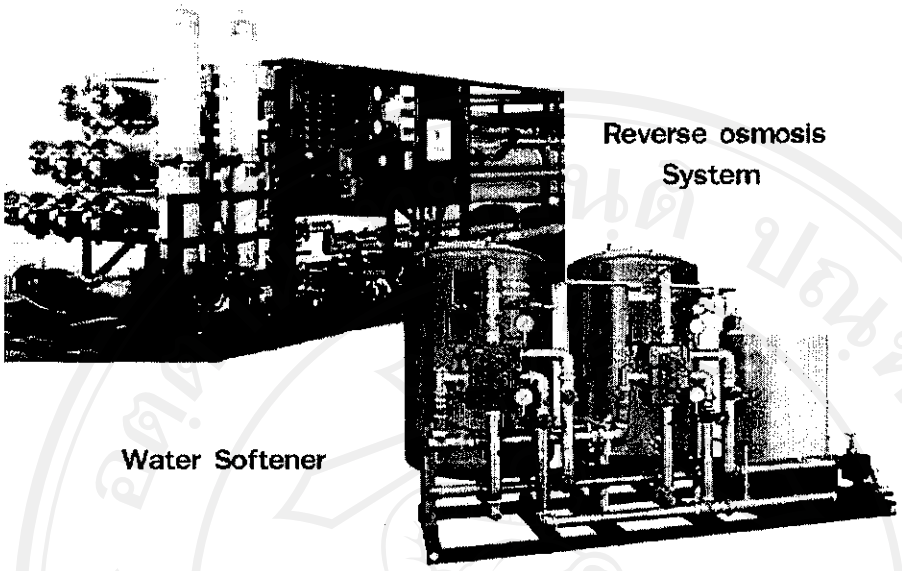
ส่วนใหญ่ระบบรีเวอร์สออสโมซิสจะมี % Recovery ประมาณ 50 – 70 % เพราะต้องมีการระบายน้ำที่มีความเข้มข้นสูงทิ้งเพื่อลดความเข้มข้นของสารละลายที่สะสมอยู่ในระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Goshu Kohsan CO., LTD, 2540)

2.2.1.4 ส่วนประกอบของระบบรีเวอร์สออสโมซิส

ในระบบรีเวอร์สออสโมซิสนั้นมีส่วนประกอบหลักๆโดยทั่วไป แสดงดัง รูป 2.2 และ 2.3 ซึ่งมีรายละเอียดของส่วนประกอบของระบบผลิตน้ำรีเวอร์ออสโมซิส ดังนี้

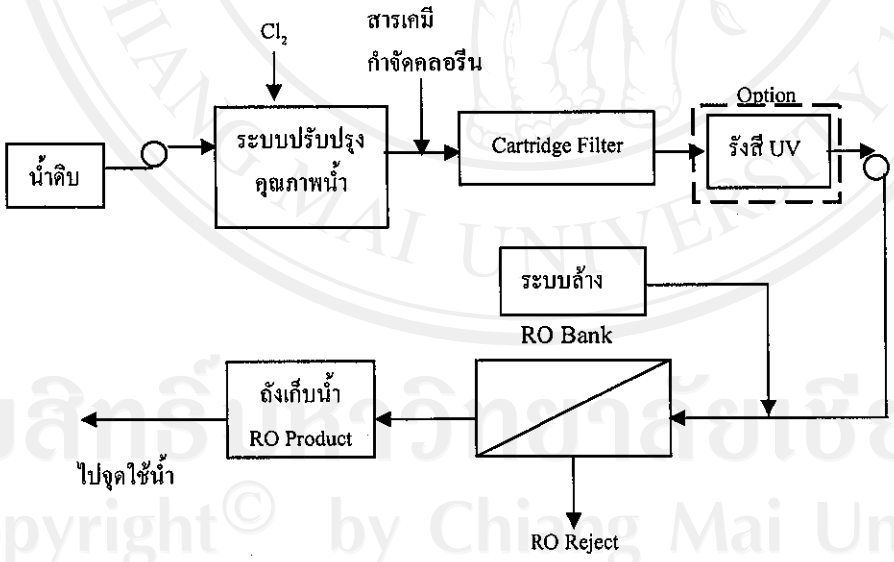
- ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ เป็นระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนเข้าสู่ระบบรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งการเลือกระบบที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำดิบ ในบางกรณีถ้าน้ำดิบมีความกระด้างสูง ก็ต้องทำการติดตั้ง Water Softener ในระบบเพื่อกำจัดความกระด้างออกไปก่อน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูป 2.2 ระบบผลิตน้ำรีเวอร์สออสโมซิสและระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ

(กีรติ พัฒนสารินทร, 2546)



รูป 2.3 แผนผังระบบผลิตน้ำรีเวอร์สออสโมซิสและส่วนประกอบต่างๆ

(ไพศาล วีรกิจ, 2549)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- ระบบเติมคลอรีน เพื่อฆ่าแบคทีเรีย และสารชีวภาพอื่นๆ
- ระบบเติมสารเคมีกำจัดคลอรีน เพื่อกำจัดคลอรีนอิสระออกจากน้ำเนื่องจากมีผลสามารถทำลายเนื้อเยื่อของเมมเบรน
- ระบบการกรองก่อนเข้าเมมเบรนโดยใช้ Cartridge Filter เป็นการ Pre-Filter น้ำอีกครั้งหนึ่งขนาดการกรองอยู่ระหว่าง 1 – 5 ไมครอน
- ระบบฆ่าเชื้อแบคทีเรียด้วยรังสี UV ใช้ในกรณีที่ไม่ต้องการใช้คลอรีน
- ปั๊มแรงดัน (RO Feed Pump) เป็นเครื่องสูบน้ำความดันค่อนข้างสูงจนถึงความดันสูงมากขึ้นอยู่กับปริมาณสารละลายในน้ำดิบ และวัสดุเมมเบรนที่ใช้ เครื่องสูบน้ำที่ใช้อาจจะเป็นเมมเบรนหอยโข่ง มีใบพัดเดียวหรือหลายใบพัด หรืออาจจะเป็นแบบเทอร์โบก็ได้เช่นเดียวกัน
- RO Bank เป็น RO Module อยู่ใน Pressure Vessel ซึ่งอาจจะเป็น 1 Stage หรือ 2 Stages ขึ้นอยู่กับคุณภาพน้ำผลผลิตและ %Recovery ที่ต้องการ
- ถังเก็บน้ำผลผลิตรีเวอร์สออสโมซิสเพื่อที่จะส่งจ่ายน้ำไปใช้ตามจุดต่างๆ และต้องมีปริมาณน้ำเพียงพอไว้ใช้ในระหว่างที่ทำการล้างเมมเบรน
- ระบบสำหรับการล้างเมมเบรนจะประกอบด้วยถังน้ำยาเคมีที่ใช้ในการล้าง เครื่องสูบน้ำยาเคมีเข้าระบบและท่อต่างๆ สำหรับต่อเข้าระบบอาจจะเป็นระบบที่ติดตั้งถาวรอยู่กับระบบหรืออาจจะเป็นระบบแบบเคลื่อนย้ายได้
- ระบบท่อในระบบ RO ท่อสำหรับน้ำก่อนเข้าระบบ RO อาจเป็นเหล็ก หรือท่อ PVC ก็ได้ ส่วนท่อของน้ำ RO Product ควรเป็นท่อสแตนเลส 16 หรือท่อ PVC หรืออาจใช้ท่อ UPVC (Unplasticized PVC) ก็ได้ ส่วนน้ำ reject ควรเป็นท่อ PVC
- อุปกรณ์ช่วยในการเดินระบบให้มีประสิทธิภาพ เช่น เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter) ของ RO Product Water และ RO Reject เครื่องปรับความดัน (Back Pressure Valve) ในท่อ Reject เกจวัดความดันของระบบ และเครื่องวัดความบริสุทธิ์ของน้ำ (TDS Meter, Resistivity Meter หรือ Conductivity Meter)

2.2.1.5 การล้างเมมเบรนและประเภทของการอุดตัน

การกรองน้ำโดยใช้เมมเบรนนั้นจะมีอายุการใช้งานหรือการเสื่อมประสิทธิภาพในการกรอง โดยจะมีสิ่งที่บ่งบอกถึงสิ่งดังกล่าวดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- เมื่ออัตราการไหลของน้ำผลผลิตลดลง 10 – 15 % จากที่เคยกรองได้
- ความดันแตกต่างกันระหว่างด้าน Feed และด้าน Reject เพิ่มขึ้น 10 – 15 %
- อัตรา %Salt Rejection ลดลง 1 - 2 %

การล้างเมมเบรนให้ได้ผลนั้นต้องใช้สารเคมีให้เหมาะสมกับประเภทของการอุดตัน มิฉะนั้นแล้วการล้างจะไม่สะอาด หรือนำประสิทธิภาพของการกรองกลับมาสู่สภาพปกติ โดยประเภทของการอุดตันตามสารเคมีที่ใช้ในการล้าง ดังนี้

- สารเคมีที่มีค่าพีเอชต่ำหรือสภาพเป็นกรด

ส่วนใหญ่จะเป็นการอุดตันที่เกิดที่เกิดจากสารอนินทรีย์ (Inorganics) เช่น ตะกรัน $CaCO_3$ การอุดตันแบบนี้จะทำให้การไหลของน้ำผลผลิตและจะมีส่วนทำให้ค่า Salt Rejection ลดลงด้วย การตกตะกรันของ $CaCO_3$ บนผิวเมมเบรน จะทำให้เกิดค่า pH สูงถึง 11.0 ในบริเวณที่เกิดตะกรัน (เนื่องจาก $CaCO_3$ มีสภาพเป็นด่าง) ซึ่งโดยปกติตะกรัน $CaCO_3$ จะละลายน้ำในสภาพที่เป็นกรด ดังนั้นการใช้กรดหรือน้ำยาที่มีสภาพเป็นกรดก็จะสามารถทำความสะอาดเมมเบรนได้ดี

ในส่วนการอุดตันที่เกิดจากตะกรันซัลเฟต เช่น $CaSO_4$, $BaSO_4$ หรือ $SrSO_4$ การอุดตันแบบนี้จะทำให้ต้องใช้ความดันในการกรองเพิ่มขึ้น และถ้าอุดตันนานๆก็จะมีผลต่อการไหลของ RO Product และ %Salt Rejection ด้วย การอุดตันด้วย $CaSO_4$ อย่างเดียวจะกำจัดได้ด้วยการใช้น้ำยาล้างทำความสะอาดที่มีเกลือ CO_3 สูง ผสมด้วย EDTA ซึ่ง $CaSO_4$ จะถูกเปลี่ยนเป็น $CaCO_3$ และละลายตัวออกมา แต่ถ้าเป็นการอุดตันด้วย $BaSO_4$ และ $SrSO_4$ แล้วจะล้างออกไม่ได้ จำเป็นต้องใช้วิธีป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกรันอย่างเดียวด้วยการเติมน้ำยาป้องการตกตะกรัน (Scale Inhibitor) และการอุดตันที่เกิดจากเหล็ก เหล็กในน้ำมี Fe^{+2} และ Fe^{+3} ซึ่ง Fe^{+2} จะละลายน้ำ ส่วน Fe^{+3} จะไม่ละลายน้ำ การอุดตันแบบนี้จะทำให้ต้องใช้ความดันในการกรองเพิ่มขึ้น ถ้ายังอุดตันไม่มากนัก การใช้กรดหรือเคมีที่มี EDTA ผสมก็จะล้างได้ผลดี แต่ถ้าอุดตันมาก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการอุดตันในรูปของ Fe^{+3} จำเป็นที่จะต้องเปลี่ยน Fe^{+3} ให้เป็น Fe^{+2} ก่อนด้วยการใช้สารละลาย $NaHSO_3$ แล้วจึงตามด้วยการล้างด้วยกรดหรือ EDTA

- สารเคมีที่มีค่าพีเอชสูงหรือสภาพเป็นด่าง

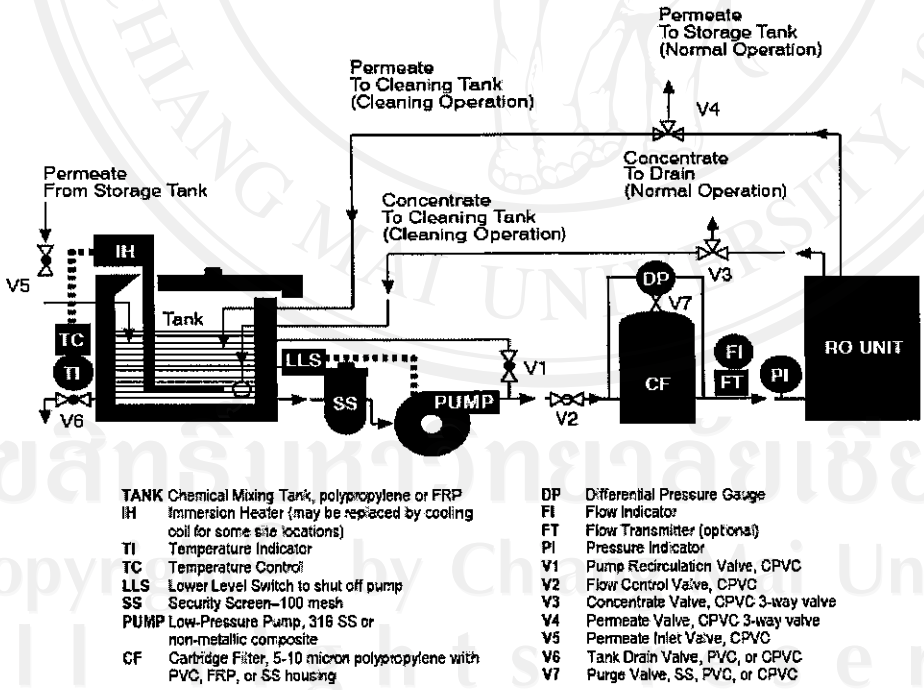
ส่วนใหญ่จะเป็นการอุดตันที่เกิดที่เกิดจากสารอินทรีย์ (organics) การอุดตันจากสารอินทรีย์แขวนลอย สารอินทรีย์แขวนลอยจะเป็นพวก Numic Acids หรือพวกโคลนที่มาจากผิวดิน การอุดตันจะทำให้ต้องใช้ความดันในการกรองมากขึ้น การล้างด้วยสารเคมีที่มีสภาพเป็นด่างก็จะได้ผลเพียงพอ ในส่วนของการอุดตันจากสารชีวภาพ (Bacteria) จะทำให้ต้องใช้การล้างด้วยสารเคมีที่มีสภาพเป็นด่าง และที่ pH สูงกว่า 11.0 จะกำจัดสารชีวภาพได้หมดและในบางกรณี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารชีวภาพจะเจริญเติบโตห่อหุ้มเหล็กไว้ภายใน เรียกว่าการอุดตันด้วย Ion Bacteria เมื่อเกิดการอุดตันแบบนี้ก็จะมีผลแบบเดียวกันกับการอุดตันด้วยสารชีวภาพ แต่การล้างทำความสะอาดจะยุ่งยากกว่า การล้างหลายๆครั้งด้วย EDTA ที่ pH สูง แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดและตามด้วยสารเคมีที่มีสภาพเป็นด่างจะให้ผลดีที่สุด ในส่วนของการอุดตันที่เกิดจากซิลิกา (SiO_2) ซึ่งเป็นสารอนินทรีย์ก็จะทำให้ต้องใช้ความดันในการกรองเพิ่มขึ้น และถ้าเนิ่นนานเข้าอาจจะหลุดไหลผ่านเมมเบรนเข้ามาใน RO Product การล้างควรจะใช้สารเคมีที่มีสภาพเป็นด่าง

ในกระบวนการการล้างเมมเบรน โดยทั่วไปมีแผนผังของระบบการล้างดังรูป 2.3 และขั้นตอนวิธีการ ดังนี้

- เติมน้ำลงในถังผสมน้ำยาเคมี(Mixing Tank)
- ถ่ายน้ำออกจาก Vessel ให้มากที่สุด
- เติมน้ำยาเคมีสำหรับการล้างลงในถังผสมน้ำยาเคมีตามคำแนะนำของผู้ผลิต หรือตามค่า pH โดยให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันและไม่มีตะกอนหลงเหลือ
- การทำน้ำยาเคมีที่ผสมแล้วให้ร้อนขึ้นไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส จะช่วยให้การล้างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



รูป 2.4 แผนผังระบบการล้างเมมเบรน
(Dow Chemical Company, 1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- ต่อท่อยางกับท่อต่างๆของระบบให้ถูกต้อง
- เปิดวาล์วบนท่อ RO Reject ให้เต็มที่แล้วค่อยๆเปิดวาล์วปล่อยน้ำยาเคมีเข้าไปใน Vessel จนเต็ม
- เริ่มหมุนเวียนน้ำยาเคมี โดยให้การไหลเป็นไปตามทิศทางของการกรองและไหลผ่านท่อ RO Reject ย้อนกลับมาลงถังผสมน้ำยาเคมี ปรับอัตราการไหลให้ได้ตามที่กำหนด ในระหว่างการล้างจะมีน้ำผลผลิตเกิดขึ้นด้วยการให้ไหลย้อนกลับไปที่ถังเช่นเดียวกัน
- ล้างหมุนเวียนอย่างน้อย 30 นาที ถ้านานกว่านี้ก็จะยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพการล้างให้สูงขึ้น
- ปล่อยน้ำยาเคมีทิ้งลงท่อระบายน้ำไปสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย แล้วเปิดน้ำ Feed Water เข้าไปล้างน้ำยาเคมีให้หมดออกจากระบบ
- ปรับวาล์วบนท่อ RO Reject ให้เหมาะสมเหมือนกับก่อนที่จะล้าง แล้วเริ่มส่งน้ำ Feed Water เข้าระบบแล้วเปิดน้ำผลผลิตทิ้งไปจนกว่าค่าควบคุมในการเดินระบบเป็นไปตามที่ต้องการ จึงเริ่มใช้ได้ตามปกติ (ไพศาล วีรกิจ, 2549)

2.2.2 หลักการที่นำมาใช้ในการออกแบบการทดลอง

2.2.2.1 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment :DOE) เป็นเทคนิคทางสถิติชั้นสูงที่ใช้ในการปรับค่าสภาวะของกระบวนการให้เป็นไปตามสภาพที่เราต้องการ ซึ่งข้อแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดระหว่างวิธีการโดยทั่วไปกับเทคนิคของการออกแบบการทดลอง คือ วิธีการโดยทั่วไปมักเป็นการทดลองแบบลองผิดลองถูก หรือใช้การทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า (One-Factor-at-a-Time) เช่น ถ้าเราสงสัยว่าเราควรที่จะต้องปรับตั้งค่าของอุณหภูมิในกรอบชิ้นงาน เวลาที่ใช้ในการอบ และส่วนผสมของชิ้นงานเท่าไรดีจึงจะทำให้ชิ้นงานที่ได้มีคุณภาพสูงสุดไม่เป็นข้อเสีย ดังนั้นแนวทางที่เรามักใช้กันโดยทั่วๆ ไปก็คือ เรามักจะไปลองปรับตั้งในส่วนของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบก่อน (ในขณะที่คงค่าของเวลาที่ใช้ในการอบกับอัตราส่วนผสมไว้) เมื่อทดลองจนได้ค่าของอุณหภูมิที่เราต้องการแล้ว จึงค่อยไปปรับตั้งเรื่องของเวลา (ในขณะที่คงที่ค่าของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบกับอัตราส่วนผสมไว้) จากนั้นสุดท้ายจึงไปทำการปรับตั้งเรื่องของอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม (โดยการคงที่ค่าของอุณหภูมิกับเวลาไว้) และเราอาจทำซ้ำวงจรนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อที่จะหาจุดที่ดีที่สุดของกระบวนการ ซึ่งลักษณะนี้เรียกว่า การทดลองแบบ One Factor at a

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

Time นั่นเอง โดยทั่วไปแล้วการออกแบบการทดลองแบบ One Factor at a Time จะให้ผลตอบสนองเข้าสู่จุดมุ่งหมายที่เราต้องการได้ช้ามาก และสิ้นเปลืองทรัพยากรในการวิเคราะห์ รวมถึงต้องเก็บข้อมูลมากและยังไม่เหมาะสมอย่างยิ่งกับกระบวนการที่มีผลของความสัมพันธ์ร่วม (Interaction Effect) ระหว่างตัวแปรของกระบวนการด้วยกันเอง

หลักการพื้นฐาน 3 ประการ สำหรับการออกแบบการทดลองคือ

- เรพลิเคชัน (Replication) หมายถึง การทดลองซ้ำ ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ ทำให้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งการทดลองเรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้
- แรนดอมไมเซชัน (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลจะต้องเป็นปัจจัยแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ การที่เราสุ่มการทดลองทำให้เราสามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้
- บล็อกกิ้ง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึง ส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิ้ง

ข้อดีของการออกแบบการทดลองคือ ให้ผลของความแม่นยำและความถูกต้องในการวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างสูง โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติที่แสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการ นอกจากนี้ยังมีความรวดเร็วในการดำเนินการตรวจสอบสาเหตุของปัญหา

การใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ทุกคนที่เกี่ยวข้องจะต้องมีความเข้าใจล่วงหน้าว่า เรากำลังศึกษาอะไรอยู่ จะเก็บข้อมูลได้อย่างไร และจะวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บนั้นได้อย่างไร ขั้นตอนในการดำเนินงานอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

- ทำความเข้าใจถึงปัญหา

ในขั้นตอนนี้ เราอาจจะต้องพยายามพัฒนาแนวคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่เราจะต้องหาข้อมูลสำหรับป้อนเข้าจากบุคคลที่มีความรู้ความชำนาญในแต่ละด้านนั้น เป็นองค์ประกอบหนึ่งของการออกแบบการทดลอง เพราะเป็นจุดเริ่มต้นของการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ดำเนินงานคือ การใช้ประสบการณ์คาดคะเนว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อปัญหาที่เราสนใจ ถ้าหากไม่มีในส่วนของประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญเข้ามาเกี่ยวข้อง การออกแบบการทดลองก็ยังคงดำเนินต่อไป แต่จะใช้เวลาที่นานขึ้น เพราะต้องเสียเวลาในการตรวจสอบทุกๆ ปัจจัยที่มีอยู่ทั้งหมด

- เลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต ในการทดลองที่เหมาะสม

ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างทำการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง จะต้องพิจารณาด้วยว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ ณ จุดที่กำหนดได้อย่างไร และจะวัดผลตอบได้อย่างไร ดังนั้นในกรณีเช่นนี้ ผู้ทดลองจะต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งความรู้นี้อาจจะได้มาจากประสบการณ์และความรู้จากทางทฤษฎี มีความจำเป็นที่เราจะต้องตรวจสอบดูว่าปัจจัยที่กำหนดขึ้นมานี้มีความสำคัญหรือไม่ และเมื่อวัตถุประสค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Factor Screening) ซึ่งต้องเลือกวิธีการคัดกรองปัจจัยให้เหมาะสมกับการทดลอง และควรจะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ การเลือกขอบเขตของการทดลองก็มีความสำคัญเช่นกัน ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเราควรเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ หมายถึงว่าขอบเขตที่ปัจจัยแต่ละตัวจะเปลี่ยนแปลงได้ควรมีค่ากว้างๆ และเมื่อเราได้เรียนรู้เพิ่มขึ้นว่า ตัวแปรใดมีความสำคัญและที่ระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตลงได้

ตาราง 2.1 รูปแบบและลักษณะการทดลอง

รูปแบบการทดลอง	ลักษณะการทดลอง	เวลาในการวิเคราะห์	ความถูกต้อง	งบประมาณ
Single Factor	การทดลองสำหรับหนึ่งปัจจัย โดยปัจจัยดังกล่าวเป็นปัจจัยสำคัญที่คาดว่ามีผลกระทบสูงสุดต่อปัญหา	รวดเร็ว	ปานกลาง	น้อย
Factorial Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยและเป็นการทดลองเต็มรูปแบบ	ใช้เวลานาน	มากที่สุด	มาก
2k Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยและเป็นการทดลองเต็มรูปแบบแต่กำหนดระดับของแต่ละปัจจัยอยู่ที่ปัจจัยละ 2 ระดับเท่านั้น	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
2k-p Design	การทดลองที่มีมากกว่าหนึ่งปัจจัยแต่ไม่ทำการทดลองแบบเต็มรูปแบบทั้งหมด	รวดเร็ว	น้อย	น้อย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- เลือกตัวแปรตอบสนอง

ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทดลองควรจะแน่ใจว่าตัวแปรนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ บ่อยครั้งที่ค่าเฉลี่ยหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (หรือทั้งคู่) ของกระบวนการจะเป็นตัวแปรตอบสนอง เป็นไปได้ว่าในการทดลองหนึ่งอาจมีตัวแปรตอบสนองหลายตัว และมีความจำเป็นอย่างมากที่เราจะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรตอบสนอง และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลองจริง

- เลือกรูปของการทดลองที่เหมาะสม

ถ้ากิจกรรมการวางแผนก่อนการทดลองทำได้อย่างถูกต้อง ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่ง่ายมาก การเลือกการออกแบบเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (Replicate) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการตัดสินใจว่า ควรจะใช้วิธีการจัดกลุ่ม (Block) หรือการจัดแบบสุ่ม (Randomizations) อย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการวิศวกรรมส่วนมาก เราจะทราบตั้งแต่เริ่มต้นแล้วว่า ปัจจัยบางตัวจะมีผลต่อค่าตอบสนองที่เกิดขึ้น ดังนั้นเราจะหาว่าปัจจัยตัวใดที่ทำให้เกิดความแตกต่าง และประมาณขนาดของความแตกต่างที่เกิดขึ้น

- ทำการทดลอง

เมื่อทำการทดลองเราจะต้องทำการทดลองอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามการทดลองที่ได้ออกแบบไว้ ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นเกี่ยวกับการทดลองในขั้นตอนนี้จะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น

- วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

ใช้วิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้เป็นอย่างดี และถ้าเราทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ วิธีการทางสถิติที่จะนำมาใช้นั้นจะเป็นวิธีการที่ไม่ซับซ้อน ข้อได้เปรียบของวิธีการทางสถิติ เป็นเครื่องช่วยในการตัดสินใจอย่างมีประสิทธิภาพ และถ้าเรานำเอาวิธีการทางสถิติมารผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ จะทำให้ข้อสรุปที่ได้ออกมานั้นมีเหตุผลสนับสนุนและมีความน่าเชื่อถือ

- ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

เมื่อเราได้วิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทาง นอกจากนี้แล้วการทำการทดลองเพื่อยืนยันผล (Confirmation Testing) ควรจะทำขึ้นเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นอีกด้วย

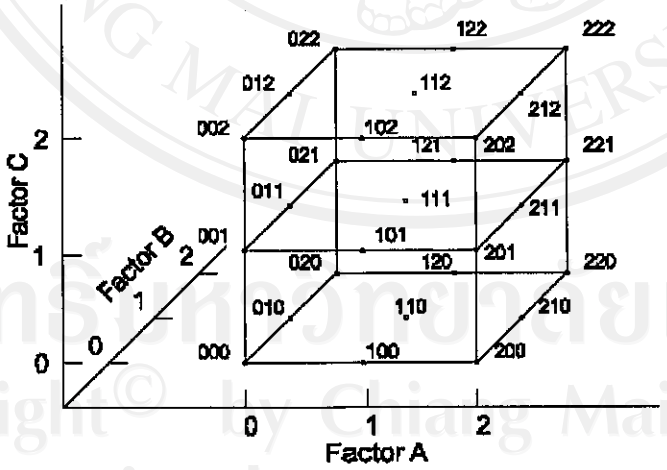
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทรอเรียลแบบ 3 ระดับ

การออกแบบเชิงแฟกทรอเรียล 3^k หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทรอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับและระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลาง และสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามเป็นตัวเลข 0 (ต่ำ) 1 (ปานกลาง) และ 2 (สูง) การทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ 3^k จะแทนด้วยตัวเลข k ซึ่งการออกแบบ 3^k เหมาะสมกับผลตอบที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง

- การออกแบบ 3^3

สมมุติว่ามีปัจจัย 3 ปัจจัย (A, B และ C) ที่อยู่ในความสนใจแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ ซึ่งถูกจัดอยู่ในรูปแบบของการทดลองเชิงแฟกทรอเรียล การออกแบบในกรณีนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟกทรอเรียลแบบ 3^3 โครงสร้างของการทดลองและสัญลักษณ์ของการทดลองร่วมปัจจัยต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.5 ในการทดลองนี้ประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยจำนวน 27 การทดลองดังนั้นจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 26 ผลหลักแต่ละตัวจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 อันตรกริยาแบบสองปัจจัยแต่ละตัวจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 4 และอันตรากริยาแบบสามปัจจัยจะมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 8 ถ้าทำการทดลองทั้งสิ้น n เรพลิเคต จะมีระดับขั้นความเสรีผลรวมเท่ากับ $n3^3$-1 และมีค่าผิดพลาดของระดับขั้นความเสรีเท่ากับ $3^3(n-1)$ ค่าผลรวมของกำลังสองสามารถหาได้จากวิธีปกติเหมือนการออกแบบเชิงแฟกทรอเรียล



รูป 2.5 การทดลองร่วมปัจจัยสำหรับการออกแบบ 3^3

(ปารเมศ ชุติมา, 2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

- รูปทั่วไปของการออกแบบ 3^k

แนวความคิดของการออกแบบ 3^2 และ 3^3 สามารถขยายไปสู่กรณีของปัจจัย k ตัว แต่ละตัวประกอบด้วย 3 ระดับ นั่นคือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 3^k สัญลักษณ์แบบดิจิทัลถูกนำมาใช้แทนการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้น เช่น 0120 หมายถึงการทดลองร่วมปัจจัยในการออกแบบ 3^4 ที่มี A และ D อยู่ที่ระดับต่ำ B อยู่ที่ระดับกลาง และ C อยู่ที่ระดับสูง การออกแบบ 3^k นี้ จะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสิ้น 3^k การทดลองและมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 3^k - 1 จากการทดลองร่วมปัจจัยเหล่านี้จะทำให้เกิดผลรวมของกำลังสองของผลหลัก k ตัว ที่แต่ละตัวมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2 อันตรกริยาแบบสองปัจจัยจำนวน C_k^2 ซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 4 และอันตรกริยาแบบ k ปัจจัยซึ่งมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 2^k ถ้ามีการทดลองทั้งสิ้น n เรพลิเคด จะทำให้เกิดระดับขั้นความเสรีทั้งหมดเท่ากับ $n3^k$-1 และค่าผิดพลาดของระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 3^k(n-1) โดยการออกแบบจะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตามขนาดของ k เช่น การออกแบบ 3^3 จะประกอบด้วยการทดลองร่วมปัจจัยทั้งสิ้น 27 ตัวต่อหนึ่งเรพลิเคด การออกแบบ 3^4 จะมี 81 ตัว การออกแบบ 3^5 จะมี 24 ตัว เช่นนี้ไปเรื่อย ดังนั้นบ่อยครั้งที่เราจะทำการทดลองแบบ 3^k เพียง 1 เรพลิเคดเท่านั้น และนำอันตรกริยาขั้นสูงมารวมกันเพื่อให้ได้ค่าประมาณของค่าความผิดพลาด ถ้าอันตรกริยาแบบ 3 ปัจจัยหรือมากกว่าสามารถละเลย ดังนั้นการออกแบบ 3^3 ที่มี 1 เรพลิเคดจะให้ค่าระดับขั้นความเสรีสำหรับความผิดพลาดเท่ากับ 48 ซึ่งการออกแบบ 3^4 ที่มี 1 เรพลิเคด จะให้ค่าระดับขั้นความเสรีสำหรับความผิดพลาดเท่ากับ 48 ซึ่งการออกแบบเช่นนี้ยังคงใหญ่เกินไปสำหรับปัจจัย k มากกว่าหรือเท่ากับ 3 (ปารเมศ ชุติมา, 2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved