



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

สมรรถนะของที่ปรึกษาชาญฉลาดสำหรับระบบควบคุม

โดย

ผศ.ดร. ธงไชย ศรีนพคุณ

สิงหาคม 2544

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

สมรรถนะของที่ปรึกษาชาวจีนในตลาดสำหรับระบบควบคุม

ผศ.ดร. ธงไชย ศรีนพคุณ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ชุดโครงการ ทู่นวิจัยหลังปริญญาเอก ปี 2540

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

สมรรถนะของที่ปรึกษาชาญฉลาดสำหรับระบบควบคุม

ผศ.ดร. ธงไชย ศรีนพคุณ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

ชุดโครงการ ทุนวิจัยหลังปริญญาเอก ปี 2540

2000-2001

Investment

© 2007 The Authors
Journal compilation © 2007 Blackwell Publishing Ltd

姓名：_____ 性别：____ 年龄：____

1995年12月15日（水） 晴

1987-1988

03/01/2009 10:00 AM - 03/01/2009 10:00 AM

2005-2006 Financial Statement

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จขึ้นได้เนื่องจากบุคคลที่เกี่ยวข้องคือ นิสิตปริญญาโท ปริญญาตรี เจ้าหน้าที่ฝ่ายคอมพิวเตอร์ และคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี ทั้งนี้รวมถึง สกว. ที่ได้จัดสรรทุนวิจัยให้แก่โครงการ

บทคัดย่อ

- รหัสโครงการ : PDF/37/2540
- หัวข้อโครงการวิจัย : สมรรถนะของที่ปรึกษาชาวจีนสำหรับระบบควบคุม
- ผู้วิจัย : ผศ.ดร.ธงไชย ศรีนพคุณ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- E-mail Address : fengtcs@ku.ac.th
- ระยะเวลาของโครงการ : 1 สิงหาคม 2540 – 31 กรกฎาคม 2542
- วัตถุประสงค์ : 1. พัฒนาโปรแกรมต้นแบบข้ามแพลตฟอร์ม
2. ประยุกต์กับโรงงานต้นแบบผลิตแรมโนนาไซด์
- กรรมวิธีการวิจัย : 1. ถ่ายโอน และปรับปรุงต้นแบบโปรแกรมให้ใช้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
2. จำลองกระบวนการของโรงงานต้นแบบผลิตแรมโนนาไซด์
3. คำนวณและคัดเลือกรูปแบบการควบคุมที่ดีที่สุดของโรงงานต้นแบบ
- ผลการวิจัย : การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรปรับกระบวนการ และตัวแปรที่ต้องการควบคุมของโรงงานแปรรูปแรมโนนาไซด์ พบว่าระบบควบคุมอัตโนมัติของโรงงานจำนวน 19 กระบวนการผลิตจาก 22 กระบวนการผลิตโดยตัดกระบวนการผลิตที่ 5, 11 และ 20 ซึ่งเป็นหน่วยเตรียมเคมีภัณฑ์ต่าง ๆ ออก ได้รูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ของแต่ละกระบวนการจำนวน 2, 192, 648, 200, 120, >1000, 12, 6, >1000, 84, 8, 128, 18, 36, 49, 24, 864 และ 140 รูปแบบตามลำดับ เมื่อทำการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมสามารถจำแนกชนิดของวงควบคุมเป็นการควบคุมความเข้มข้น 86 วง, ความดัน 7 วง, อัตราการไหล 10 วง, ความหนาแน่น 30 วง, อุณหภูมิ 13 วง, สัดส่วนการป้อนสารตั้งต้น 27 วง, ระยะเวลา 31 วง และวงควบคุมระดับสารละลาย 160 วง ตามลำดับ
- สรุปวิจารณ์ : งานวิจัยนี้ ได้นำระบบคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมาใช้พัฒนาโปรแกรมการออกแบบเชิงโครงสร้างที่เริ่มขึ้นบนเครื่อง workstation โปรแกรมที่พัฒนานี้มีความสามารถเทียบเท่ากับของเดิม โดยได้นำไปขยายผลกับการออกแบบโรงงานผลิตแรมโนนาไซด์
- ข้อเสนอแนะและแนวทางวิจัยต่อเนื่อง : โปรแกรมต้นแบบที่พัฒนามาบนระบบคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลมีขีดจำกัดเรื่องการประมวลผล และหน่วยความจำ จึงควรมีการพัฒนาต่อเนื่องโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์แบบขนาน นอกจากนี้การนำระบบผู้เชี่ยวชาญ และการวิเคราะห์ Decoupling Index มาเสริมการคัดเลือกรูปแบบการควบคุม จะช่วยให้ผู้ออกแบบระบบตัดสินใจได้แม่นยำขึ้น
- คำสำคัญ : โรงงานโมนาไซด์, ระบบควบคุมเชิงโครงสร้าง

Abstract

- Project Code** : PDF/37/2540
- Project Title** : Validation of Intelligent Advisor for Control System
- Investigators** : Asst.Prof.Thongchai Srinophakun, PhD.
The department of Chemical Engineering, Kasetsart University
- E-mail Address** : fengtcs@ku.ac.th
- Project Period** : August 1, 1997 – July 31, 1999
- Objective** : 1. Develop the Prototype on Cross Plat form System
2. Apply to Monazite Pilot Plant
- Methodology** : 1. Migsate Prototype software to personal computer
2. Modeling of Monazite Pilot Plant
3. Simulation for the best control configuration of the Plant
- Results** : The objective of the research is to characterize the relationships between manipulated variables and control objective variables of Pilot Scale Monazite Plant. After using this prototype to synthesis control system of the such plant, only 19 unit processes will be desired and process 5, 11 and 20 will not involve in synthesis control system. The results from the program shown all possible control configurations of each unit process. All possible control configurations of each unit process are 2, 192, 648, 200, >1000, 12, 6, >1000, 84, 8, 128, 18, 36, 49, 24, 864 and 140 control configurations respectively. These configurations can be classified into 86 concentration control loops, 7 pressure control loops, 10 flow rate control loops, 30 density control loops, 13 temperature control loops, 27 feed ratio control loops, 31 time control loops and volume control 160 loops respectively.
- Discussion Conclusion** : In this research, the personal computer is employed to develop the prototype of structural design which was originally run on workstation. The validate of this prototype to the design of Monazite Pilot Plant is acceptable.
- Suggestions/Further Implication** : The of personal computer is limited capability by calculation and memory. Therefore, the parallel computer should be introduced including with the expert system and analysis of decoupling index to support designer to classify the control configurations.
- Keywords**: Monazite Pilot Plant, Structural Control.

Executive Summary

โครงการวิจัยเรื่องสมรรถนะของที่ปรึกษาชาวดนลสำหรับระบบควบคุม เริ่มดำเนินการในปี 2540 โดยมี Dr. Paul Lant แห่งมหาวิทยาลัยแห่งรัฐควีนแลนด์เป็นแมธีวิจัย มีวัตถุประสงค์ในการดำเนินการวิจัยต่อเนื่องจากงานวิทยานิพนธ์ เพื่อนำต้นแบบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาขยายผลให้กับอุปกรณ์และเครื่องคอมพิวเตอร์ที่สามารถหาได้ในประเทศ ทำการทดสอบความถูกต้องและนำไปใช้ออกแบบระบบควบคุมให้กับโรงงานจริง

การดำเนินงานชิ้นแรกคือการดัดแปลงโปรแกรมเพื่อให้ใช้กับเครื่อง Super Computer ของ IBM และเครื่อง Workstation ของ Sun นั้น แต่เนื่องจากเครื่อง Super Computer ถูกยกเลิก อีกทั้งเครื่อง Workstation ไม่สามารถ upgrade ให้มีคุณภาพสูงขึ้น จึงต้องเปลี่ยนมาใช้เครื่อง PC บนระบบปฏิบัติการ Window NT และใช้ตัวแปลภาษา C ของบริษัทไมโครซอฟท์แทน การพัฒนาต้นแบบได้เพิ่มเติมการสร้างหน้าต่างติดต่อกับผู้ใช้และเพิ่มเติมหน่วยปฏิบัติการอีกจำนวน 20 หน่วยจากเดิม 16 หน่วย

ขั้นตอนต่อมาคือการทดสอบเพื่อการออกแบบโรงงานต้นแบบผลิตแรมโมนาไซด์ ซึ่งมีหน่วยปฏิบัติการหลัก 21 หน่วย ในแต่ละหน่วยแบ่งเป็นอุปกรณ์ย่อย ๆ การออกแบบระบบควบคุมอยู่บนขอบเขตที่เป็นการออกแบบ หน่วยปฏิบัติการหลักแยกกันรวมทั้งออกแบบเฉพาะหน่วยที่เกี่ยวกับกระบวนการผลิต 18 หน่วย ไม่รวมหน่วยเตรียมสาร 3 หน่วย ผลลัพธ์การออกแบบแสดงในรูปภาพ รวมทั้งชนิดของการควบคุม โดยการคัดเลือกระบบควบคุมที่เหมาะสมใช้เทคนิค Relative Order และใช้ Guide line

ผลลัพธ์ในเชิงการศึกษาประกอบด้วยวิทยานิพนธ์ปริญญาโท 2 เรื่อง ปริญญาตรี 3 เรื่อง บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ 1 เรื่อง บทความสัมมนา 5 เรื่อง และบทความที่ส่งเพื่อพิจารณาตีพิมพ์อีก 1 เรื่อง

ต้นแบบการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับโรงงานแปรสภาพแร่โมนาไซต์

Prototype of Automatic Control System for Pilot Scale Monazite Processing Plant

คำนำ

ปัจจุบันสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้รับความเห็นชอบและอนุมัติจากรัฐบาล ให้ทำการก่อสร้างโรงงานแปรสภาพแร่โมนาไซต์ เพื่อใช้เป็นโรงงานต้นแบบในการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ให้ได้ผลผลิตแร่ธาตุที่มีคุณค่าสูงขึ้น ซึ่งจากการวิจัยของสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติพบว่าในแร่โมนาไซต์มีกลุ่มธาตุหายากต่าง ๆ รวมทั้งยังพบธาตุยูเรเนียมและทอเรียมปนอยู่ในปริมาณค่อนข้างสูง ซึ่งกลุ่มธาตุหายากดังกล่าวนี้เป็นกลุ่มธาตุที่เป็นองค์ประกอบของแร่หลายชนิด และมีคุณค่าทางเศรษฐกิจสูง ซึ่งทำรายได้ทางเศรษฐกิจให้กับประเทศได้ทางหนึ่ง นอกจากนี้ ธาตุหายากต่าง ๆ ที่ได้จากการแปรสภาพแร่โมนาไซต์ จะมีคุณค่าสูงขึ้นเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และสามารถนำธาตุยูเรเนียมและทอเรียม ไปใช้ในการพัฒนาเทคนิคการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เพื่อเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงของประเทศในโอกาสต่อไปได้อีกด้วย

โรงงานต้นแบบแปรสภาพแร่โมนาไซต์เพื่อพัฒนาแร่หายาก ตั้งอยู่บริเวณคลอง 5 จังหวัดปทุมธานี ประกอบด้วยหน่วยกระบวนการผลิตต่าง ๆ ทั้งหมด 22 หน่วยการผลิต ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการหลักดังนี้

- การแปรสภาพโมนาไซต์
- การแยกธาตุวัสดุนิวเคลียร์ ได้แก่ ยูเรเนียม และทอเรียม
- การแยกธาตุหายาก

หน่วยกระบวนการผลิตต่าง ๆ ในโรงงานแปรสภาพแร่โมนาไซต์มีระบบควบคุมซึ่งยังทำงานไม่เป็นระบบอัตโนมัติเพื่อควบคุมการปฏิบัติงานภายในโรงงาน จึงมีผลทำให้ขาดความสะดวกในการปฏิบัติงาน และใช้พนักงานปฏิบัติงานจำนวนมาก เนื่องจากปัจจุบันระบบควบคุมกระบวนการได้เข้ามามีบทบาทต่อโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ รวมทั้งในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการมีอยู่อย่างแพร่หลาย ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบระบบควบคุมโรงงานได้อย่างสะดวก ด้วยเหตุนี้ ผู้ทำวิจัยพยายามที่จะสร้างต้นแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ (Automatic Control System) เพื่อใช้ควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตซึ่งจะทำให้เกิดความสะดวกในการปฏิบัติงานมากขึ้น สำหรับการสร้างต้นแบบระบบควบคุมอัตโนมัติจำลอง ได้อาศัยความสัมพันธ์ของหน่วยกระบวนการผลิตต่าง ๆ มาสร้างเป็นความสัมพันธ์ในลักษณะเมตริกซ์เชิงโครงสร้าง (Structural Matrix) จากนั้นจะนำเมตริกซ์เชิงโครงสร้าง

นี้ ไปสร้างเป็นเมตริกซ์เหตุและผล (Cause-and-Effect Matrix, CEM) และจะนำเมตริกซ์ดังกล่าว ไปสร้างเป็นต้นแบบระบบควบคุมกระบวนการต่อไปโดยอาศัยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์และอัลกอริธึม (Algorithm) เฉพาะ รวมทั้งนำโปรแกรมเฉพาะทางที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมาออกแบบและสร้างรูปแบบของการควบคุมอัตโนมัติ (Control configurations) ทั้งหมดที่เป็นไปได้ จากนั้นทำการเลือกรูปแบบของการควบคุมอัตโนมัติที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางหรือชี้แนะแนวทาง เพื่อสร้างเป็นระบบควบคุมการทำงานของแต่ละกระบวนการของโรงงานจริงต่อไป ซึ่งจะทำให้กระบวนการผลิต มีความสะดวก ทันสมัย รวมทั้งมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นด้วย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาและออกแบบต้นแบบระบบควบคุมจำลอง ทั้งหมดที่เป็นไปได้ เพื่อนำมาเป็นต้นแบบระบบควบคุมสำหรับโรงงานแปรรูปภาพแร่โมนาไซด์ต่อไป
2. เลือกต้นแบบระบบควบคุมจำลองที่เหมาะสมที่สุด จากระบบควบคุมจำลองทั้งหมดที่ได้ เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของโรงงานจริงต่อไป
3. ปรับปรุงและพัฒนาโปรแกรมต้นแบบที่ใช้ในการสร้างระบบควบคุมแบบเกาซึ่งพัฒนาระบบปฏิบัติการยูนิกซ์ (Unix) บนเครื่อง Super Computer ให้สามารถทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer)

การตรวจเอกสาร

เนื่องจากลักษณะกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี (Chemical Process Industry) เป็นกระบวนการที่มีโครงสร้างซับซ้อนประกอบด้วยหน่วยกระบวนการผลิตย่อย ๆ หลายกระบวนการทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบ ดังนั้นจึงทำให้ต้องมีการศึกษาถึงความเสถียรของกระบวนการ (Process Stability) ความสามารถในการปฏิบัติงาน (Process Operability) และความสามารถในการควบคุมได้ (Process Controllability) เพื่อให้กระบวนการอุตสาหกรรมนั้นบรรลุประสงค์ที่วางไว้ ที่ผ่านมามีผู้ทำการวิจัยเพื่อสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติหลายท่าน รวมทั้งพัฒนาระบบควบคุมกระบวนการต่าง ๆ อย่างต่อเนื่องดังนี้

Buckley (1964) กล่าวว่า สิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นสิ่งแรกเมื่อเกิดปัญหาในการออกแบบกระบวนการคือ การดูแลมวลสารและการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ แต่สิ่งที่สำคัญที่สุดคือความสามารถในการควบคุมได้ซึ่งจะต้องพิจารณาดังแต่แรกสุดของแต่ละกระบวนการ เพื่อที่จะทำให้การรวมกันของแต่ละหน่วยมีประสิทธิภาพมากที่สุด นอกจากนี้ Govind และ Powers (1978) ได้พัฒนาการออกแบบแผนผังท่อและเครื่องมือของระบบที่เสถียรซึ่งเป็นครั้งแรกในการออกแบบการควบคุมหน่วยต่าง ๆ จนถึงระดับโรงงานขนาดใหญ่

ในการศึกษาออกแบบระบบควบคุมกระบวนการที่ไม่เสถียร มักใช้การคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยคำนึงถึงการสร้างสมการและกำหนดตัวแปรกับค่าคงที่ลงไป แต่ในความเป็นจริง ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไม่สามารถสร้างเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้อย่างแม่นยำและถูกต้อง เนื่องจากข้อจำกัดหลายประการทางด้านข้อมูลของกระบวนการทำให้ระบบควบคุมที่ออกแบบได้ไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร เพื่อแก้ไขข้อจำกัดเหล่านี้จึงมีการนำเอาทฤษฎีเชิงโครงสร้างมาวิเคราะห์คุณภาพเพื่อสร้างระบบควบคุมในลักษณะที่เป็นการวิเคราะห์เชิงโครงสร้าง (Qualitative Structural Analysis) ความสามารถในการควบคุมได้เชิงโครงสร้างของระบบพลวัต (Dynamic System) ซึ่งเสนอโดย Lin (1974) นั้น ระบบพลวัตที่ต้องการพิจารณาจะต้องแสดงอยู่ในรูปอนุพันธ์ของตัวแปรสถานะของกระบวนการซึ่งมีลักษณะสมการในรูปแบบสเปซสเปซ (State Space Equation) ซึ่งแทนได้ดังสมการ $\dot{x} = Ax + Bu$ และ $y = Cx + Du$ โดยที่ A, B, C และ D แทนเมทริกซ์ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเมทริกซ์เชิงโครงสร้าง

Johnston และ Barton (1985) ได้ทดลองใช้แบบจำลองเชิงโครงสร้าง ซึ่งอยู่ในรูปเมทริกซ์ ซึ่งแนวความคิดนี้ได้ถูกนำไปใช้ในการออกแบบกระบวนการ โดยนักวิจัยหลายท่าน Morari และคณะ (1980 a,b,c) ได้แสดงถึงหลักของความสามารถในการควบคุมได้เชิงโครงสร้าง (Structural Controllability) ซึ่งนำไปใช้พิจารณาส่วนที่ไม่สามารถควบคุมได้ในระบบ

และยังแนะนำแนวความคิดของการควบคุม แบบ Output Structural และวิธีการแก้ปัญหาของระบบที่ซับซ้อน และจับคู่ตัวแปรขาเข้า และตัวแปรขาออกที่เป็นไปได้ทั้งหมด

Sirola และ Rudd (1971) ได้พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปที่มีชื่อว่า AIDES (Adaptive Initial Design Synthesizer) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการ โดยคำนวณและแสดงการจับคู่ของสายวัตถุดิบเข้าและออกในขั้นตอนเดียว ต่อมา Mahelic และ Motard (1977) ได้พัฒนาโปรแกรม BALTAZAR ซึ่งเป็นโปรแกรมที่คำนวณโดยดูจากผลลัพธ์ที่ต้องการ และนำมาออกแบบเป็นสายวัตถุดิบเข้าและออก จากนั้น Kirkwood และคณะ (1988) ได้พัฒนาโปรแกรมสำเร็จรูปที่เรียกว่า Process Invention Procedure (PIP) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ออกแบบกระบวนการอย่างง่าย รวดเร็ว สามารถประมาณค่าที่เหมาะสมของกระบวนการได้ใกล้เคียงค่าที่ถูกต้อง แสดงรูปแบบของกระบวนการ ทางเลือกในการออกแบบ และประโยชน์ของแต่ละรูปแบบ รวมทั้งสามารถตัดรูปแบบที่ไม่เหมาะสมออกไปได้ ทำให้วิศวกรสามารถออกแบบกระบวนการได้หลายแบบและสามารถนำมาใช้พิจารณาว่าระบบควบคุมแบบใดที่สามารถนำไปใช้เป็นระบบควบคุมได้

การออกแบบระบบควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด สำหรับโรงงานขนาดใหญ่เสนอ โดย Georgiou และ Floudas (1990) ซึ่งระบบที่ใช้ศึกษาจะอยู่ในลักษณะสมการเชิงโครงสร้าง ซึ่งมีลักษณะเป็นสมการเชิงอนุพันธ์ และสมการพีชคณิต และทางเลือกของแบบระบบการควบคุมจะสร้างโดยใช้ MILP (Mixed Integer Linear Programming) Fisher และคณะ (1988a, b, c) ได้อธิบายวิธีการใช้กระบวนการทางระบบเพื่อใช้ออกแบบการควบคุมในขั้นแรก เพื่อลดจำนวนตัวเลือกในการควบคุม ซึ่ง Turkey และคณะ (1993) ได้ศึกษาถึงวิธีการลดจำนวนตัวเลือก โดยใช้ Relative Gain Array (RGA) โดยการจับคู่ตัวแปรที่จะควบคุมและตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ ที่มีผลกระทบต่อบรรยากาศน้อยที่สุด ความเสถียรของระบบวัดจากค่า NI (Niederlinski Index) ความอ่อนไหวของระบบวัดได้จากค่า SVD (Singular Value Decomposition) และเพื่อจะดูผลกระทบข้างเคียงของตัวแปรปรับค่าได้กับตัวแปรอื่น ๆ จะพิจารณาจาก IMCIM (Internal Model Control Interaction Measure) และตัวแปรที่ปรับค่าได้ที่ปรับค่าเพิ่มขึ้น เพื่อกำจัดตัวรบกวนระบบ สามารถตรวจสอบได้โดยใช้ RDG (Relative Disturbance Gain) ซึ่ง Turkey และคณะ ได้คำนวณโดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และใช้โปรแกรมที่มีอยู่ทั่วไปหาข้อมูลของระบบซึ่งอยู่ในภาวะที่เสถียร เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการ

Glover Silverman (1976) ได้แสดงกราฟของ Lin (1974) ที่แสดงผลของระบบที่มีสายเข้าสายเดียวและหลายสาย โดยใช้พีชคณิตในการวิเคราะห์ Shinsky (1986) ใช้โปรแกรม Relative Gain Array เพื่อเลือกรูปแบบการควบคุมที่ดีที่สุดของหอกลับ และยังมีโปรแกรม DECODE (Distillation Control Design Equipment) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาโดย

Birky และ คณะ (1988, 1989) ซึ่งเป็นอีกโปรแกรมหนึ่งที่ใช้ในการเลือกรูปแบบการควบคุมที่ดีที่สุดของหอกลับเช่นกัน Stephanopoulos และคณะ (1987) ได้เสนอโปรแกรม DESIGN-KIT ซึ่งใช้ในการออกแบบเพื่อช่วยในการรักษาสภาพแวดล้อม Williamson และ Earl (1990) ได้รวม Expert System กับการควบคุมโดยใช้ Rule-Base Programming ซึ่งจะใช้ความรู้พื้นฐานในการออกแบบแต่ละกระบวนการย่อย เพื่อแก้ไขปัญหาในการรวมแต่ละกระบวนการย่อยเป็นกระบวนการใหญ่ Song และ Park (1990) ได้ออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ในการออกแบบการควบคุมกระบวนการทางเคมีทั้งหมด Fararooy และคณะ (1992) ได้พัฒนาโปรแกรมช่วยในการออกแบบระบบควบคุมชื่อ PCTB (Process Controllability Toolbox) ซึ่งแบ่งโปรแกรมได้ 2 ส่วนคือ ส่วนวิเคราะห์ความสามารถในการควบคุมได้ของระบบที่เสถียร ซึ่งทำงานด้วยโปรแกรม MATLABTM ในระบบ X windows และแบบที่ใช้โปรแกรม MATLABTM เพียงอย่างเดียว Bekker และ Rijnsdorp (1992) ได้พัฒนาโปรแกรมต้นแบบชื่อ Early Process Design Integrated with Control (EPIC) ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ส่วนที่ติดต่อกับแผนผังกระบวนการ ความสัมพันธ์ระหว่างสายเข้าและสายออก แสดงอยู่ในรูปของเมตริกซ์อุปกรณ์กระบวนการ (Process Instrumentation Matrix, PIM) ความเสถียรและความสามารถในการควบคุมได้ และรูปแบบการควบคุมที่เลือก ส่วนของ PIM จะเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้หลักของโปรแกรม EPIC โดยตรง

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางกราฟที่ชื่อไดกราฟ (Digraph) อย่างแพร่หลาย เพื่อใช้วิเคราะห์ระบบควบคุมกระบวนการที่มีความยุ่งยากซับซ้อน และมีขนาดตัวแปรมาก Kuo และคณะ (1997) ได้นำทฤษฎีไดกราฟไปใช้ในการสร้างต้นแบบจำลองระบบที่มีความเสี่ยงต่ออันตรายสูง นอกจากนี้ Hantos และ Perkins (1997) ได้ศึกษาถึงความเสถียรของโรงงาน อุตสาหกรรมเคมีต่าง ๆ โดยใช้หลักของความเสถียรเชิงโครงสร้าง (Structural Stability) และยังมีการนำเอาทฤษฎีกราฟนี้ ไปใช้ในระบบควบคุมด้วย โดยการศึกษาถึงคุณสมบัติความสามารถในการควบคุมได้ของกระบวนการที่ต้องการควบคุม นั้น ๆ ซึ่งการใช้เทคนิคนี้จะทำให้สามารถแสดงแบบจำลองกระบวนการด้วยลักษณะเชิงโครงสร้าง ซึ่งทำให้วิศวกรกระบวนการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ธงไชย ศรีนพคุณ และ สมวุฒิ ครุฑกุล, 2541) นอกจากนี้ Srinophakun (1996) ได้สร้างโปรแกรมเพื่อใช้ในการออกแบบระบบควบคุมกระบวนการ โดยใช้ทฤษฎีไดกราฟประยุกต์ใช้ร่วมกับทฤษฎีการสร้างเมตริกซ์ CEM ทำให้สามารถสร้างระบบควบคุมของกระบวนการที่ต้องการได้ ซึ่งตัวอย่างต้นแบบระบบควบคุมกระบวนการที่ได้จากการใช้โปรแกรมนี้ได้แก่ กระบวนการ Expanded Williams-Otto และระบบควบคุมอัดโนเมติของกระบวนการผลิตเอทิลีนออกไซด์ (Ethylene Oxide Plant)

ต้นแบบโปรแกรมการสร้างระบบควบคุมอัดโนเมติของ Srinophakun (1996) สามารถทำงานได้เฉพาะบนเครื่อง Hewlett PackardTM Workstation 750 ภายใต้ระบบปฏิบัติการ

การ HP-UX 9.0 และ Silicon Graphics POWER CHALLENGETM ภายใต้ระบบปฏิบัติการ IRIX 6.1 ซึ่งปกติจะทำงานโดยใช้ Interfacial ระหว่าง Prototype กับ G2 หน้าจอ Graphic และใช้ MOTIF version 1.2 เป็น Graphic-User-Interface ทำให้ต้นแบบโปรแกรมนี้มีข้อจำกัดในการใช้งานเพราะต้องการเครื่องคอมพิวเตอร์ขนาดใหญ่ ดังนั้นจึงมีผู้ทำการคอมไพล์และแก้ไขไฟล์ต้นแบบของโปรแกรมเหล่านี้ในส่วนของกรสร้าง CEM โดยใช้โปรแกรม Visual C++ 5.0 (พีชมงคล สุวรรณแสง และผิกฝน มนัสรังษี, 2542) เพื่อให้สามารถใช้งานได้ในระบบปฏิบัติการ 32 บิต ได้แก่ Window NT 4.0 และ Windows 95 บน PC-Pentium-100 MHz

สำหรับทฤษฎีที่นำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของโรงงานต้นแบบแปรสภาพแรมโนนาไซด์จะใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ความสามารถในการควบคุมได้เชิงโครงสร้างและใช้โปรแกรมต้นแบบของการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของ Srinophakun (1996) มาประยุกต์ใช้กับโรงงานแปรสภาพแรมโนนาไซด์ในแนวทางเดียวกับกระบวนการ Expanded Williams-Otto โดยทำการปรับปรุงและประยุกต์โปรแกรมดังกล่าวให้สามารถทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยอาศัยหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ซึ่งมีรายละเอียดของทฤษฎีและนิยามที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. พื้นฐานระบบวิศวกรรมควบคุม (Basic Concepts of Process Control)

โรงงานอุตสาหกรรมทั่ว ๆ ไป เป็นโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ประกอบด้วยหน่วยกระบวนการผลิตหรือหน่วยกระบวนการต่าง ๆ ทำงานร่วมกันอย่างเป็นระบบ (Stephanopoulos, 1984) ดังนั้นเมื่อมีการกล่าวถึงกระบวนการจะต้องมีการกำหนดตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมและปรากฏการณ์ของกระบวนการนั้น ๆ ซึ่งลักษณะของตัวแปรต่าง ๆ ในกระบวนการจะแบ่งเป็นตัวแปรเข้าและตัวแปรออกตามทิศทางของตัวแปรนั้น

1.1 ตัวแปรเข้า เป็นตัวแปรภายนอกที่มีผลกระทบตอสภาพของกระบวนการและทำให้สภาวะกระบวนการเปลี่ยนแปลง ประกอบด้วย

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

โปรแกรมต้นแบบการสร้างระบบควบคุมซึ่งสามารถทำงานได้บนระบบปฏิบัติการ 32 บิต ได้แก่ ระบบปฏิบัติการ Window NT 4.0 Server, Window NT 4.0 WorkStation และระบบปฏิบัติการ Window 98 ซึ่งโปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้นดังกล่าวใช้โปรแกรม Microsoft Visual C++ version 6.0 ในการพัฒนาและปรับปรุงได้คัดต้นแบบจากต้นแบบโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการยูนิกซ์ โดยใช้กรรมวิธีเฉพาะและใช้โปรแกรม Digraph ซึ่งเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรม MATLAB™ Version 5.3 ในการพัฒนาโปรแกรม

วิธีการ

การสร้างต้นแบบระบบควบคุมสำหรับโรงงานแปรรูปภาพแร่โมนาไซต์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้นจะมีขั้นตอนในการสร้าง 2 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ ของตัวแปรของหน่วยอุปกรณ์ในกระบวนการของโรงงานแปรรูปภาพแร่โมนาไซต์ในลักษณะระบบเมตริกซ์เชิงโครงสร้าง
2. การใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสร้างและออกแบบระบบควบคุมของโรงงานแปรรูปภาพแร่โมนาไซต์

1. การวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการของโรงงานแปรรูปอาหารโมโนไซต์ในลักษณะเมตริกซ์เชิงโครงสร้าง

การวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการของโรงงานแปรรูปโมโนไซต์จะใช้วิธีการทำดุลมวลสารและพลังงานของอุปกรณ์และกระบวนการนั้น ๆ จากนั้นจะทำการจัดรูปแบบของสมการดุลมวลสารและพลังงานที่ได้ให้อยู่ในรูปแบบมาตรฐานในลักษณะ State Space Equation และ Output Equation (1, 2) ให้อยู่ในระบบเมตริกซ์เชิงโครงสร้าง S เพื่อนำไปใช้ในการสร้างและออกแบบระบบควบคุมต่อไป โดยอาศัยโปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้นซึ่งตัวอย่างการสร้างและวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการที่สนใจ แสดงได้ดังตัวอย่างต่อไปนี้

การวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรของกระบวนการและการสร้างเมตริกซ์เชิงโครงสร้าง

การวิเคราะห์และสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรของกระบวนการที่ต้องการออกแบบระบบควบคุมจะต้องอาศัยการวิเคราะห์และการสร้างจากหลักการดุลมวลสารและพลังงาน (Material and Energy Balance) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{อัตราการสะสมตัวของ } S = \text{อัตราการไหลเข้าของ } S - \text{อัตราการไหลออกของ } S \\ + \text{อัตราการเกิดของ } S - \text{อัตราการใช้หรือสูญเสียของ } S$$

โดยที่ S เป็นปริมาณที่สนใจได้แก่

- มวลสารทั้งหมด (Total Mass), หรือ
- โมเมนตัม (Momentum), หรือ
- พลังงานทั้งหมด (Total Energy), หรือ
- มวลของสารที่สนใจ (Mass of Individual components)

ซึ่งสามารถแสดงอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

สมการดุลมวลสาร(Total Mass Balance)

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \sum_{i \in in} \rho_i F_i - \sum_{j \in out} \rho_j F_j \quad (15)$$

สมการดุลมวลสารของแต่ละองค์ประกอบ(A) (Mass Balance on Component A)

$$\frac{d(n_A)}{dt} = \frac{d(C_A V)}{dt} = \sum_{i, \text{inlet}} C_{A,i} F_i - \sum_{j, \text{outlet}} C_{A,j} F_j \pm rV \quad (16)$$

สมการดุลพลังงาน (Total Energy Balance)

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d(U + K + P)}{dt} = \sum_{i, \text{inlet}} \rho_i F_i h_i - \sum_{j, \text{outlet}} \rho_j F_j h_j \pm Q \pm W_s \quad (17)$$

โดยที่ ρ_i = ความหนาแน่นของสารที่เข้าสู่ระบบสายที่ i

ρ_j = ความหนาแน่นของสารที่ออกจากระบบสายที่ j

ρ = ความหนาแน่นของสารที่อยู่ในระบบ

V = ปริมาตรทั้งหมดของสารในระบบ

F_i = อัตราการไหลเข้าสู่ระบบของสายที่ i

F_j = อัตราการไหลออกจากระบบของสายที่ j

n_A = จำนวนโมลของสาร A ในระบบ

C_A = ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในระบบ (โมลต่อปริมาตร)

$C_{A,i}$ = ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในสายเข้าที่ i (โมลต่อปริมาตร)

$C_{A,j}$ = ความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ในสายออกที่ j (โมลต่อปริมาตร)

r = อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของสารองค์ประกอบ A ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

h_i = ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Specific Enthalpy) ของสารในสายเข้าที่ i

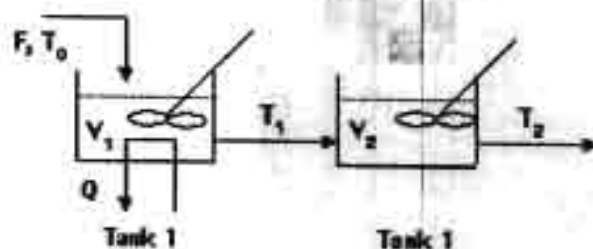
h_j = ค่าเอนทัลปีจำเพาะ (Specific Enthalpy) ของสารในสายออกที่ j

U, K, P = พลังงานภายใน, พลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ ของระบบตามลำดับ

Q = อัตราการให้พลังงานหรืออัตราการดึงพลังงานออกกระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

W_s = อัตราของพลังงานกลที่มีการแลกเปลี่ยน (Shaft Work) ระหว่างระบบกับสิ่งแวดล้อม

พิจารณาหน่วยกระบวนการตัวอย่างที่ประกอบด้วย 2 ดังปฏิกิริยา และขดลวดให้ความร้อน ซึ่งมีรายละเอียดของกระบวนการดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ระบบที่ประกอบด้วย 2 ถังปฏิริยาและขดลวดให้ความร้อน

ที่มา : Srinophakhun, 1996

ระบบข้างต้นเป็นกระบวนการที่ประกอบด้วยถังปฏิริยา 2 ถัง โดยที่ถังแรกมีขดลวดให้ความร้อนปริมาณ Q กับระบบ ซึ่งระบบดังกล่าวต้องการควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิริยาที่ 1 และ 2 ให้คงที่ (T_1, T_2) โดยใช้อัตราการป้อนสารละลายเข้าถังปฏิริยาเคมีที่ 1 (F) และอัตราการให้ความร้อนจากขดลวด (Q) เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ โดยตัวแปรที่ใช้แสดงสภาวะของระบบดังกล่าวได้แก่อุณหภูมิในถังปฏิริยาเคมีที่ 1 และ 2 (T_1, T_2) และปริมาณของสารละลายที่อยู่ในถังปฏิริยาแต่ละถัง (V_1, V_2) จากสมการสมดุลสารและพลังงานข้างต้นสามารถทำการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการและจัดรูปตามรูปแบบมาตรฐานในลักษณะ $x' = Ax + Bu$ และ $y = Cx + Du$ ได้ดังนี้

$$T_1' = \frac{-F_1 T_1}{V_1} + \frac{Q}{V_1 C_p} + \frac{(T_0 - T_u) F}{V_1} \quad (18)$$

$$T_2' = \frac{F_1 T_1}{V_2} - \frac{F_2 T_2}{V_2} \quad (19)$$

ระบบสมการ 18 และ 19 ดังกล่าวสามารถเขียนเป็นระบบ State Space Matrix ได้ดังสมการที่ 20 ดังนี้

$$\begin{pmatrix} T_1' \\ T_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{F_1}{V_1} & 0 \\ \frac{F_1}{V_2} & -\frac{F_2}{V_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{V_1 C_p} \frac{(T_0 - T_u) F}{V_1} \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q \\ F \end{pmatrix} \quad (20)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิของอุณหภูมิเมื่อเทียบกับเวลา (KS) และ ($i=1, 2$)

F = อัตราการไหล ซึ่งจัดเป็นตัวแปรปรับกระบวนการ (m^3/s)

V_i = ปริมาตรในถังแต่ละถังซึ่งเป็นตัวแปรแสดงสภาวะของระบบ (m^3)

C_p = ความจุความร้อนจำเพาะ ซึ่งสมมติให้มีค่าคงที่ (kJ/K.m^3)

Q = ความร้อนที่ขดลวดให้กับของเหลวเป็นตัวแปรที่ใช้ควบคุมระบบ (kJ)

s = แสดงสถานะที่ สภาวะคงตัว (Steady State)

ส่วน State Space Matrix ของตัวแปรที่ต้องการควบคุมคืออุณหภูมิจากถังที่ 1 และถังที่ 2 ตามลำดับสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 21 ดังนี้

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ F \end{bmatrix} \quad (21)$$

ระบบสมการที่ 20 และ 21 ดังกล่าวจะมีเมตริกซ์เชิงโครงสร้าง A, B, C และ D ดังนี้ดังสมการที่ 22 ดังนี้

$$A = \begin{pmatrix} x & 0 \\ x & x \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} x & x \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} x & 0 \\ 0 & x \end{pmatrix} \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (22)$$

สำหรับการหาเมตริกซ์เชิงโครงสร้างของหน่วยอุปกรณ์ในกระบวนการของโรงงานแปรรูปภาพแร่โมนาไซต์จะใช้วิธีการกับระบบข้างต้น ซึ่งรายละเอียดของเมตริกซ์เชิงโครงสร้างของแต่ละอุปกรณ์มาตรฐานที่มีในกระบวนการจะมีรายละเอียดอยู่ใน

2. รายละเอียดและขั้นตอนต้นแบบโปรแกรมการสร้างและออกแบบระบบควบคุม

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมของโรงงานแปรรูปผลไม้ โดยใช้ต้นแบบโปรแกรมที่มีอยู่มาพัฒนาและปรับปรุงใหม่ ซึ่งต้นแบบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะประกอบด้วยเครื่องมือและขั้นตอนต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของกระบวนการต่าง ๆ ทางอุตสาหกรรมเคมี รวมถึงโรงงานแปรรูปผลไม้ซึ่งต้นแบบโปรแกรมที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นมีขั้นตอนต่าง ๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 การเลือกกระบวนการทางเคมี (Selection of Unit Operation)

การเลือกกระบวนการทางเคมีเป็นการเลือกฐานข้อมูลของกระบวนการหรืออุปกรณ์ที่มีอยู่ในกระบวนการที่ต้องการออกแบบและสร้างระบบควบคุม ซึ่งฐานข้อมูลของแต่ละกระบวนการหรืออุปกรณ์นั้นได้มาจากการวิเคราะห์กระบวนการเพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในกระบวนการโดยอาศัยการทำดุลมวลสารและพลังงานดังตัวอย่างข้างต้น ซึ่งในฐานข้อมูลที่มีอยู่จะประกอบด้วยตัวแปรที่ต้องการควบคุม ตัวแปรที่ใช้ในการแสดงสถานะของกระบวนการ และตัวแปรที่สามารถใช้แปรปรับกระบวนการเพื่อให้ระบบหรือกระบวนการนั้นสามารถควบคุมให้เป็นไปตามเป้าหมายที่ต้องการ รวมทั้งความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในกระบวนการนั้น ๆ ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะเมตริกซ์เชิงโครงสร้างในรูปแบบสมการมาตรฐาน $x' = Ax + Bu$ และ $y = Cx + Du$ ซึ่งข้อมูลและความสัมพันธ์ของตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ จะใช้เป็นข้อมูลในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมในขั้นตอนการสร้าง Cause-and-Effect Matrix ต่อไป

2.2 การสร้างฐานข้อมูลของกระบวนการ (Creation of Unit Operation)

การสร้างฐานข้อมูลของกระบวนการเป็นขั้นตอนที่ใช้ในการสร้างฐานข้อมูลของกระบวนการที่ยังไม่มีอยู่ในระบบฐานข้อมูลมาตรฐาน เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมของกระบวนการอื่นที่ต้องการ ซึ่งในขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลของกระบวนการใหม่ จะต้องทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ของกระบวนการที่สนใจในลักษณะเดียวกับตัวอย่างการสร้างฐานข้อมูลดังตัวอย่างที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งฐานข้อมูลของกระบวนการใหม่ที่สร้างขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมในขั้นตอนการสร้าง Cause-and-Effect Matrix ต่อไป

2.3 การสร้างเมตริกซ์ CEM (Generate Cause-and-Effect Matrix)

การสร้าง CEM เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมของกระบวนการที่ต้องการออกแบบระบบควบคุม เพื่อศึกษาถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร ซึ่งเมตริกซ์ CEM ที่ได้จะมีลักษณะเป็นเมตริกซ์เชิงโครงสร้างโดยมีสมาชิก x และ 0 เพื่อแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการกับตัวแปรที่ต้องการควบคุมว่ามีผลกระทบ (x) และไม่มีผลกระทบ (0) ในเชิงของการควบคุมตามลำดับ นอกจากนี้เมตริกซ์ดังกล่าวยังแสดงถึงตัวแปรที่อาจจะไม่ถูกกระทบโดยตัวแปรปรับกระบวนการ (Excess Objective Variables) และตัวแปรปรับกระบวนการที่สามารถตัดทิ้งได้โดยไม่ทำให้ CEM ใหม่ที่ได้ไม่มีความบกพร่องเชิงโครงสร้างของเมตริกซ์เกิดขึ้น นอกจากนี้ CEM ที่ได้ยังแสดงถึงอันดับหรืออิทธิพลของการส่งผลกระทบระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการไปยังตัวแปรที่ต้องการควบคุม ว่ามีส่งผลกระทบกันมากน้อยเพียงใด ซึ่งขั้นตอนการสร้าง CEM จะอาศัยขั้นตอนการสร้างจากอัลกอริทึมที่ 2 และขั้นตอนการสร้าง CEM นี้จะมีการใช้โปรแกรม Digraph ซึ่งพัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MATLABTM เพื่อสร้างเส้นทางทั้งหมดจากตัวแปรปรับกระบวนการไปยังตัวแปรที่ต้องการควบคุม โดยผ่านตัวแปรสภาวะ ซึ่ง CEM ของแต่ละอุปกรณ์ทั้งหมดที่มีในแต่ละกระบวนการนั้น ๆ จะนำไปใช้ในขั้นตอนการรวบรวม CEM ต่อไป

2.4 การรวม CEM (Integrate Files)

กระบวนการรวม CEM เป็นขั้นตอนที่ใช้ในการรวม CEM ของทุกอุปกรณ์ ที่มีในกระบวนการเพื่อจะใช้เป็นข้อมูลก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ Non-local path ซึ่งเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์การใช้ตัวแปรระหว่างอุปกรณ์ หรือกระบวนการมาควบคุมซึ่งกันและกัน ซึ่งเมื่อทำการรวม CEM ของแต่ละอุปกรณ์แล้วจะนำไปใช้เป็นข้อมูลในการขั้นตอนการวิเคราะห์ Non-local path ต่อไป

2.5 การวิเคราะห์ Non-local path (Non-local path Analysis)

ในขั้นตอนการสร้าง CEM เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมของกระบวนการหรืออุปกรณ์นั้นๆ ในกรณีที่กระบวนการต่าง ๆ มีอุปกรณ์เชื่อมต่อกัน ขั้นตอนการวิเคราะห์ Non-local path จึงถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระบวนการที่เชื่อมต่อกันว่ามีความเป็นไปได้หรือไม่ที่จะใช้ตัวแปรปรับกระบวนการของอุปกรณ์หนึ่งที่ยังวางอยู่ ควบคุมตัวแปรที่ต้องการควบคุมของอีกอุปกรณ์หรือกระบวนการหนึ่งที่ยังเชื่อมต่อกัน เพื่อเป็นการลดการใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ

ซึ่งจากขั้นตอนการวิเคราะห์ Non-local path นี้จะมีผลทำให้ CEM ที่ได้มีจำนวนลดลงซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์ Non-local path จะใช้อัลกอริทึมที่ 3 โดยใช้หลักการรวมกันแล้วมีผลทำให้ CEM ใหม่ที่ไม่มีความบกพร่องของ Generic Rank ในบางครั้งเมตริกซ์ CEM ของกระบวนการที่เชื่อมต่อกันที่ได้จากการวิเคราะห์ Non-local path อาจจะมีตัวแปรปรับกระบวนการหลายตัวแปรตัวด้วยกันที่สามารถใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการเพื่อควบคุมตัวแปรที่ต้องการควบคุม ซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องพิจารณาถึงความแรงและลักษณะของการส่งผลกระทบ ของตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวไปยังตัวแปรที่ต้องการควบคุมว่ามีลักษณะการส่งผลกระทบโดยตรงหรือโดยอ้อมเพื่อเลือกตัวแปรปรับกระบวนการเพียงตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น ซึ่งในการพิจารณาเลือกตัวแปรปรับกระบวนการจะใช้หลักการการเลือกตัวแปรปรับกระบวนการตามหลักการที่อยู่ ซึ่งจาก CEM ที่ได้หลังจากมีการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงแล้วจะมีผลทำให้ CEM ดังกล่าวมีสมาชิกเป็น w , x และ 0 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรปรับกระบวนการกับตัวแปรที่ต้องการควบคุมในลักษณะเป็นการส่งผลกระทบในลักษณะอ่อน การส่งผลกระทบในลักษณะแรง และการไม่ส่งผลกระทบตามลำดับ ซึ่ง CEM ของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกันจะยังมี Generic Rank เท่าเดิม โดยขั้นตอนการปรับปรุงเมตริกซ์ CEM ของกระบวนการที่เชื่อมต่อกันจะใช้อัลกอริทึมที่ 4 หลังจากทำการพิจารณาการวิเคราะห์ Non-local path แล้ว ข้อมูลที่ได้จะนำไปใช้ในขั้นตอนการทำ Assembling ต่อไป

2.6 การทำ Assembling (Assembling the Units)

การทำ Assembling เป็นขั้นตอนที่ใช้เพื่อรวม CEM ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ทั้งหมดในกระบวนการเพื่อสร้างเป็น CEM ของกระบวนการใหญ่ (Plant Wide CEM) ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเป็นการลดจำนวนตัวแปรปรับกระบวนการ ของตัวแปรปรับกระบวนการที่อยู่ในสายเดียวกันโดยเลือกตัวแปรปรับกระบวนการที่อยู่ในสายเดียวกันเพียงตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้นซึ่งจะมีผลทำให้ CEM ของทั้งกระบวนการที่ได้มีจำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงซึ่งขั้นตอนการทำ Assembling จะใช้อัลกอริทึมที่ 6 จาก CEM ของทั้งกระบวนการที่ได้จะนำไปใช้ในขั้นตอน System pairing ต่อไป

2.7 การวิเคราะห์ System Pairing (System Pairing Analysis)

ขั้นตอนนี้ใช้ในการจับคู่ระหว่างตัวแปรที่ต้องการควบคุม กับตัวแปรปรับกระบวนการในลักษณะของตัวแปรเข้าเดียวตัวแปรออกเดียว ซึ่งในขั้นตอนนี้จะเริ่มจากการแบ่ง CEM ของกระบวนการใหญ่เป็นเมตริกซ์ย่อย ๆ จากนั้นจะทำการพิจารณา Generic Rank ของแต่ละเมตริกซ์ย่อย ๆ หรือแต่ละ Block ว่ามี Rank Deficiency เกิดขึ้นหรือไม่ ในบางครั้งอาจพบ Rank Deficiency เกิดขึ้นในเมตริกซ์ย่อย ๆ เหล่านั้นซึ่งจะต้องทำการปรับปรุงโดยการตัดตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่มีความสำคัญน้อยออกไป หรือทำการพิจารณากระบวนการดังกล่าวและสร้าง CEM ใหม่ ในกรณีที่ต้องการตัดตัวแปรที่มีความสำคัญน้อย หรือส่งผลกระทบต่อระบบหรือ

กระบวนการน้อยสามารถใช้แนวทางหรือหลักการการเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่มีอยู่ ช่วยในการพิจารณา ซึ่งในขั้นตอนการจับคู่ดังกล่าวจะใช้อัลกอริทึมที่ 7 ในกรณีที่เมตริกซ์ย่อย ๆ หรือ Block ย่อย ๆ มีจำนวนตัวแปรปรับกระบวนการมากกว่าตัวแปรที่ต้องการควบคุมซึ่งในกรณีนี้จำเป็นต้องทำการตัดตัวแปรปรับกระบวนการที่มีผลกระทบต่อกระบวนการน้อยออกไปเพื่อให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการ มีจำนวนเท่ากับตัวแปรที่ต้องการควบคุม ซึ่งขั้นตอนการพิจารณาตัดตัวแปรปรับกระบวนการเพื่อเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมจะใช้หลักการการเลือกตัวแปรปรับกระบวนการที่มีอยู่ ซึ่งในโปรแกรมจะเป็นส่วนที่ต้องมีการตามตอบกับโปรแกรมเมื่อทำการตัดตัวแปรปรับกระบวนการบางตัวออกไปแล้ว ก็จะมีผลทำให้เมตริกซ์ที่ได้มีแนวทางในการจับคู่มากกว่า 1 แนวทางซึ่งในขั้นตอนการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมจะใช้หลักการการพิจารณาลักษณะการส่งผลกระทบของตัวแปรปรับกระบวนการไปยังตัวแปรที่ต้องการควบคุมโดยใช้หลักการ Relative Order มาพิจารณาซึ่งโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ค่า Relative Order และสร้างเมตริกซ์เชิงโครงสร้างในลักษณะของ Relative Order ของแต่ละรูปแบบการควบคุม ซึ่งจากค่า Relative Order ที่ได้จากโปรแกรมของแต่ละรูปแบบการควบคุมจะสามารถเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมได้โดยอาศัยหลักการการเลือกรูปแบบการควบคุมโดยใช้หลักการ Relative Order นอกจากนี้ในกรณีที่ตัวแปรที่ใช้ปรับกระบวนการของ CEM ของทั้งกระบวนการ มีจำนวนมากกว่าจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุมสามารถใช้กรรมวิธีที่เรียกว่า Reverse diagonal partitioning ตามอัลกอริทึมที่ 8 ส่วนขั้นตอนการสร้างรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดในกรณีที่เมตริกซ์ย่อยมีขนาดใหญ่จะใช้อัลกอริทึมที่ 9 ในการสร้างรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดก่อนที่จะทำการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม โดยใช้หลักการการเลือกตัวแปรปรับกระบวนการและการใช้หลักการ Relative order ในการเลือกรูปแบบของการควบคุมตามที่ได้กล่าวไปแล้ว

หลังจากทำการวิเคราะห์กระบวนการ ที่ต้องการออกแบบระบบควบคุม โดยใช้โปรแกรมที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นข้างต้นจะสามารถสร้างรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด และสามารถเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของกระบวนการจริงได้

3. โปรแกรมการสร้างและออกแบบระบบควบคุม

โปรแกรมพัฒนานี้เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบรูปแบบการควบคุมโดยใช้พื้นฐานทฤษฎีความสามารถในการควบคุมได้เชิงโครงสร้าง ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ และรายละเอียดดังต่อไปนี้

เมื่อเริ่มคำสั่งให้โปรแกรมทำงานจะได้หน้าจอหลัก (Main Menu) ของโปรแกรมดังภาพที่ 2 ดังนี้



ภาพที่ 2 หน้าจอเริ่มต้นของโปรแกรมต้นแบบ

หน้าจอหลักของโปรแกรมดังภาพข้างต้น แต่ละไอคอนหรือแต่ละปุ่มกดจะเป็นอัลกอริทึมที่ใช้ในการออกแบบระบบควบคุมซึ่งเมื่อทำการกดปุ่มดังกล่าวโดยใช้เมาส์ก็จะเป็นการเรียกให้แต่ละอัลกอริทึมทำงานดังรายละเอียดที่ได้กล่าวต่อไป นอกจากนี้ในแต่ละขั้นตอนของการสร้างและออกแบบระบบควบคุมสามารถเลือกแต่ละขั้นตอนได้จากทูลบาร์ในส่วนของ Tools ซึ่งก็จะทำงานเหมือนกับไอคอนหรือปุ่มกดในหน้าจอหลักซึ่งรายละเอียดของข้อมูลในทูลบาร์ส่วนของ Tools สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3 ดังนี้



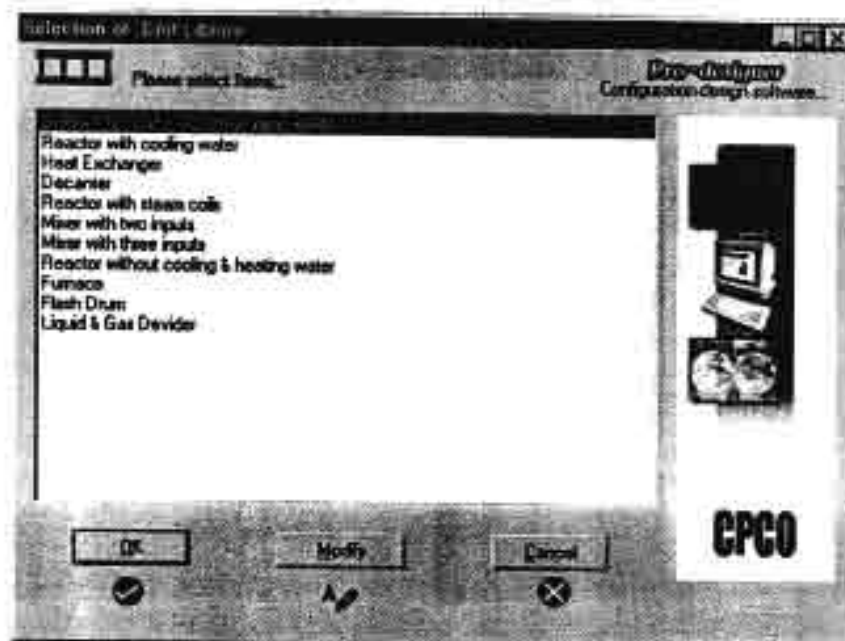
ภาพที่ 3 หน้าจอเริ่มต้นของโปรแกรมในส่วนของทูลบาร์ Tools

3.1 การเลือกฐานข้อมูลอุปกรณ์หรือกระบวนการ

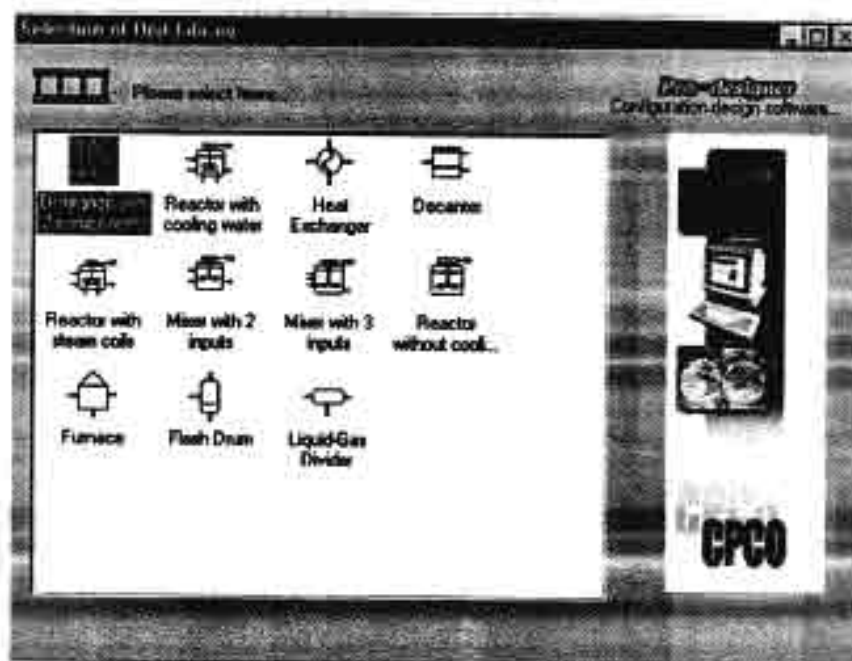
หน้าจอหลักแสดงดังภาพที่ 2 และ 3 เมื่อทำการกดปุ่มโดยใช้เมาส์ที่ปุ่มของไอคอน Select from unit operation library-List เพื่อให้โปรแกรมเริ่มต้นทำงานในส่วนของการเลือกกระบวนการที่ต้องการ จะได้หน้าจอแสดงรายละเอียดของฐานข้อมูลของกระบวนการและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีอยู่ในฐานข้อมูลแสดงได้ดังภาพที่ 4

นอกจากนี้การเลือกฐานข้อมูลของกระบวนการหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ ยังสามารถทำได้จากการกดปุ่ม Select from unit operation library -Menu ซึ่งจะประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่นเดียวกับ Select from unit operation library-List แต่จะแสดงเป็นรูปของอุปกรณ์แต่ละชนิดแสดงได้ดังภาพที่ 5

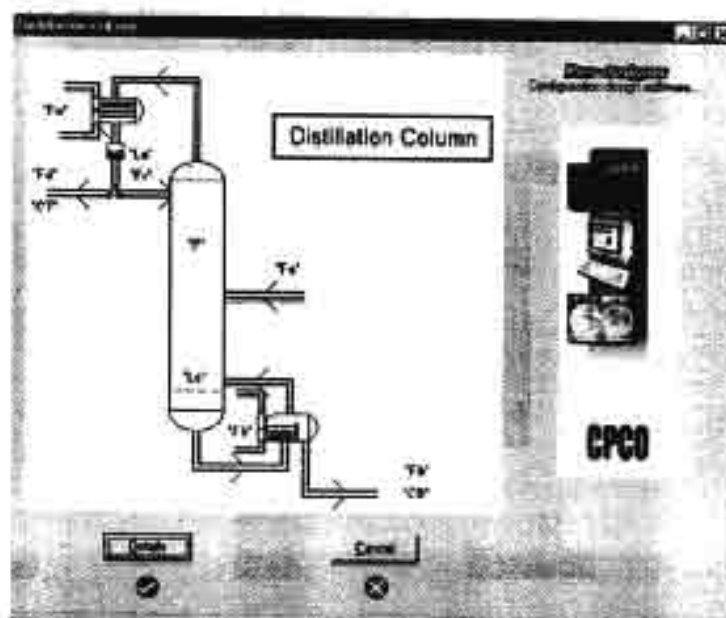
เมื่อทำการเลือกฐานข้อมูลอุปกรณ์ที่สนใจจากส่วนของฐานข้อมูลในหน้าจอเมนูฐานข้อมูลแล้วจะได้หน้าจอซึ่งแสดงรายละเอียดของฐานข้อมูลของกระบวนการนั้น ๆ รวมทั้งรูปภาพแสดงอุปกรณ์ของฐานข้อมูลนั้น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถทำการแก้ไขฐานข้อมูลดังกล่าวได้ ซึ่งหน้าจอแสดงรายละเอียดของฐานข้อมูลแสดงได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 4 รายละเอียดของฐานข้อมูลที่มีอยู่ในโปรแกรมต้นแบบในลักษณะลิสต์

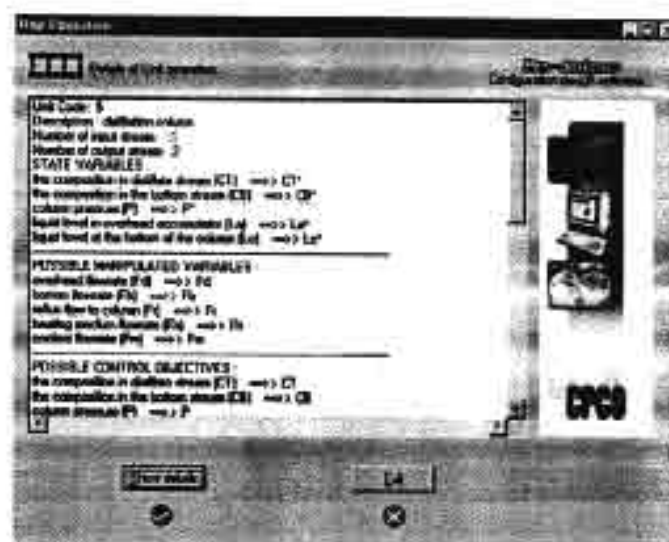


ภาพที่ 5 รายละเอียดของฐานข้อมูลที่มีอยู่ในโปรแกรมต้นแบบในลักษณะเมนูรูปภาพ

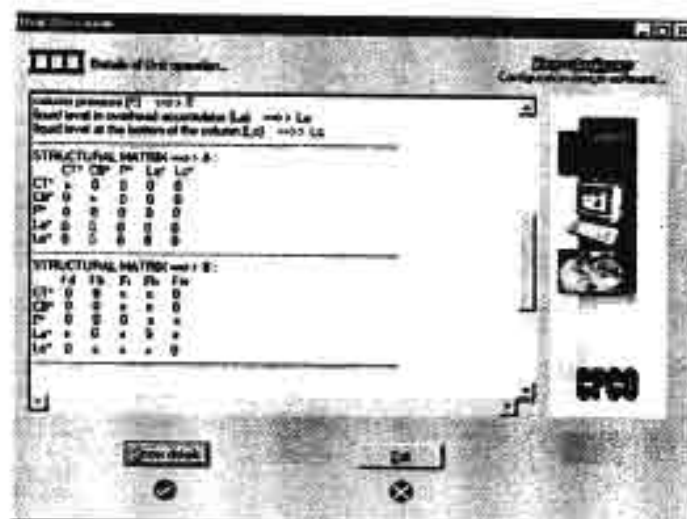


ภาพที่ 6 ตัวอย่างรูปภาพของอุปกรณ์หอกลั่น

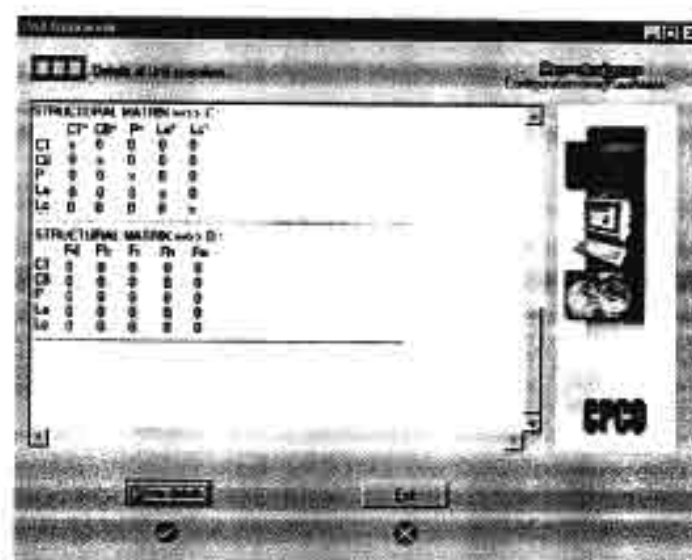
หน้าจอรูปภาพของอุปกรณ์หรือกระบวนการที่ต้องการออกแบบระบบควบคุมที่ได้จากการเลือกอุปกรณ์ในฐานข้อมูลจะได้หน้าจอ ดังภาพที่ 6 ซึ่งหน้าจอ ดังกล่าวจะมีปุ่ม Details เพื่อใช้แสดงรายละเอียดของข้อมูลของอุปกรณ์นั้น ๆ เมื่อทำการกดปุ่ม Details ก็จะปรากฏหน้าจออีกหน้าจอหนึ่งซึ่งจะแสดงรายละเอียดของข้อมูลของอุปกรณ์นั้น ๆ ซึ่งในที่นี้ยกตัวอย่างอุปกรณ์หอกลั่น ดังมีรายละเอียดดังภาพที่ 7, 8 และ 9 ตามลำดับ



ภาพที่ 7 ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลของอุปกรณ์หอกลั่น



ภาพที่ 8 ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลของอุปกรณ์หอกลั่น(ต่อ)



ภาพที่ 9 ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลของอุปกรณ์หอกลั่น(ต่อ)

เมื่อทำการเลือกฐานข้อมูลของอุปกรณ์ที่มีอยู่แล้ว โปรแกรมจะทำการนำข้อมูลรายละเอียดไปเก็บไว้ยังไฟล์ข้อมูลอัตโนมัติ ซึ่งข้อมูลของอุปกรณ์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการสร้าง CEM ในขั้นตอนต่อไป

3.2 การสร้างฐานข้อมูลเพิ่มเติม

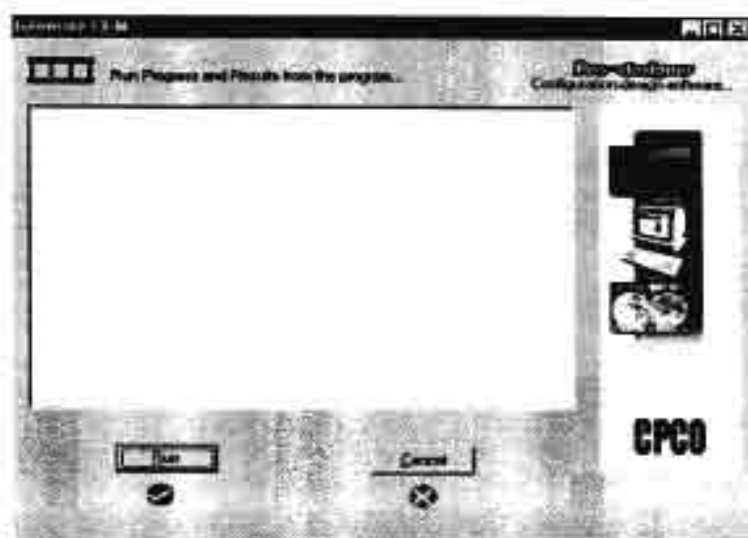
ในกรณีที่ต้องการออกแบบระบบควบคุมของกระบวนการอื่นซึ่งไม่มีในระบบฐานข้อมูล ผู้ใช้สามารถสร้างฐานข้อมูลของอุปกรณ์หรือกระบวนการนั้น ๆ ได้ จากการขั้นตอน Create Unit Operation ซึ่งเมื่อทำการเรียกใช้ขั้นตอนดังกล่าวโปรแกรมจะทำการเรียกโปรแกรม Ultra Edit 32 ซึ่งเป็นโปรแกรมแก้ไขไฟล์ข้อมูลชนิดตัวอักษร (Text Editor) เพื่อสร้างฐานข้อมูลของกระบวนการหรืออุปกรณ์นั้น ๆ ให้อยู่ในรูปแบบที่มาตรฐานเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการสร้าง CEM ต่อไปซึ่งหน้าจอแสดงขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลแสดงได้ดังภาพที่ 10 ดังนี้



ภาพที่ 10 หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างฐานข้อมูลเพิ่มเติม

3.3 การสร้าง CEM

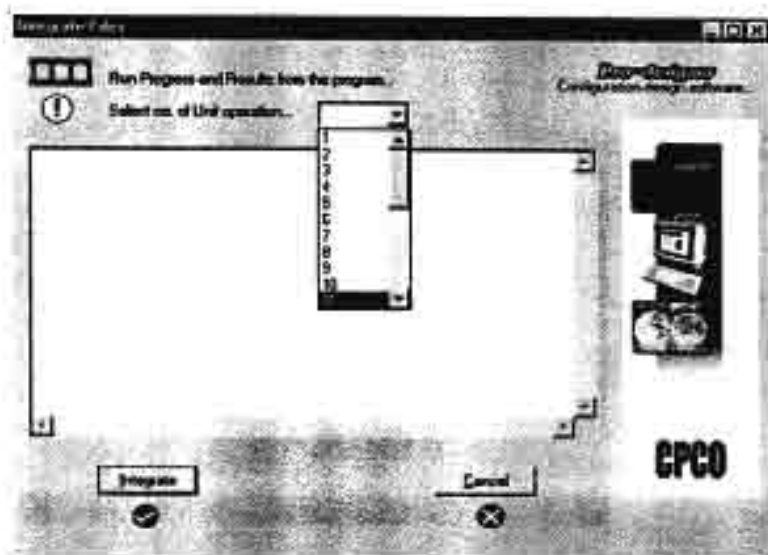
การสร้าง CEM ของอุปกรณ์ที่ต้องการออกแบบระบบควบคุมสามารถทำได้ โดยทำการกดปุ่ม Generate Cause-and-Effect matrix ในเมนูหลักเพื่อเรียกโปรแกรมในส่วนการสร้าง CEM และสามารถสร้าง CEM ของอุปกรณ์นั้น ๆ ได้โดยกดปุ่ม Run ในหน้าจอดังกล่าว ซึ่งในขั้นตอนการสร้าง CEM จะทำให้ทราบรายละเอียดของขั้นตอนการสร้างเมตริกซ์ในแต่ละขั้นตอนด้วยซึ่งหน้าจอของขั้นตอนการสร้าง CEM แสดงได้ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 หน้าจอโปรแกรมที่ใช้ในการสร้าง CEM

3.4 การรวมเมตริกซ์ CEM

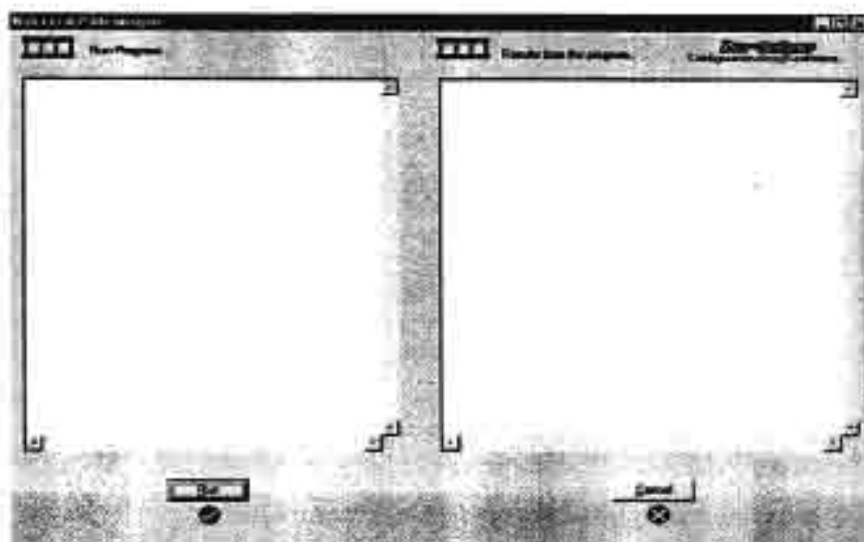
เมื่อทำการสร้าง CEM ของทุกอุปกรณ์ที่มีในกระบวนการตามวิธีการที่ได้กล่าวมาแล้วจำเป็นต้องทำการรวมไฟล์ข้อมูลของ CEM ดังกล่าวเข้าด้วยกัน รวมทั้งทำการรวมไฟล์ Relative Order ของทุกอุปกรณ์ เพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์ Non-local path และ System pairing ต่อไป ซึ่งเมื่อทำการกดปุ่ม Integrate Files จากหน้าจอหลักจะได้หน้าจอการรวมไฟล์แสดงดังภาพที่ 12 ซึ่งผู้ใช้จะต้องทำการระบุจำนวนของอุปกรณ์ที่มีในกระบวนการนั้น ๆ จากนั้นทำการกดปุ่ม Integrate ในหน้าจอของการ Integrate Files ก็จะได้ข้อมูลอยู่ในรูปแบบที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนการวิเคราะห์กระบวนการสร้างระบบควบคุมต่อไป



ภาพที่ 12 หน้าจอการรวมไฟล์ของ Cause-and-Effect Matrix และไฟล์ Relative Order

3.5 การวิเคราะห์ Non-local path

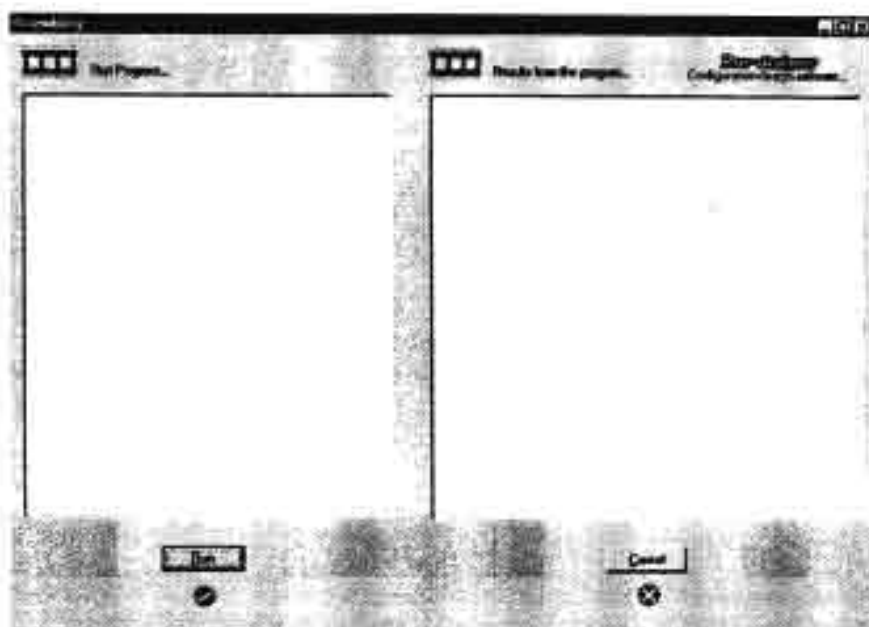
เมื่อทำการรวมรวมไฟล์ทั้งที่ได้กล่าวมาเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการวิเคราะห์ Non-local path เพื่อทำการวิเคราะห์ว่ามีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใดในการใช้ตัวแปรปรับกระบวนการร่วมกันดังรายละเอียดที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งเมื่อทำการเรียกใช้ขั้นตอนนี้โดยการกดปุ่ม Non-Local Path Analysis จากหน้าจอหลักของโปรแกรม จะได้หน้าจอของการวิเคราะห์ Non-local path แสดงดังภาพที่ 13 ซึ่งการวิเคราะห์ Non-local path สามารถทำได้โดยการกดปุ่ม Run ในหน้าจอของ Non-local path โปรแกรมจะทำการวิเคราะห์ Non-local path ซึ่งผู้ใช้อาจจะต้องได้ต่อกับโปรแกรมโดยการเลือกใช้ฐานข้อมูลหรือแนวทางในการเลือกตัวแปรปรับกระบวนการและการเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุม ซึ่งเป็นการถามตอบในลักษณะใช่หรือไม่ใช่ เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปประมวลผลเพื่อทำการเลือกตัวแปรกระบวนการที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งหลักการเลือกดังกล่าวเป็นหลักการที่อยู่ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็น CEM ที่มีจำนวนลดลงจากเดิมและมี การรวมกันของอุปกรณ์บางอุปกรณ์ที่สามารถใช้ตัวแปรปรับกระบวนการร่วมกันได้ และถ้าไม่มีตัวแปรที่สามารถใช้ร่วมกันได้ก็จะได้ข้อมูล Cause-and-Effect Matrix เป็นข้อมูลชุดเดิมซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำไปใช้ในขั้นตอนการรวมกระบวนการ หรือ Assembling Units ต่อไป



ภาพที่ 13 หน้าจอการวิเคราะห์ Non-local path

3.6 การทำ Assembling Units

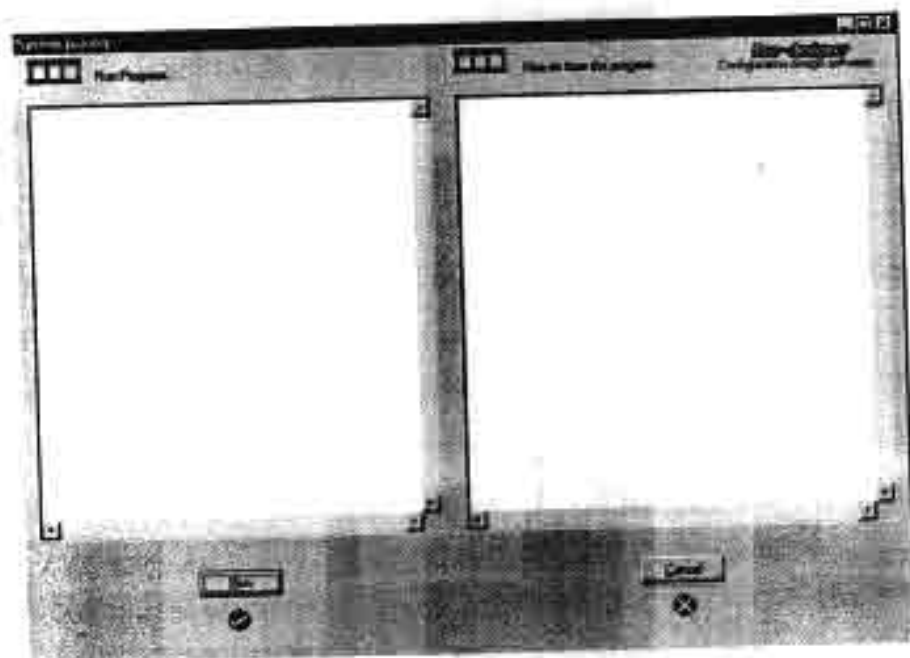
เมื่อทำการวิเคราะห์ Non-local path เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการทำ Assembling เพื่อลดจำนวนตัวแปรปรับกระบวนการที่อยู่ในสายเดียวกันตามรายละเอียดที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งเมื่อทำการกดปุ่ม Assembling จากหน้าจอหลักจะได้หน้าจอการทำ Assembling Units แสดงดังภาพที่ 14 จากหน้าจอการทำ Assembling Units เมื่อทำการกดปุ่ม Run โปรแกรมจะถามผู้ใช้ให้ผู้ใช้โปรแกรมเลือกตัวแปรปรับกระบวนการที่อยู่ในสายเดียวกัน ซึ่งผู้ใช้จะต้องทำการศึกษาว่ามีตัวแปรปรับกระบวนการใดบ้างที่อยู่ในสายเดียวกันโดยศึกษาจากแผนภาพกระบวนการผลิต (Process Flow Sheet) ซึ่งเมื่อทำการ Assembling Units เรียบร้อยแล้วจะได้ Plant Wide CEM ของทั้งกระบวนการเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการทำ System pairing ต่อไป



ภาพที่ 14 หน้าจอการทำ Assembling Units

3.7 การทำ System Pairing

เมื่อทำการ Assembling Units เรียบร้อยแล้วขั้นตอนต่อไปจะเป็นขั้นตอนการทำ System Pairing ซึ่งหน้าจอของการทำ System pairing สามารถแสดงดังภาพที่ 15 เพื่อทำการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมรวมถึงการหาแนวทางหรือรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการออกแบบระบบควบคุมของกระบวนการจริง เมื่อทำการกดปุ่ม System Pairing ในหน้าจอหลักของโปรแกรม จะได้น้ำจอการทำ System Pairing แสดงดังภาพที่ 15 ซึ่งในขั้นตอนการใช้โปรแกรมส่วนนี้ โปรแกรมจะมีการถามตอบในลักษณะใช่หรือไม่ใช่เพื่อทำการเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุม รวมทั้งตัวแปรที่ใช้ปรับกระบวนการเช่นเดียวกับส่วนการวิเคราะห์ Non-local path เพื่อนำข้อมูลที่ได้จากการถามตอบไปใช้ในการประมวลผลเพื่อเลือกตัวแปรที่เหมาะสมต่อไป โดยอาศัยหลักการการเลือกตัวแปรปรับกระบวนการและการเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุมตามหลักการ หลังจากการทำ System Pairing แล้วจะได้แนวทางหรือรูปแบบการจับคู่ของตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมทั้งหมด ซึ่งขั้นตอนการเลือกรูปแบบที่เหมาะสมสามารถใช้หลักการการพิจารณาจากหลักการเลือกตัวแปรกระบวนการจากภคผนวก ค ซึ่งจะได้รูปแบบการควบคุมที่ดีที่สุดก่อนจะนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของกระบวนการจริงต่อไป



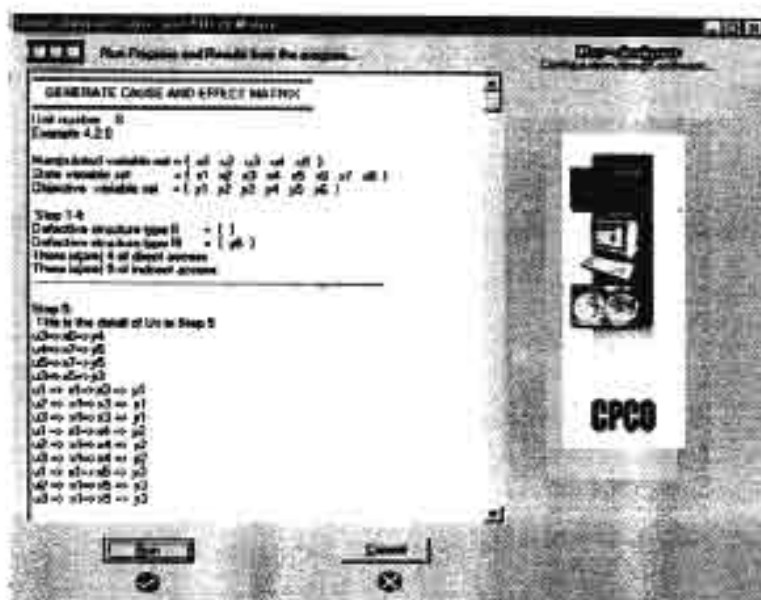
ภาพที่ 15 หน้าจอการทำ System Pairing

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การออกแบบระบบควบคุมกระบวนการทางเคมี โดยอาศัยทฤษฎีความสามารถในการควบคุมได้เชิงโครงสร้างดังกล่าวข้างต้นนั้น สามารถทำได้โดยการใช้โปรแกรมที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นจากต้นแบบโปรแกรมการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติเดิมที่มีอยู่ ซึ่งโปรแกรมที่พัฒนาและปรับปรุงขึ้นสามารถทำงานได้เครื่องบนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลในระบบปฏิบัติการ 32 บิต ได้แก่ระบบปฏิบัติการ Window 98 และ Window NT 4.0 จากนั้นได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมที่ปรับปรุงและพัฒนาจากเดิมกับกระบวนการ Expanded Williams-Otto และเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาดังกล่าวกับผลจากโปรแกรมต้นแบบที่มีอยู่เดิมก่อนที่จะนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของโรงงานแปรสภาพแรมโนนาไซด์ ซึ่งผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมของโปรแกรมที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นใหม่ให้ผลที่สอดคล้องกับผลที่ได้จากต้นแบบโปรแกรมเดิมที่มีอยู่ ซึ่งเป็นการยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นนอกจากนี้ยังแสดงถึงความเชื่อมั่นที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับการศึกษาอื่น ๆ ซึ่งได้แก่โรงงานแปรสภาพแรมโนนาไซด์ดังกล่าวซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การใช้โปรแกรมที่พัฒนาและปรับปรุงตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม

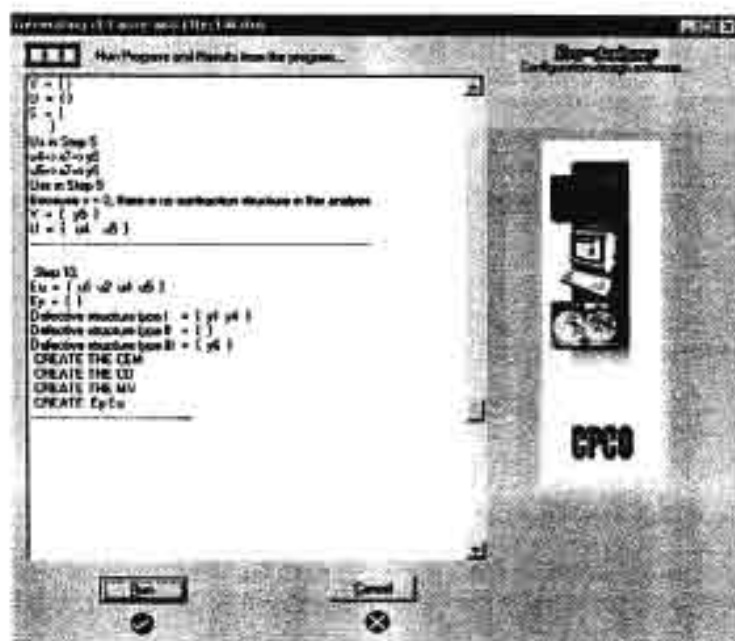
สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมการออกแบบระบบควบคุมที่พัฒนาและปรับปรุงขึ้นให้สามารถทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลนั้นจะตรวจสอบผลโดยการใช้กระบวนการ Expanded Williams-Otto เป็นกรณีศึกษาเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมซึ่งผลที่ได้จะแสดงเพียงบางส่วน ซึ่งผลที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



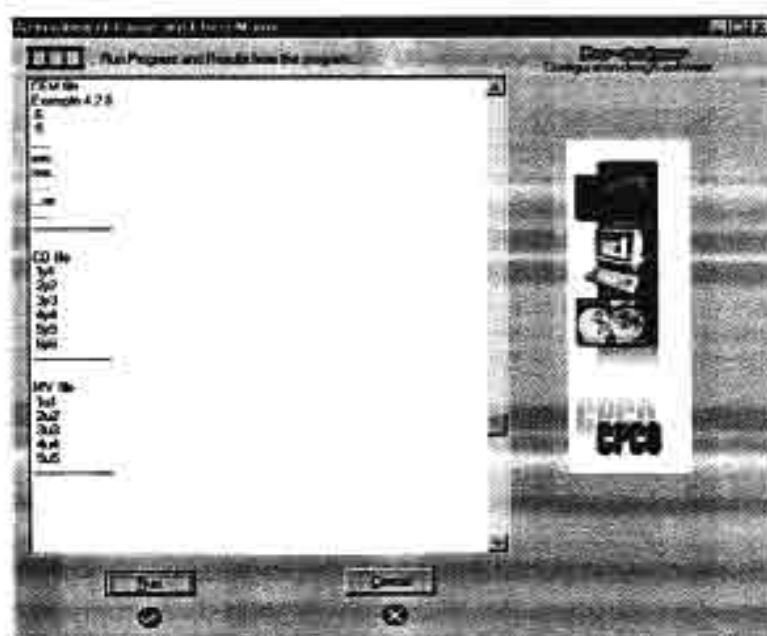
ภาพที่ 16 ผลการรันโปรแกรมตัวอย่างที่ 4.26 (Lin, 1991) โดยใช้อัลกอริทึม



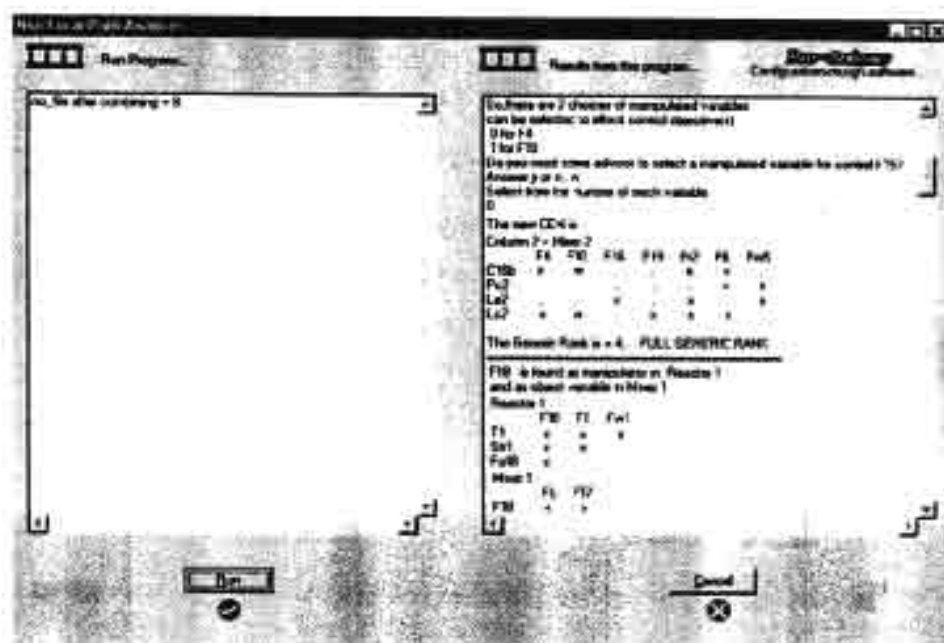
ภาพที่ 17 ผลการรันโปรแกรมตัวอย่างที่ 4.26 (Lin, 1991) โดยใช้อัลกอริทึมในภาคผนวก ข



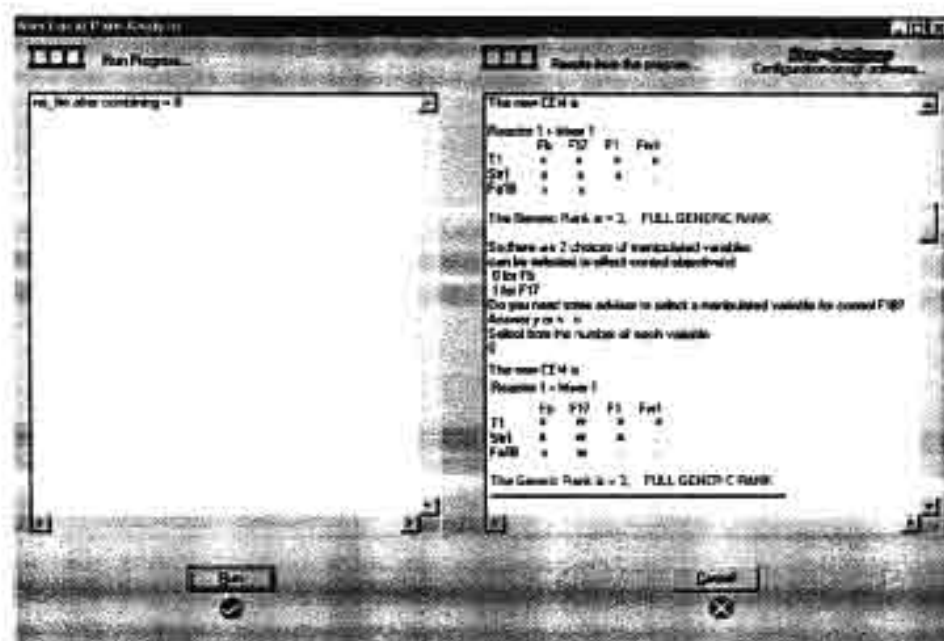
ภาพที่ 18 ผลการรันโปรแกรม ตัวอย่างที่ 4.26 (Lin, 1991) โดยอัลกอริทึม 2
(ต่อ)



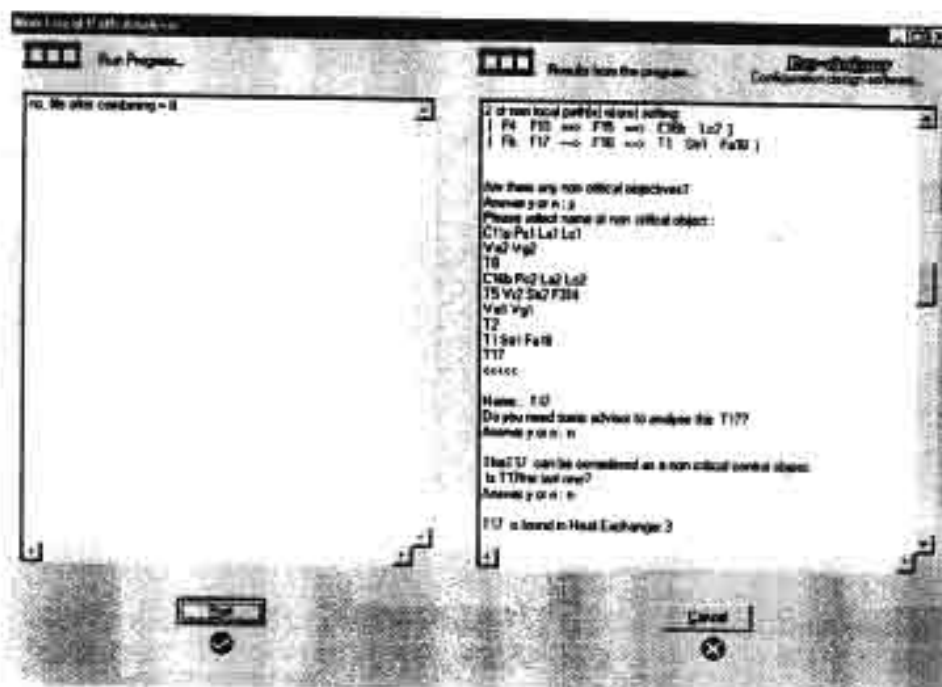
ภาพที่ 19 ผลการรันโปรแกรม ตัวอย่างที่ 4.26 (Lin, 1991) โดยใช้ Algorithm 2
(ต่อ)



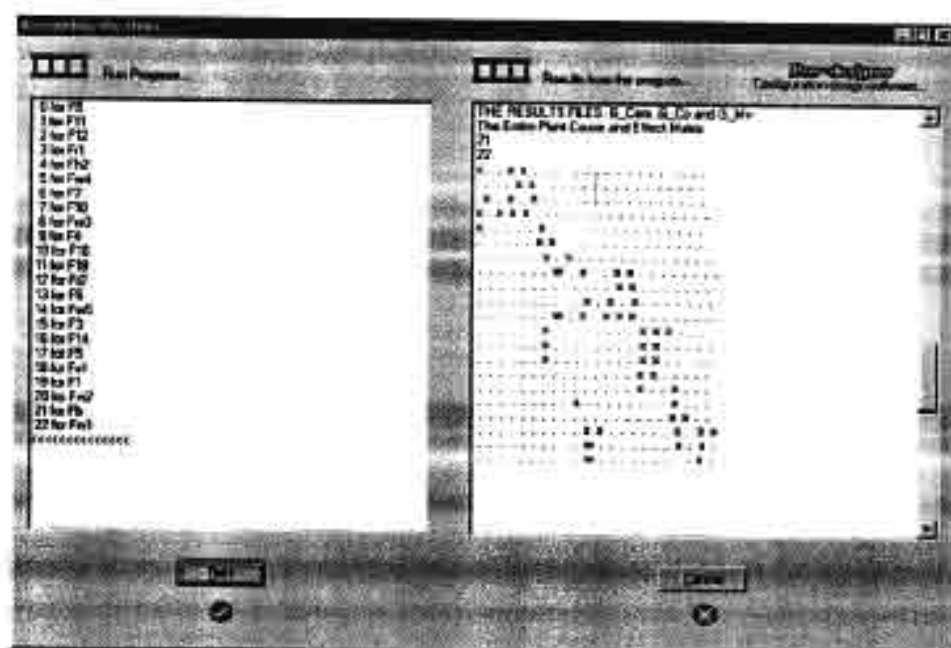
ภาพที่ 20 ผลการวิเคราะห์ "Non-local path" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม



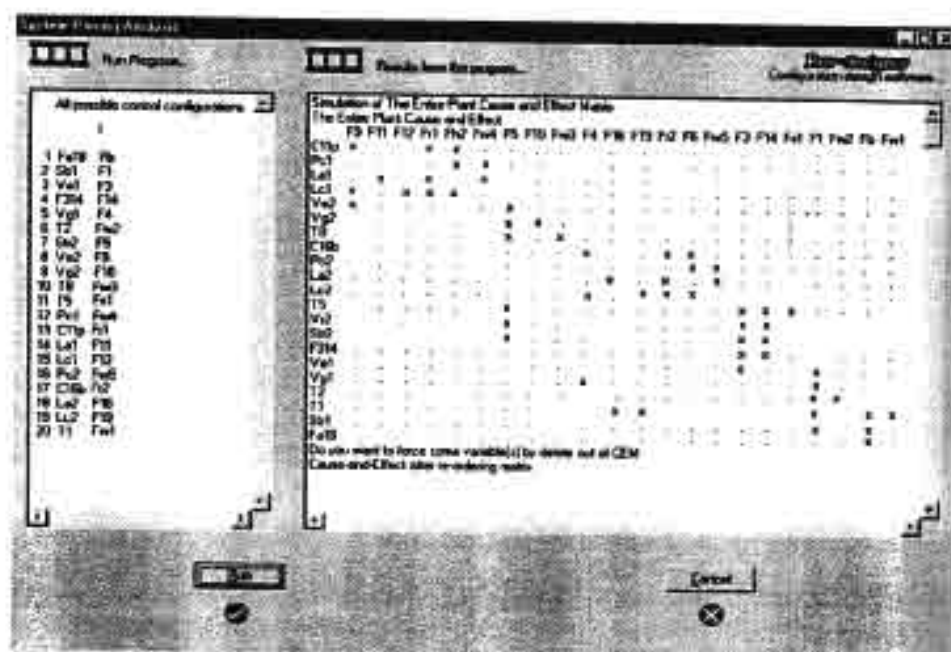
ภาพที่ 21 ผลการวิเคราะห์ "Non-local path" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม (ต่อ)



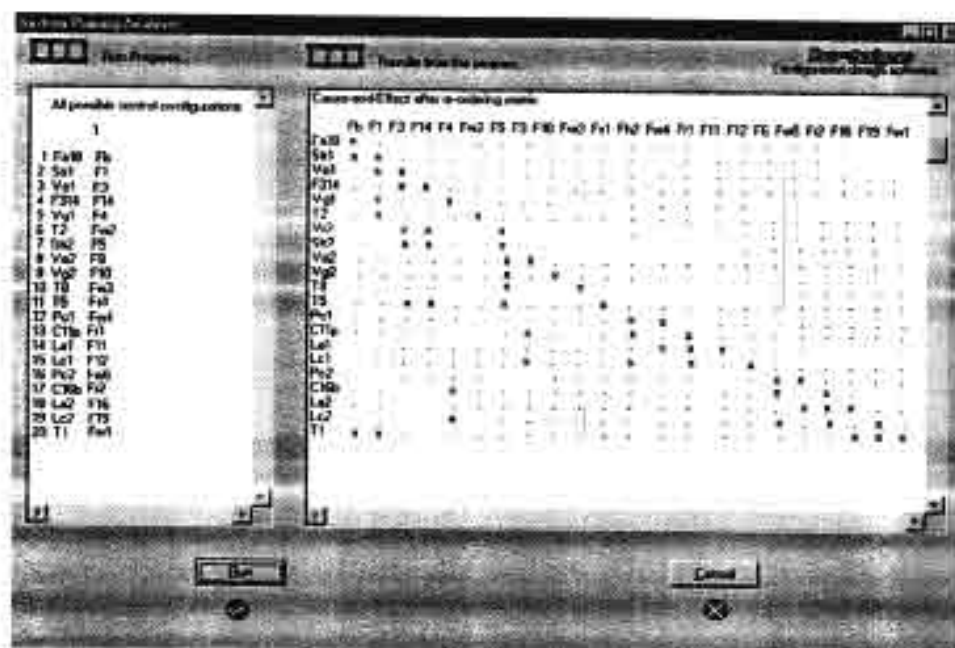
ภาพที่ 22 ผลการวิเคราะห์ "Non-local path" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม (ต่อ)



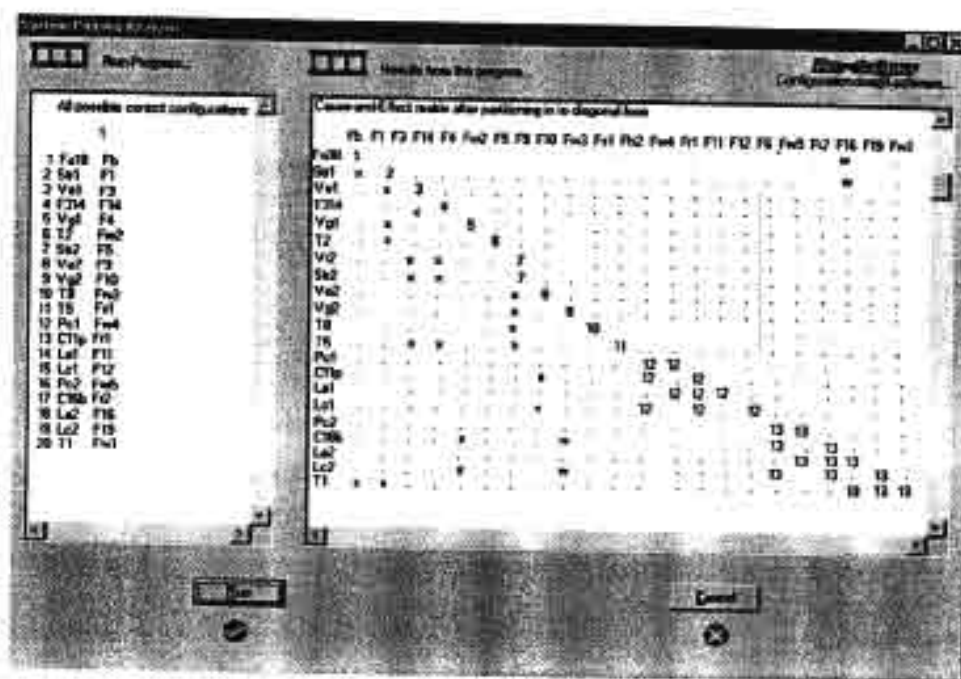
ภาพที่ 23 ผลการวิเคราะห์ "Assembling" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม



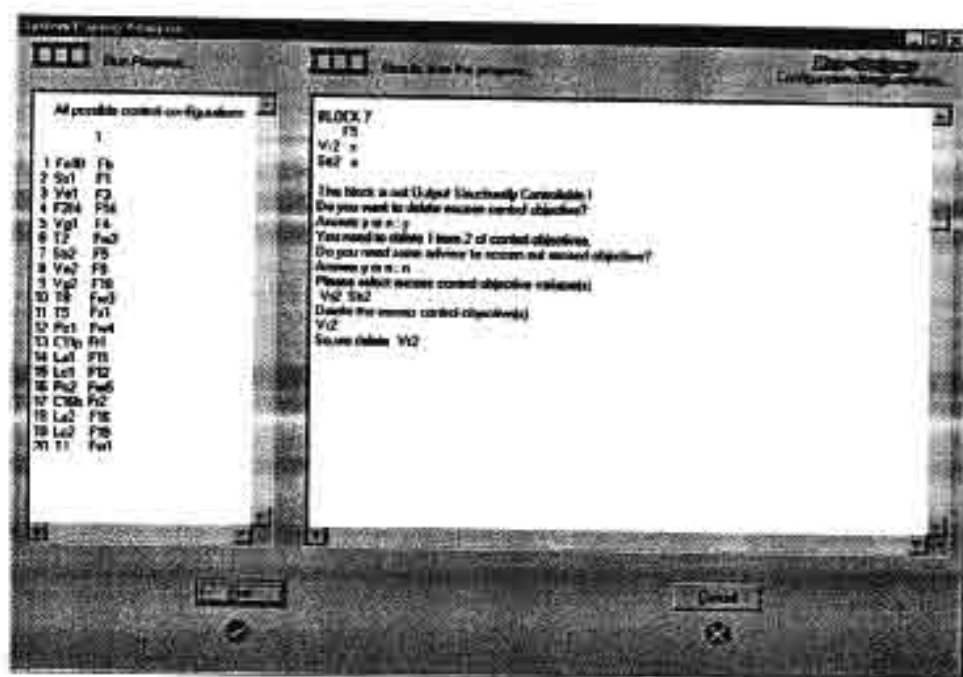
ภาพที่ 24 ผลการวิเคราะห์ "System Pairing" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม



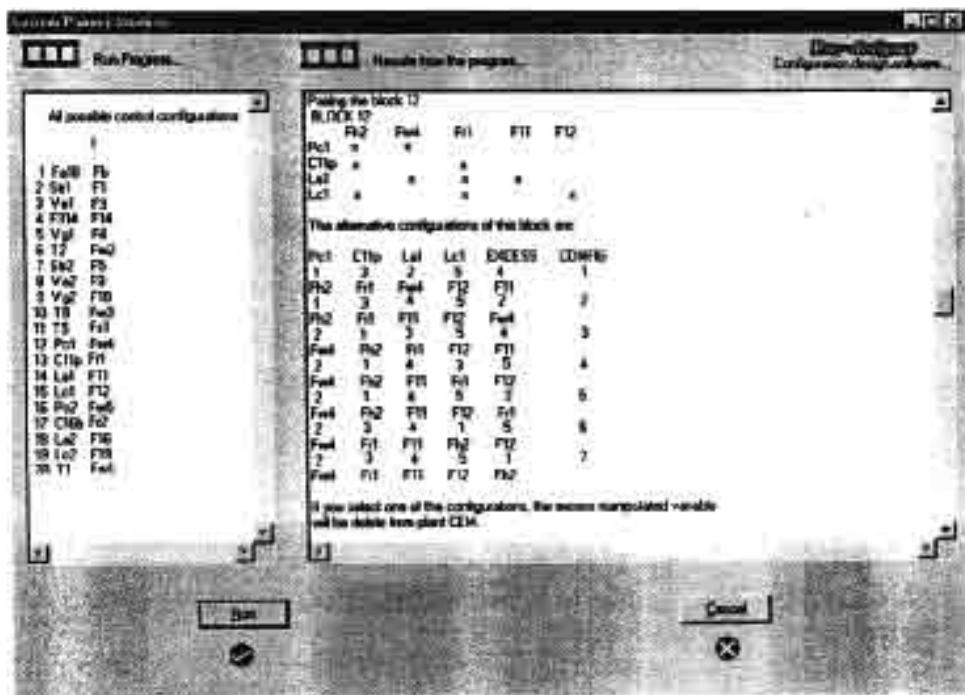
ภาพที่ 25 ผลการวิเคราะห์ "System Pairing" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม (ต่อ)



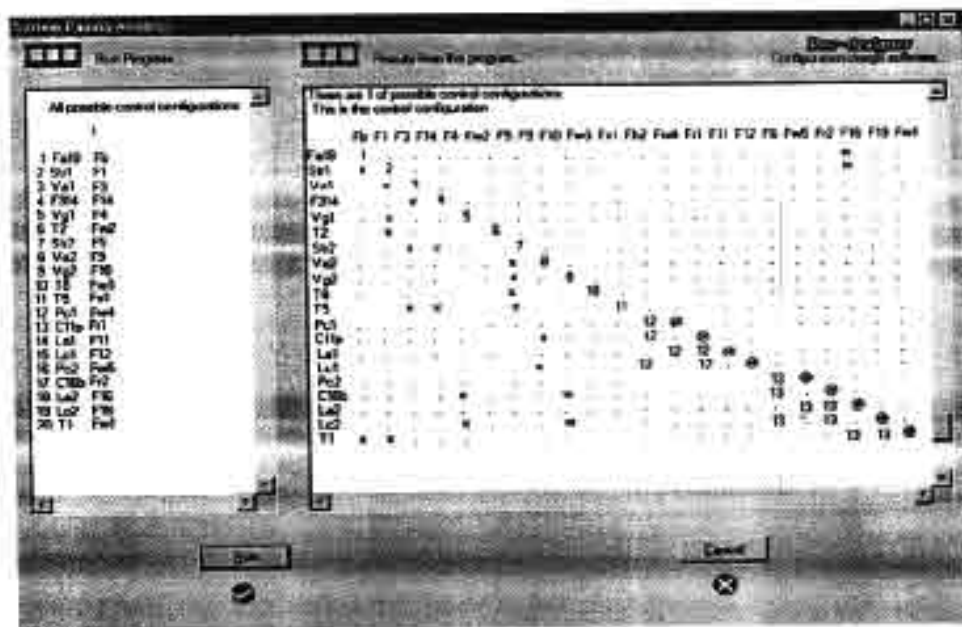
ภาพที่ 26 ผลการวิเคราะห์ "System Pairing" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม (ต่อ)



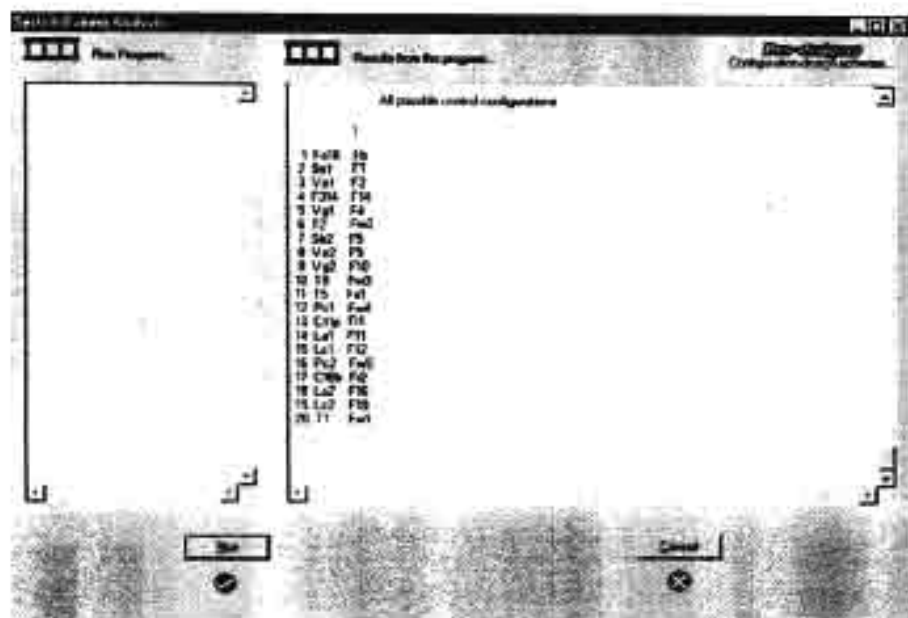
ภาพที่ 27 ผลการวิเคราะห์ "System Pairing" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม (ต่อ)



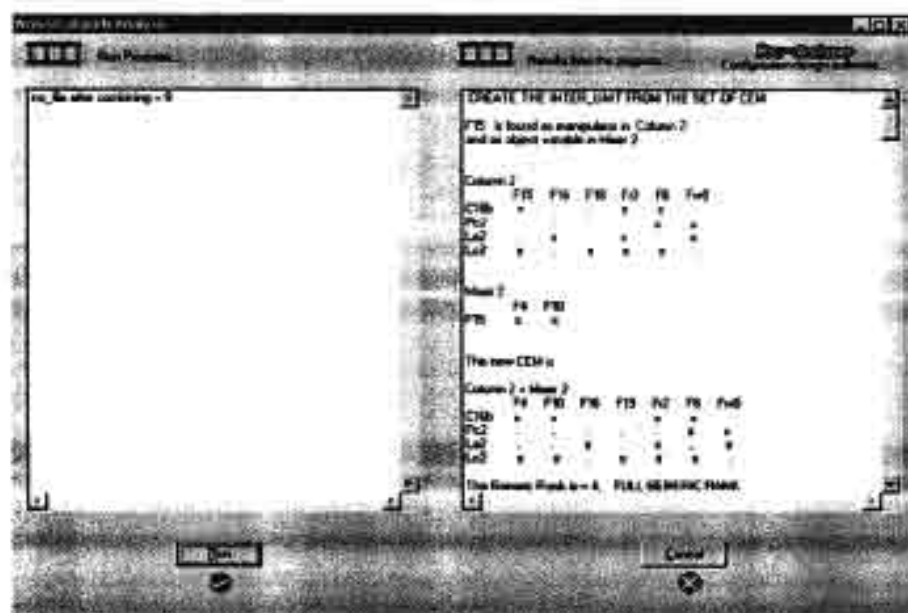
ภาพที่ 29 ผลการวิเคราะห์ "System Pairing" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม (ต่อ)



ภาพที่ 30 ผลการวิเคราะห์ "System Pairing" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม (ต่อ)



ภาพที่ 31 ผลการวิเคราะห์ "System Pairing" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto ที่ได้จากโปรแกรม (ต่อ)



ภาพที่ 32 ผลการวิเคราะห์ "Non-local path" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto เมื่อใช้หลักการเลือกตัวแปรปรับกระบวนการ



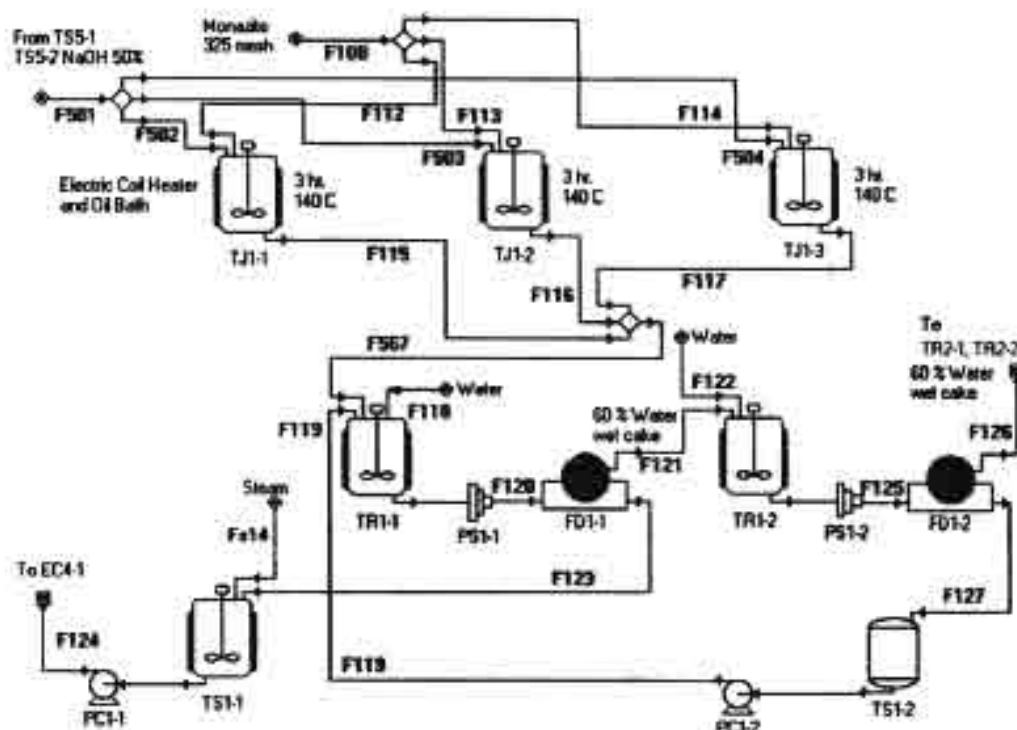
ภาพที่ 35 ผลการวิเคราะห์ "System Pairing" ของกระบวนการ Expanded Williams-Otto
เมื่อใช้หลักการเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุม (ต่อ)

2.2 กระบวนการย่อยแร่ (หน่วยที่ 1)

2.2.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

สำหรับรายละเอียดของกระบวนการย่อยแร่สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 36

ดังนี้



ภาพที่ 36 แสดงรายละเอียดกระบวนการย่อยแร่ (หน่วยที่ 1)

กระบวนการย่อยแร่ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ถังปฏิกรณ์ย่อยแร่โมนาไซด์ (TJ1-1, TJ1-2, TJ1-3)
- ถังผสม 1 (Mixer 1)
- ถังล้างของผสมและทำสารละลายเจือจาง (TR1-1)
- เครื่องกรอง (FD1-1, FD1-2)
- ถังล้างตะกอนและทำสารละลายเจือจาง (TR1-2)
- ถังพักสารละลายถังที่ 1 (TS1-1)
- ถังพักสารละลายถังที่ 2 (TS1-2)

การทำงานของกระบวนการนี้เริ่มจากการนำแร่โมนาไซด์ที่ถูกบดอย่างละเอียด จากหน่วยกระบวนการผลิตที่ 1-1 ลงสู่ถังย่อยแร่ทั้ง 3 ถังได้แก่ TJ1-1, TJ1-2 และ TJ1-3 โดยจะแบ่งเท่า ๆ กันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยแร่ หลังจากแยกลงสู่ถังย่อยทั้งสาม

แล้ว จะทำการย่อยด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้น 50 % เป็นเวลา 3-4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือตะกอนของสารประกอบไฮดรอกไซด์ของธาตุหายาก สารละลาย Na_3PO_4 รวมถึงแอมโมเนียไซด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยา (จากข้อมูลสมดุลมวลสารแอมโมเนียไซด์จะทำปฏิกิริยาเคมี 80 % ของปริมาณแอมโมเนียที่ป้อนเข้ามา) จากนั้นนำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาล้างตะกอนในถัง TR1-1 ด้วยน้ำสะอาดและน้ำที่ป้อนกลับจากการล้างตะกอนครั้งที่ 2 แล้วนำไปกรองผ่านเครื่องกรอง FD1-1 ซึ่งจะกรองเอาเด็กของสารประกอบไฮดรอกไซด์และแอมโมเนียให้ได้ความชื้น 60 % จากนั้นนำเด็กนี้เข้าสู่ TR1-2 เพื่อทำการล้างตะกอนเป็นครั้งที่ 2 ส่วนสารละลายเข้มข้นน้ำที่ได้จากการล้างตะกอนในถัง TR1-1 นั้นจะนำไปผลิตโซเดียมฟอสเฟต ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12 \text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ได้ในหน่วยที่ 4 ต่อไป หลังจากทำการล้างตะกอนครั้งที่ 2 แล้วจะนำเอาตะกอนที่ได้ไปผ่านเครื่องกรอง FD1-2 ซึ่งจะกรองเอาเด็กที่มีความชื้น 60 % เพื่อนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในหน่วยที่ 2 ต่อไป ส่วนน้ำที่ได้จากการกรองจะนำกลับไปป้อนกลับใหม่ดังกล่าวข้างต้น

2.2.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยย่อยสามารถสร้าง CEM ของหน่วยอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนาซึ่งจะได้ CEM และได้ผลการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งจากการวิเคราะห์ในลักษณะเช่นเดียวกันหน่วยกระบวนการที่ 1-1 ข้างต้นพบว่า CEM ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในกระบวนการจะมีทั้งหมด 10 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์หรือระบบที่มีอยู่ในกระบวนการ จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM พบว่าอุปกรณ์เครื่องกรอง FD1-1 และเครื่องกรอง FD1-2 จะพบ Rank Deficiency ซึ่งในกรณีนี้จะออกแบบระบบควบคุมโดยยังรักษา Rank Deficiency เอาไว้ สำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ "Non-local path" ของระบบนี้พบ Non-local path 2 Non-local path ดังนี้

F115, F116, F117 → F567 → Vr11, dr11

F120 → F121 → Vr12, dr12

ซึ่งจาก Non-local path ที่เกิดขึ้นจะทำให้มีการรวมกันของ CEM ของอุปกรณ์ถึงล่างของผสม 1 (TR1-1) กับถังผสม 1 (Mixer 1) และเครื่องกรองที่ 1 (FD1-1) กับถังล่างของผสม 2 (TR1-2) ซึ่งจะทำให้จำนวน CEM ของกระบวนการลดลงเหลือเพียง 8 CEM เนื่องจากเส้นทาง F115, F116, F117 → F567 → Vr11, dr11 ที่เกิด Non-local path นั้น จะทำให้เกิดความบกพร่องเชิงโครงสร้างชนิดที่ 1 ซึ่งเป็น Contraction ขึ้นซึ่งจะมีผลทำให้ระบบนั้น ๆ ขาดคุณสมบัติความสามารถในการควบคุมได้เชิงโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องเลือกตัวแปรปรับกระบวนการที่เหมาะสม เพื่อกำจัด Contraction ที่เกิดขึ้น เนื่องจากสาย F115, F116, F117 เป็นสายของของผสมจากถังปฏิกรณ์ TJ1-1, TJ1-2, TJ1-3 เนื่องจาก F115, F116 และ F117 สามารถใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการได้ทุกตัวแปรและจะมีผลกระทบโดยตรง (Guideline 5.) ต่อตัวแปรที่ต้องควบคุมเหมือนกันดังนั้นจึงเลือกตัวแปร F115 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการและพิจารณาให้ตัวแปร F116, F117 เป็นตัวแปรรบกวน เพื่อกำจัด Contraction ออกจากระบบข้างต้น หลังจากการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM ทั้งหมดเป็น Plant Wide CEM ซึ่งจะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 27 ตัวแปรเหลือเพียง 22 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System Pairing" ต่อไป

ในขั้นตอนการทำ "System Pairing" จะทำการตัดตัวแปร F123 และ F127 ซึ่งเป็นสายของสารละลายที่ได้จากเครื่องกรองซึ่งไม่สามารถใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการเพื่อควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้เนื่องจากอัตราการไหลของสารละลายจากเครื่องกรองจะแปรผันตามอัตราการกรองและอัตราการป้อนสารละลายเข้าเครื่องกรอง ซึ่งผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของกระบวนการแสดงได้ดังภาพที่ 37 และ 38 ดังนี้

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	Pa1	F125	Pa2	F124	F119	Fa14	F502	F112	F115	Fa11	F503	F113	F116	Fa12
Dd11	1													
F126		2												
Dd12			3											
Va11				4										
Va12					5									
Ta11				x		6								
η_{11}							7	7						
Vj11							7	7	7					
qj11							7	7	7					
Tj11							x	x	x	8				
η_{12}											9	9		
Vj12											9	9	9	
qj12											9	9	9	
Tj12											x	x	x	10

ภาพที่ 37 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 1

	F504	F114	F117	Fa13	F120	F122	F118
η_{13}		11	11				
Vj13		11	11	11			
qj13		11	11	11			
Tj13		x	x	x	12		
Vr12					13	13	
Vr11				x	13		13

ภาพที่ 38 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 1 (ต่อ)

ผลที่ได้จากการทำ "System pairing" พบว่าใน Block 7 จะมีรูปแบบในการควบคุม 4 รูปแบบการควบคุมจากการใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 3 ตัวแปรได้แก่ F502, F112 และ F115 เพื่อควบคุม η_{11} , V_{j11} และ η_{11} ซึ่งจากการใช้ Relative Order Matrix ให้ผลดังแสดงในภาพที่ 39 พบว่าทุกรูปแบบการควบคุมจะให้รูปแบบของ Relative Order Matrix เหมือนกันทุกตัวของตัวแปรซึ่งไม่สามารถเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมได้ จากการใช้หลักการเลือกตัวแปรปรับกระบวนการ จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 3 โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F115 ควบคุม η_{11} เนื่องจากตัวแปร F115 จะส่งผลกระทบต่อระบบได้เร็วและส่งผลในเชิงควบคุมโดยตรง (Guideline 5,7) ส่วน V_{j11} จะควบคุมโดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F502 เนื่องจากส่งผลกระทบต่อระบบได้เร็ว (Guideline 5,7) และจะใช้ตัวแปร F112 ควบคุมอัตราส่วนในการป้อนสารตั้งต้นเข้าถังปฏิกรณ์ (η_{11}) ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสม ในส่วนของ Block 9 และ Block 11 จะให้รูปแบบการควบคุม 4 รูปแบบและให้รูปแบบของ Relative Order Matrix เช่นเดียวกันกับ Block ที่ 7 ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 84, 85 เนื่องจากทุกรูปแบบการควบคุมให้รูปแบบของ Relative Order Matrix เหมือนกันซึ่งไม่สามารถเลือกโดยใช้ Relative Order Matrix ได้ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมรูปแบบที่ 3 ด้วยเหตุผลเดียวกันกับ Block 7 โดยจะใช้ F116 ควบคุม η_{12} , F113 ควบคุม η_{12} , F503 ควบคุม V_{j12} สำหรับ Block 9 และใช้ F117 ควบคุม η_{13} , F114 ควบคุม η_{13} , F504 ควบคุม V_{j13} สำหรับ Block 11 ส่วนใน Block 13 จะมีรูปแบบการควบคุม 3 รูปแบบเพื่อควบคุมปริมาณสารละลายในถัง TR1-1 (V_{r11}) และ TR1-2 (V_{r12}) โดยใช้ตัวแปร F120, F122 และ F118 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการซึ่งจากการใช้ Relative Order Matrix กับ Block 13 ดังกล่าวจะให้รูปแบบของ Relative Order Matrix ดังภาพที่ 85 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 3 ซึ่งเป็นรูปแบบการควบคุมที่ดีที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นไปตามกฎข้อ 1 และ 3 ซึ่งรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมดของกระบวนการย่อยจะได้รูปแบบทั้งหมด 192 รูปแบบการ

BLOCK 7

F502 F112 F115

 η_{11} x x V_{j11} x x x η_{11} x x x

Configuration number 1.

F502 F112 F115

 η_{11} 1 1 V_{j11} 1 1 1 η_{11} 1 1 1

Configuration number 2.

F502 F115 F112

 η_{11} 1 1 V_{j11} 1 1 1 η_{11} 1 1 1

Configuration number 3.

F112 F502 F115

 η_{11} 1 1 V_{j11} 1 1 1 η_{11} 1 1 1

Configuration number 4.

F112 F115 F502

η_{11}	1		1
V_{j11}	1	1	1
U_{11}	1	1	1

BLOCK 9

F503 F113 F116

η_{12}	x	x	
V_{j12}	x	x	x
U_{12}	x	x	x

Configuration number 1.

F503 F113 F116

η_{12}	1	1	
V_{j12}	1	1	1
U_{12}	1	1	1

Configuration number 2.

F503 F116 F113

η_{12}	1		1
V_{j12}	1	1	1
U_{12}	1	1	1

Configuration number 3.

F113 F503 F116

η_{12}	1	1	
V_{j12}	1	1	1
U_{12}	1	1	1

ภาพที่ 39 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 7, 9, 11 และ Block 13

Configuration number 4.

F113 F116 F503

η_{12}	1		1
V_{j12}	1	1	1
U_{12}	1	1	1

BLOCK 11

F504 F114 F117

η_{13}	x	x	
V_{j13}	x	x	x
U_{13}	x	x	x

Configuration number 1.

F504 F114 F117

η_{13}	1	1	
V_{j13}	1	1	1
U_{13}	1	1	1

Configuration number 2.

F504 F117 F114

η_{13}	1		1
V_{j13}	1	1	1
U_{13}	1	1	1

Configuration number 3.

F114 F504 F117

η_{13}	1	1	
V_{j13}	1	1	1

q_{13} 1 1 1
 Configuration number 4.
 F_{114} F_{117} F_{504}
 q_{13} 1 1
 V_{13} 1 1 1
 q_{13} 1 1 1

BLOCK 13
 F_{120} F_{122} F_{118}
 V_{12} x x
 V_{11} x x
 Configuration number 1.
 F_{120} F_{118}
 V_{12} 1
 V_{11} 1 1
 Configuration number 2.
 F_{122} F_{120}
 V_{12} 1 1
 V_{11} 1
 Configuration number 3.
 F_{122} F_{118}
 V_{12} 1
 V_{11} 1

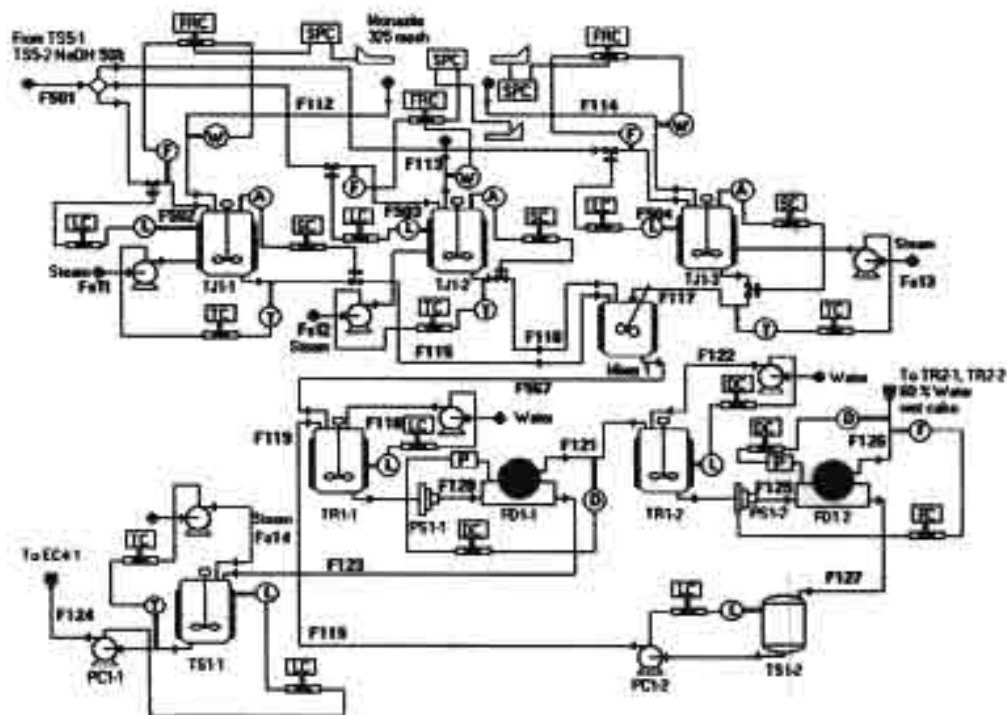
ภาพที่ 40 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 7, 9, 11 และ Block 13

ควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้น จะได้รูปแบบการจัดระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการกับตัวแปรที่ต้องการควบคุมดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการย่อยแร่

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	Dd11	Pd1
2	F126	F125
3	Dd12	Pd2
4	Vs11	F124
5	Vs12	F119
6	Ts11	Fs14
7	η11	F112
8	Vj11	F502
9	ηj11	F115
10	Tj11	Fs11
11	ηj12	F113
12	Vj12	F503
13	ηj12	F116
14	Tj12	Fs12
15	ηj13	F114
16	Vj13	F504
17	ηj13	F117
18	Tj13	Fs13
19	Vr12	F122
20	Vr11	F118

สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการหน่วยย่อยแร่เมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการจะได้รูปแบบของระบบควบคุมดังภาพที่ 41 ดังนี้



ภาพที่ 41 แสดงกระบวนการย่อยแร่เมื่อใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ

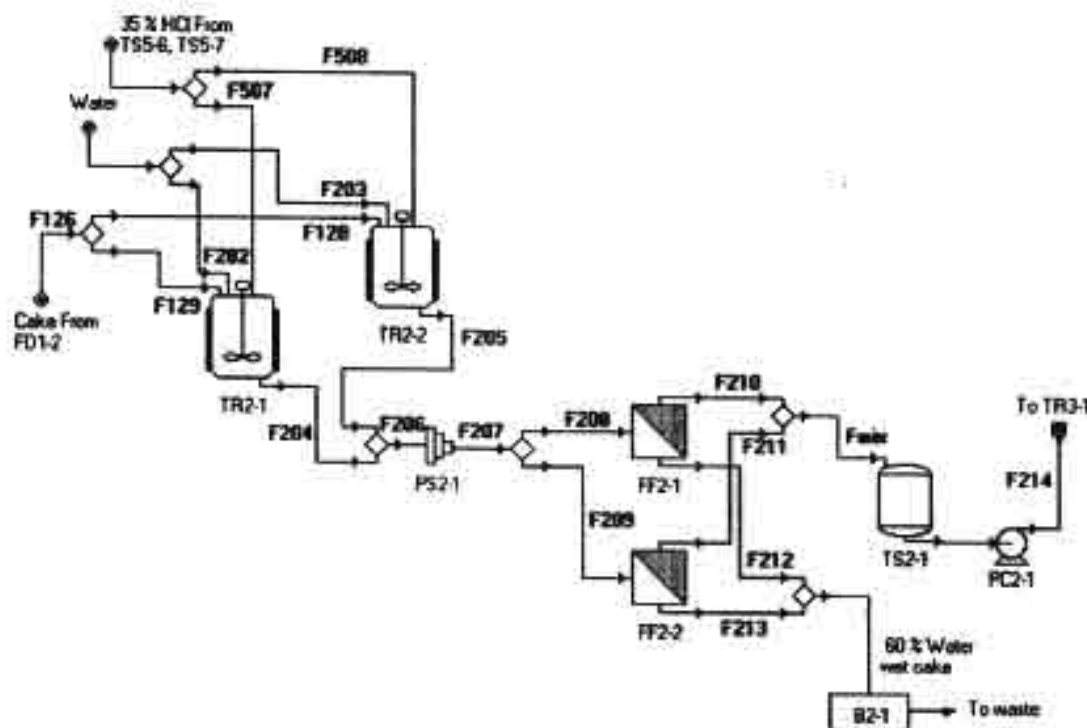
ในกระบวนการย่อยแร่ดังกล่าวข้างต้นจะประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 10 หน่วยและจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมความหนาแน่น (DC) 2 ลูป การควบคุมอัตราการไหล (FC) 1 ลูป การควบคุมระดับ (LC) 7 ลูป การควบคุมอุณหภูมิ (TC) 4 ลูป การควบคุมอัตราการป้อนสารตั้งต้น (FRC) 3 ลูป การควบคุมระยะเวลา (SC) 3 ลูป ซึ่งมีจำนวนรวมทั้งหมด 20 ลูปการควบคุม

2.3 กระบวนการทำละลาย (หน่วยที่ 2)

2.3.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

สำหรับรายละเอียดของกระบวนการทำละลายสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 42

ดังนี้



ภาพที่ 42 แสดงรายละเอียดกระบวนการทำลาย (หน่วยที่ 2)

กระบวนการทำลายประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ถังปฏิกรณ์ทำลาย (TR2-1, TR2-2)
- เครื่องกรอง (FF2-1, FF2-2)
- ถังพักสารละลายที่ได้จากการกรอง (TS2-1)

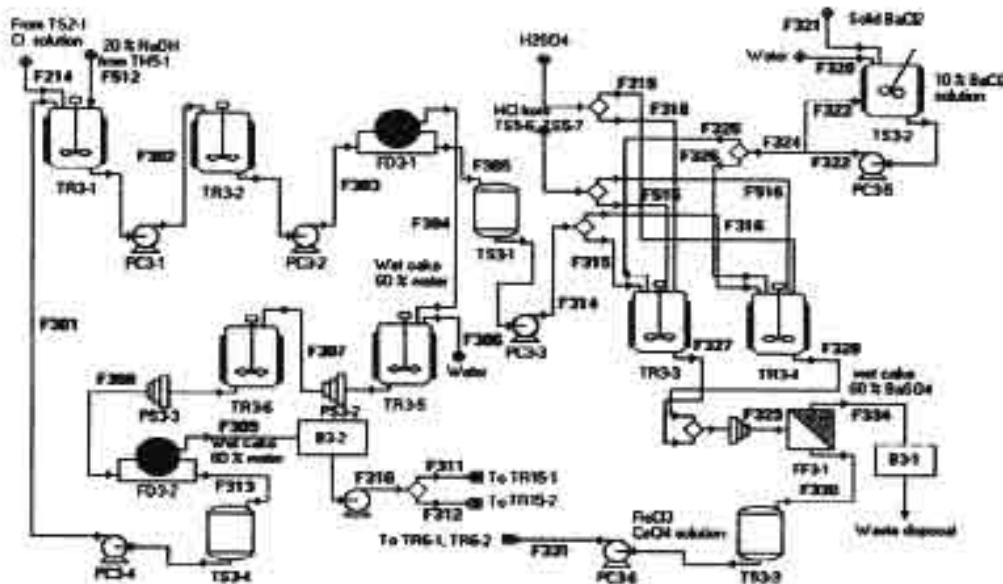
การทำงานของกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนสารประกอบไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการกรองผ่านเครื่องกรอง FD1-2 ในหน่วยที่ 1 ให้เป็นสารประกอบคลอไรด์ซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ในขณะที่สารประกอบไฮดรอกไซด์จะเป็นตะกอน กระบวนการทำงานของหน่วยทำลาย เริ่มจากการนำเอาสารประกอบไฮดรอกไซด์รวมถึงแอมโมเนียไซด์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาเคมีซึ่งมีความเข้มข้น 80 % น้ำ ที่ได้จากการกรองผ่านเครื่องกรอง FD1-2 ในหน่วยที่ 1 มาแยกได้ในถังปฏิกรณ์หรือถังทำลาย TR2-1 และ TR2-2 ด้วยปริมาณที่เท่า ๆ กันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้น จากนั้นเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 35 % (HCl 35%) เพื่อเปลี่ยนสารประกอบไฮดรอกไซด์ให้เป็นสารประกอบคลอไรด์ จากนั้นนำสารละลายที่ได้ทั้งหมดจาก TR2-1 และ TR2-2 ผ่านเครื่องกรอง FF2-1 และ FF2-2 สารละลายที่ผ่านเครื่องกรองทั้งสองจะเข้าสู่ถัง TS2- 1 เพื่อใช้ในหน่วยที่ 3 ต่อไป ซึ่งสารละลายเหล่านี้จะเป็นประกอบคลอไรด์ ส่วนกากของแข็งที่ได้จากการกรองผ่าน FF2-1 และ FF2-2 จะถูกกำจัดออก โดยของแข็งดังกล่าวจะเป็นตะกอนโมเนไซด์ที่ไม่ย่อยสลายจากการย่อยแ่จากหน่วยกระบวนการที่ 1

สมมติฐาน หลังจากการกรองตะกอนของแร่โมนาไซด์ที่ไม่ถูกย่อยด้วยเครื่องกรอง FF2-1 และ FF2-2 และทำการล้างตะกอนแล้ว ไม่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ติดมากับตะกอน

2.4 กระบวนการตกตะกอนเบื้องต้น (หน่วยที่ 3)

2.4.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

รายละเอียดของกระบวนการย่อยแร่สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 แสดงรายละเอียดกระบวนการตกตะกอนเบื้องต้น (หน่วยที่ 3)

กระบวนการตกตะกอนเบื้องต้นประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

- ถังปฏิกรณ์ตกตะกอน (TR3-1)
- เครื่องกรองที่ 1 (FD3-1)
- ถังล้างของผลที่ 1 (TR3-5)
- เครื่องกรองที่ 2 (FD3-2)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (TR3-3)
- เครื่องกรองที่ 3 (FF3-1)
- ถังพักสารละลายที่ 5 (TS3-3)
- ถังพักสารละลายที่ 1 (TR3-2)
- ถังพักสารละลายที่ 2 (TS3-1)
- ถังพักสารละลายที่ 3 (TR3-6)
- ถังพักสารละลายที่ 4 (TS3-4)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (TR3-4)
- ถังเตรียมสารละลาย (TS3-2)
- ถังพักตะกอนเปียก (B3-2)

กระบวนการตกตะกอนเบื้องต้นเป็นหน่วยที่ทำงานต่อเนื่องจากหน่วยที่ 2 โดยเริ่มจากการนำสารละลายของสารประกอบคลอไรด์ที่ผ่านการกรองจากเครื่องกรอง FF2-1 และ FF2-2 มาตกตะกอนให้เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ใหม่โดยทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลาย NaOH 20% ในถังตกตะกอน TR3-1 ของผสมที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปกรองยังเครื่องกรอง FD3-1 เพื่อกรองแยกเอาตะกอนของ $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ และ $\text{Th}(\text{OH})_4$ ออกจากของผสมซึ่งจะถูกนำไปเข้ากระบวนการหน่วยที่ 15 ต่อไป ส่วนสารละลายที่แยกได้จากการล้างตะกอนจะนำกลับไปในถังตกตะกอน TR3-1 อีกครั้ง สำหรับสารละลายที่แยกได้จากเครื่องกรอง FD3-1 จะถูกส่งไปตกตะกอนให้เป็นตะกอนของสารประกอบซัลเฟตในถังปฏิกรณ์ TR3-3 และ TR3-4 โดยทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลาย BaCl_2 10 % โดยน้ำหนัก สารละลาย HCl และสารละลายกรด H_2SO_4 สารประกอบที่เกิดขึ้นคือแบเรียมซัลเฟต (BaSO_4) และสารละลาย CeCl_3 และ ReCl_3 จากนั้นจะนำของผสมที่ได้ไปกรองยังเครื่องกรอง FF3-1 เพื่อกรองเอาสารละลายไปใช้ยังหน่วยกระบวนการที่ 6 ต่อไป ส่วนตกค้างซึ่งเป็นตะกอนที่ได้จากเครื่องกรองจะถูกกำจัดต่อไป

2.4.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยตกตะกอนเบื้องต้นสามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนา เนื่องจากในกระบวนการนี้มีหน่วยอุปกรณ์ทั้งหมด 13 หน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้ได้ CEM ทั้งหมด 13 CEM ตามอุปกรณ์ที่มีข้างต้น จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบ Rank Deficiency ของเมตริกซ์ดังกล่าวเมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ "Non-local path" ของระบบนี้ จะพบ 3 Non-local path ดังนี้

F303 → F304 → Vr35, dr35

F329 → F330 → Vs33

F308 → F309 → VB32

จาก Non-local path ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการรวมของ CEM ของอุปกรณ์ดังข้างของผสมที่ 1 (TR3-5) กับ เครื่องกรองที่ 1 (FD3-1) ถังพักตะกอนตกที่ 1 (B3-2) กับเครื่องกรองที่ 2 (FD3-2) และถังพักสารละลายละลายที่ 5 (TS3-3) กับเครื่องกรองที่ 3 (FF3-1) ซึ่งจะทำให้จำนวนของ CEM ลดลงจาก 12 CEM เหลือเพียง 10 CEM หลังจากการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM ของทั้งหมดเพื่อสร้างเป็น Plant Wide CEM จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 32 ตัวแปรเหลือเพียง 27 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ในขั้นตอนการทำ "System pairing" จะทำการตัดตัวแปร F305, F313 ซึ่งเป็นสายของสารละลายที่ได้จากการกรองซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ในการปรับกระบวนการเพื่อควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องได้ เนื่องจากอัตราการไหลของสารละลายจากเครื่องกรองจะแปรผันตามอัตราการกรองและอัตราการป้อนของผสมเข้าเครื่องกรอง และจะทำการกำจัดตัวแปร F315, F316 เนื่องจากเป็น

ตัวแปรที่เป็นสายเดียวกับตัวแปร F314 นอกจากนี้จะกำจัดตัวแปร F330 ซึ่งเป็นอัตราการไหลของสารละลายที่ได้จากการกรองเนื่องจาก F330 ดังกล่าวจะแปรผันกับอัตราการไหลเข้า และได้กำจัดตัวแปร F214 ซึ่งเป็นอัตราการไหลของสารละลายจากถังพัก TS2-1 ซึ่งตัวแปรดังกล่าวได้ถูกใช้ให้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการให้หน่วยที่ 2 จึงไม่สามารถนำมาใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการได้ ส่วนตัวแปรที่ต้องการควบคุมจะทำการกำจัดตัวแปร r_{33} , r_{34} , r_{33} , r_{34} ซึ่งเป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับอัตราส่วนของการป้อนสารตั้งต้นและระยะเวลาของสารละลายที่อยู่ในถังเพื่อทำปฏิกิริยาเคมี ในถังปฏิกรณ์ TR3-3 และ TR3-4 เนื่องจากถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ดังกล่าวเป็นถังตกตะกอนชนิดเฟดโดยใช้สารละลาย $BaCl_2$ เพื่อกำจัดสารละลาย Na_3PO_4 และ $NaOH$ ที่อาจจะติดมาในสารละลาย และตกตะกอน H_2SO_4 ที่เหลือจากการใช้ในการกำจัดสิ่งเจือปนอื่น ๆ เพื่อให้สารละลายได้สารละลาย $ReCl_3$ และ $CeCl_4$ ที่ปราศจากสิ่งเจือปน เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจะเกิดได้อย่างรวดเร็ว เมื่อกำจัดตัวแปรที่ต้องการควบคุมบางตัวและตัวแปรปรับกระบวนการบางตัวออกแล้วจะได้ CEM ของทั้งกระบวนการ ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ "System pairing" จะได้รายละเอียดและรูปแบบดังต่อไปนี้

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F314	Pd31	Pd32	F301	Pt31	F512	F302	F303	F307	F308	F310	F306	F329	F331
Vs31	1													
Dd31		2												
Dd32			3											
Vs34				4										
Dd31					5									
r31			x			6								
Vr31			x			x		7						
r31			x			x		7						
Vr32							x		8					
Vr36										9	9			
Vr32											9	9		
Vr36										x	9		9	
Vs33														10 10

ภาพที่ 44 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 3

F315 F318 F515 F325 F327 F316 F319 F516 F326 F328

Vr33 11 11 11 11 11

Vr34

12 12 12 12 12

ภาพที่ 45 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 3

ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพที่ 44 และ 45 พบว่าใน Block 7 จะพบความบกพร่องเชิงโครงสร้างเนื่องจากมีตัวแปรที่ต้องการควบคุม 2 ตัวได้แก่ปริมาณสารละลายที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ที่ TR3-1 (Vr31) และระยะเวลาของสารในถังปฏิกรณ์ (tr31) เนื่องจากระบบถังปฏิกรณ์ดังกล่าวใช้ในการตกตะกอนแร่เอิร์ทให้ได้สารประกอบไฮดรอกไซด์ เนื่องจากในของผสมของแร่เอิร์ทดังกล่าวมีไอออนต่าง ๆ หลายชนิด ดังนั้นระบบนี้จะต้องควบคุมระยะเวลาของสารในการทำปฏิกิริยาเคมี (tr31) เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์และได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ในกรณี Block 9 จะมีรูปแบบที่เป็นไปได้ 4 รูปแบบในการควบคุม ปริมาณสารละลายในถังปฏิกรณ์ TR3-6 (Vr36), ปริมาณของแข็งเปียกในถังพัก B3-2 (VB32) และความหนาแน่นของสารละลายจากถังผสม TR3-5 (dr35) ก่อนนำไปกรองต่อไป โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F307, F308 F310 และ F306 ดังได้กล่าวแล้ว จากการสร้าง Relative Order Matrix ของ Block 9 ดังภาพที่ 46 พบว่ารูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมจะมี 2 รูปแบบการควบคุมได้แก่ รูปแบบการควบคุมที่ 2 และ 4 เนื่องจากมีคุณสมบัติตามกฎข้อที่ 1 และ 3 ของ Relative Order Matrix และเนื่องจากรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบดังกล่าวให้ Relative Order Matrix ที่มีลักษณะคล้ายกัน ในกรณีนี้จะพิจารณาเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ F307 ควบคุม Vr36 เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรงและให้ผลในการควบคุมได้รวดเร็ว (Guideline 5, 7) ใช้ F310 ควบคุม VB32 และใช้ F306 ควบคุม Vr35 เนื่องจากสาย F306 เป็นสายของน้ำจากแหล่งเก็บซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลได้ง่ายและให้ผลต่อระดับของของผสมในถัง TR3-5 ได้อย่างรวดเร็ว (Guideline 5, 7) ส่วนในกรณี Block 10 จะมีรูปแบบที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณของสารในถังพัก TS3-3 โดยใช้ F329 และ F331 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ เนื่องจาก F329 จะให้ผลในการควบคุมต่อปริมาณสารละลายในถังพัก TS3-3 (Vs33) ได้ช้ากว่าตัวแปร F331 ซึ่งเป็นสายออกของกระบวนการซึ่งจะให้ผลโดยตรงต่อปริมาณของสารละลายในถัง (Guideline 5) ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ F331 ควบคุม Vs33 สำหรับใน Block 11 จะมีตัวแปรปรับกระบวนการ 4 ตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมปริมาณของของผสมในถังปฏิกรณ์ TR3-3 (Vr33) ได้แก่ F315, F318, F515, F325 และ F327 จากตัวแปรปรับกระบวนการทั้งหมดจะเลือกใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F327 ควบคุมปริมาณของของผสมในถังปฏิกรณ์เนื่องจากส่งผลโดยตรงต่อปริมาณของของผสม (Guideline 5) และในกรณี Block 12 ซึ่งต้องควบคุมปริมาณของของผสมในถังปฏิกรณ์โดย

เลือกใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 4 ตัวแปรได้แก่ F318, F319, F516, F326 และ F328 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกตัวแปร F328 ความคุมปริมาณของของผสมในถังปฏิกรณ์ (Vr34) เนื่องจาก F328 จะส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อปริมาณของของผสม (Guideline 5) เช่นเดียวกับใน Block 11 สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการตกตะกอนเบื้องต้นจากการทำ "System pairing" จะมีรูปแบบการควบคุมถึง 200 รูปแบบ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้น จะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังตารางที่ 2

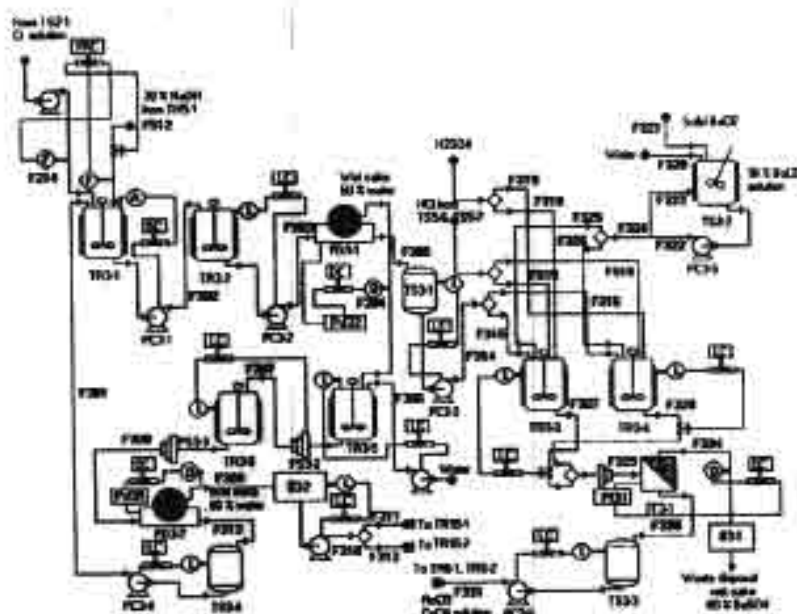
BLOCK 9			
	F307	F308	F310 F306
Vr36	x	x	
VB32		x	x
Vr35	x		x
Configuration number 1			
	F307	F308	F306
Vr36	1	1	
VB32		1	
Vr35	1		1
Configuration number 2			
	F307	F310	F306
Vr36	1		
VB32		1	
Vr35	1		1
Configuration number 3			
	F308	F310	F307
Vr36	1		1
VB32	1	1	
Vr35			1
Configuration number 4			
	F308	F310	F306
Vr36	1		
VB32	1	1	
Vr35			1

ภาพที่ 46 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 9

สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการตกตะกอนเบื้องต้นเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการจะได้รูปแบบของการควบคุมดังภาพที่ 47 ซึ่งกระบวนการนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 13 หน่วย และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมความหนาแน่น (DC) 3 ลูป การควบคุมอัตราส่วนการป้อนสารตั้งต้น (FRC) 1 ลูป การควบคุมระยะเวลา (SC) 1 ลูป และการควบคุมระดับสารละลาย (LC) 9 ลูป ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 14 ลูปการควบคุม

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการตกตะกอนเบื้องต้น

การ	คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ	
1	Vs31	F314	
2	Dd31	Pd31	
3	Dd32	Pd32	
4	Vs34	F301	
5	Df31	Pr31	
6	fr31	F512	
7	tr31	F302	
8	Vr32	F303	
9	Vr36	F308	
10	VB32	F310	
11	dr35	F306	
12	Vs33	F331	
13	Vr33	F327	
14	Vr34	F328	



ภาพที่ 47 แสดงกระบวนการตกตะกอนเบื้องต้นเมื่อใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ

ปฏิกรณ์ TJ4-4 อีกครั้ง จากนั้นจะกรองสารละลายผลึกที่ได้ให้ได้ตะกอนผลึกที่มีความชื้น 35 % ตะกอนที่ได้ซึ่งเป็นผลึกที่มีน้ำปนอยู่จะถูกนำไปอบแห้งในเครื่องอบแห้งเพื่อระเหยน้ำออก ซึ่งจะได้ผลึก โซเดียมไทรฟอสเฟตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ส่วนสารละลายที่แยกเอาผลึกออกแล้วจากเครื่องกรอง FC4-2 จะถูกป้อนกลับไปยังเครื่องต้มระเหย EC4-1 เพื่อทำการต้มระเหยซ้ำต่อไป

กระบวนการผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟตประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังทั้งหมด 13 หน่วยดังต่อไปนี้

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------------------|
| - เครื่องต้มระเหยที่ 1 (EC4-1) | - เครื่องต้มระเหยที่ 2 (EC4-2) |
| - ถังปฏิกรณ์ตกผลึกที่ 1 (TJ4-1-1) | - ถังปฏิกรณ์ตกผลึกที่ 2 (TJ4-1-2) |
| - ถังปฏิกรณ์ตกผลึกที่ 3 (TJ4-3-1) | - ถังปฏิกรณ์ตกผลึกที่ 4 (TJ4-3-2) |
| - เครื่องปั่นแยกผลึกที่ 1 (FC4-1) | - เครื่องปั่นแยกผลึกที่ 2 (FC4-2) |
| - ถังผสมสารละลาย (TJ4-2) | - เครื่องกรอง (FF4-1) |
| - ถังพักสารละลายที่ 1 (TS4-1) | - ถังพักสารละลายที่ 2 (TS4-2) |
| - เครื่องอบแห้ง (D4-1) | |

2.5.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟตสามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนาซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ เนื่องจากในหน่วยกระบวนการนี้มีหน่วยอุปกรณ์ทั้งหมด 13 หน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบควบคุมซึ่งจะทำให้ได้ CEM ทั้งหมด 13 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์ข้างต้น จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องของ Generic Rank เมื่อทำการวิเคราะห์ "Non-local path" ของระบบจะพบ 3 Non-local path ดังต่อไปนี้

F412 → F414 → TJ42, VJ42 และ dJ42

F417 → F418 → Vs41

F429 → F30 → Md7, Ta41

จาก Non-local path ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดการรวมกันของ CEM ของอุปกรณ์ถังผสม TJ4-2 กับเครื่องปั่นแยก FC4-1 ถังพักสารละลาย TS4-1 กับเครื่องกรอง FF4-1 และเครื่องปั่นแยก FC4-2 กับเครื่องอบแห้ง D4-1 ซึ่งจะทำให้จำนวน CEM ลดลงจาก 13 CEM เหลือเพียง 10 CEM หลังจากการเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM ของทั้งหมดเพื่อสร้างเป็น Plant Wide CEM เพื่อที่จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 33 เหลือเพียง 31 ตัวแปรเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" สำหรับในขั้นตอนการทำ "System pairing" ได้ทำการกำจัดตัวแปรปรับกระบวนการ F406 และ F407 เนื่องจากเป็นตัวแปรปรับกระบวนการที่

ภาพที่ 49 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 4

ผลที่ได้ในขั้นตอนการทำ "System pairing" พบว่าใน Block 11 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบโดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 2 ตัวได้แก่ F402 และ F404 เพื่อควบคุมความเข้มข้นของ Na_3PO_4 (Me17) ในสารละลายที่ผ่านการต้มระเหยแล้ว ในกรณีนี้เลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F404 (Guideline 5) เนื่องจากอัตราการไหลออกของสารละลายที่ผ่านการต้มระเหยแล้วจะให้ผลการควบคุมโดยตรงต่อความเข้มข้นของสารละลาย Na_3PO_4 ในกรณี Block 12 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ โดยอาศัยตัวแปรปรับกระบวนการ 2 ตัวแปรได้แก่ F419 และ F422 เพื่อควบคุมตัวแปรที่ต้องการควบคุม Me27 ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารละลาย Na_3PO_4 ในสารละลายที่ผ่านการต้มระเหยแล้ว ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมรูปที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F422 (Guideline 5) ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลายจากเครื่องต้มระเหยควบคุม Me27 เช่นเดียวกับ Block 11 ส่วนใน Block 14 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบ โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 2 ตัวแปรได้แก่ F412 และ Pd41 เพื่อใช้ในการควบคุมความหนาแน่นของผลึกของผสมที่ได้จากเครื่องปั่นแยก (Dc41) เนื่องจากความหนาแน่นของของผสมของผลึกที่ต้องการจากเครื่องปั่นแยกจะแปรผันความดันที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปั่นแยก ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบการควบคุมรูปแบบที่ 2 ซึ่งใช้ความดันภายในเครื่องปั่นแยก (Pd41) ควบคุมความหนาแน่นของผลึกในของผสมที่ต้องการโดยการปรับความเร็วของเครื่องปั่นแยก ส่วนใน Block 18 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 2 ตัวได้แก่ Fa41 และ F429 เพื่อควบคุมความเข้มข้นของผลึกหรือความเข้มข้นภายในผลึกที่เกิดขึ้น (Md7) ซึ่งในที่นี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยการใช้ Fa41 ซึ่งเป็นสายเข้าของลมร้อนเพื่อควบคุม Md7 (Guideline 5) ส่วนในกรณี Block 19 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ โดยกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ Pd42 เพื่อควบคุมความหนาแน่นของผลึกในของผสมจากเครื่องปั่นแยก (Dc42) เช่นเดียวกับ Block 14 และใน Block 20 และ Block 22 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบโดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 2 ตัวที่ใช้ในการควบคุมระดับของเหลวใน Separator (LE41, LE42) ได้แก่ความดันของไอน้ำที่ใช้ในการให้ความร้อน (Ps41, Ps43) และอัตราการไหลของน้ำเย็นเพื่อควบแน่นไอน้ำที่ได้จากการระเหย (Fw41, Fw43) เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากการทำ System pairing ดังข้างต้นพบว่าตัวแปร Fw41 และ Fw43 ซึ่งเป็นอัตราการไหลของน้ำเย็นจะมีผลในการควบคุมความดันในเครื่องต้มระเหย (PE41, PE43) (Guideline 5)

	F402	F404	F419	F422	F417	F412	Pd41	F415	Fa42	Fa41	F429	Pd42	Ps41	Fw41	Ps43	Fw42
Me17	11	11														
Me27			12	12												
Vs41			x		13											
Do41						14	14									
VJ42					x	15		x								
dJ42					x	x		16								
TJ42					x	x		x	17							
Md7										18	18					
Dc42											19	19				
LE41	x	x											20	20		
PE41	x	x											x	21		
LE42			x	x											22	22
PE41			x	x											x	23

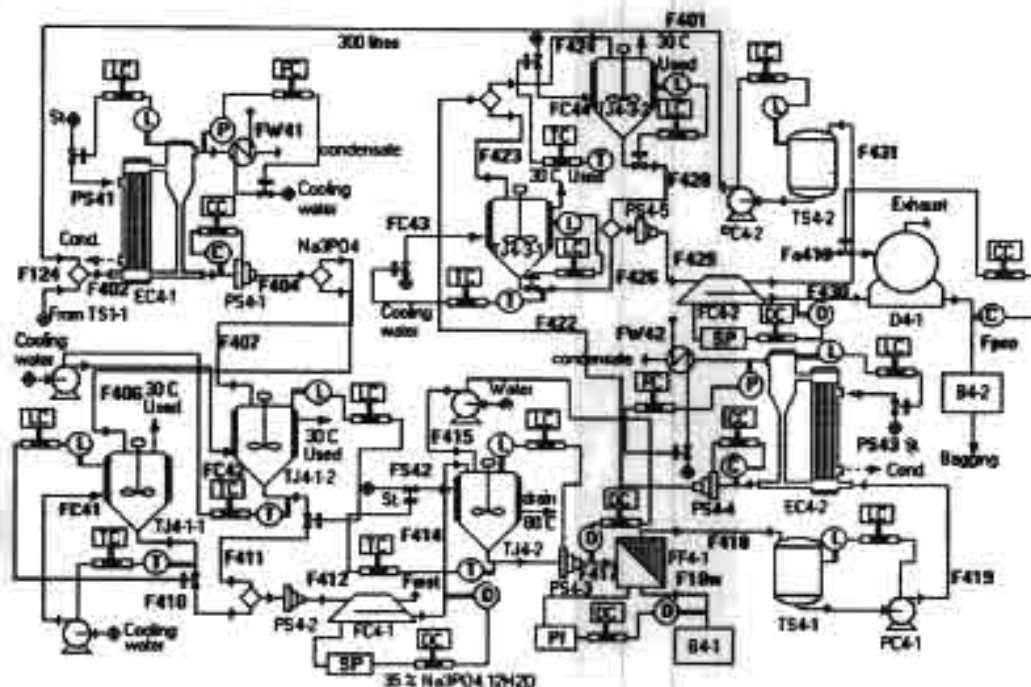
ภาพที่ 50 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 4(ต่อ)

ซึ่งจะมีผลทำให้ไม่สามารถใช้ตัวแปร Fw41 และ Fw43 เพื่อควบคุมตัวแปร LE41 และ LE42 ได้ ดังนั้นในกรณีนี้จะเหลือเพียงตัวแปร Ps41 และ Ps43 เพื่อควบคุมระดับของของเหลวภายใน Separator ซึ่งเป็นรูปแบบการควบคุมที่ 1 ซึ่งใช้ความดันของไอน้ำที่ใช้ในการให้ความร้อน ควบคุมระดับของของเหลวใน Separator สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟตจะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด 120 รูปแบบการควบคุม อย่างไรก็ตาม เมื่อใช้กรรมวิธีกรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้น จะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรกับกระบวนการ และตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังนี้

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟต

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	Vj42	F411
2	Df41	Pf41
3	Vj41	F410
4	Vj43	F426
5	Vj44	F428
6	Vs42	F401
7	Tj42	Fc42
8	Tj41	Fc41
9	TJ43	Fc43
10	Tj44	Fc44
11	Me17	F404
12	Me27	F422
13	Vs41	F417
14	Dc41	Pd41
15	VJ42	F412
16	DJ42	F415
17	TJ42	Fs42
18	Md7	Fa41
19	Dc42	Pd42
20	PE41	Fw41
21	LE41	Ps41
22	PE42	Fw42
23	LE42	Ps43

รูปแบบการควบคุมของกระบวนการผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟตเมื่อเลือก
รูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการจะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดัง
ภาพที่ 51 ดังนี้



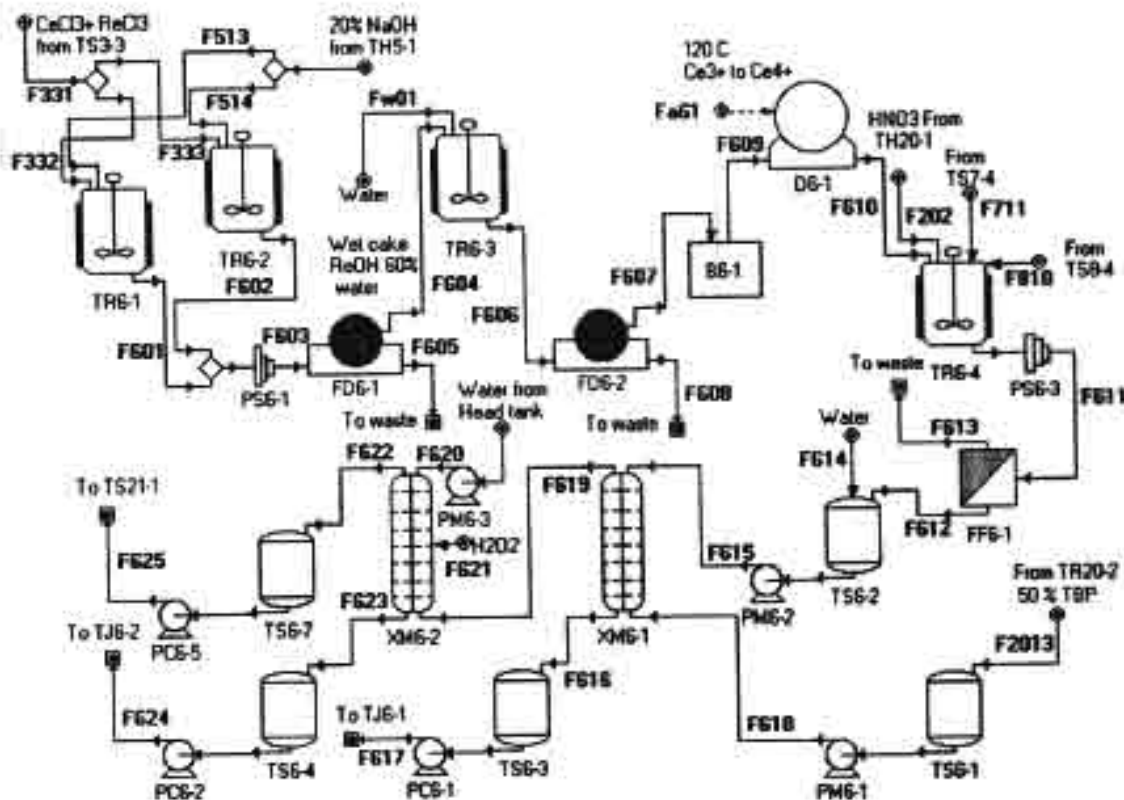
ภาพที่ 51 แสดงกระบวนการผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟตเมื่อใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ

ในกระบวนการย่อยแร่ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 13 หน่วย และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมความหนาแน่น (DC) 4 ลูป การควบคุมระดับ (LC) 9 ลูป การควบคุมอุณหภูมิ (TC) 5 ลูป การควบคุมความเข้มข้น (CC) 3 ลูป การควบคุมความดัน (PC) 2 ลูป ซึ่งมีจำนวนรวมทั้งสิ้น 23 ลูปการควบคุม

2.7 หน่วยผลิตซีเรียม (หน่วยที่ 6)

2.7.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

สำหรับรายละเอียดของกระบวนการผลิตซีเรียม สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 52 และ 53 ดังนี้

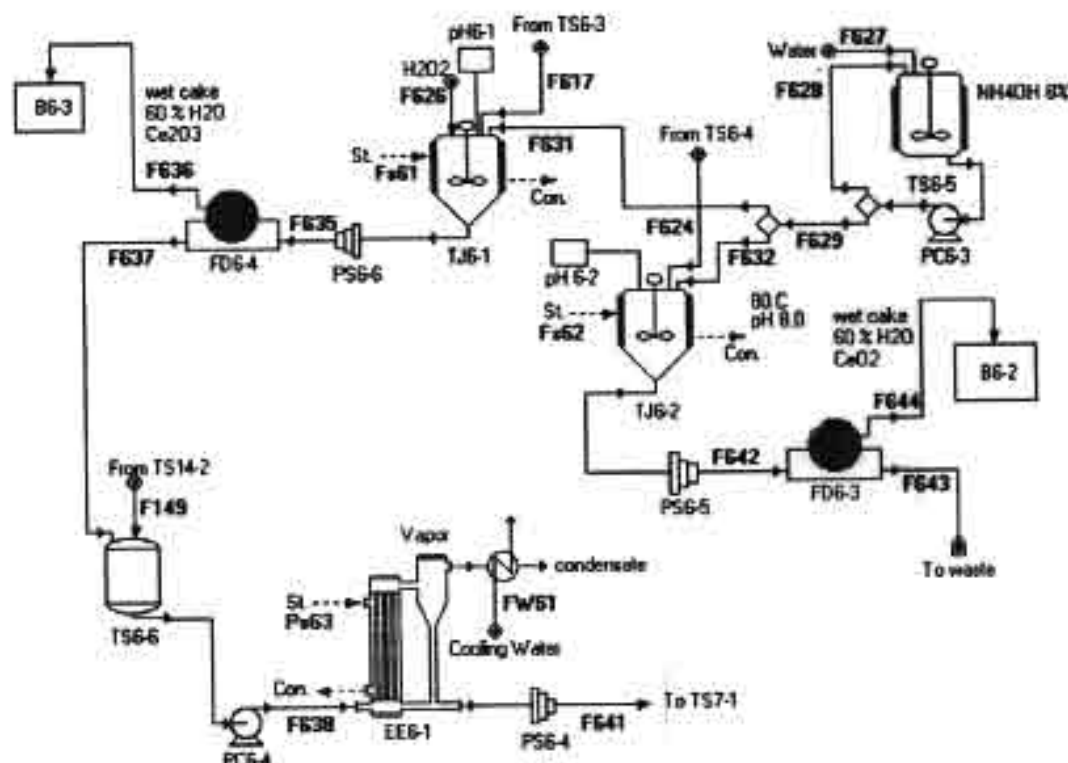


ภาพที่ 52 แสดงรายละเอียดกระบวนการผลิตซีเรียม (หน่วยที่ 6)

สำหรับกระบวนการผลิตซีเรียมประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

- ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (TR6-1) - ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (TR6-2) - เครื่องกรองที่ 1 (FD6-1)
- ถังผสมสารละลาย (TR6-3) - เครื่องกรองที่ 2 (FD6-2) - ถังเก็บเค้กเบี่ยง (B6-1)
- เครื่องอบแห้ง (D6-1) - ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (TR6-4) - เครื่องกรองสารละลาย (FF6-1)
- ถังผสมสารละลาย (TS6-2) - หอสกัดแยกที่ 1 (XM6-1) - หอสกัดแยกที่ 2 (XM6-2)
- ถังพักสารละลายที่ 1 (TS6-1) - ถังตกตะกอนที่ 1 (TJ6-1) - ถังพักสารละลายที่ 2 (TS6-3)
- ถังพักสารละลายที่ 3 (TS6-4) - เครื่องกรองที่ 3 (FD6-3) - ถังพักสารละลายที่ 4 (TS6-7)

- ถังตกตะกอนที่ 2(TJ6-2) -เครื่องกรองที่ 4(FD6-4) -ถังพักสารละลายที่ 5(TS6-6)
- เครื่องต้มระเหยที่ 1(EE6-1) -ถังเตรียมสารละลาย NH_4OH 8% (TS6-5)



ภาพที่ 53 แสดงรายละเอียดกระบวนการผลิตซีเรียม (หน่วยที่ 6) (ต่อ)

การทำงานของหน่วยกระบวนการนี้เป็นการผลิตซีเรียมจากสารละลาย RECl_3 และ CeCl_3 และ CeCl_4 จากหน่วยตกตะกอนหน่วยที่ 3 โดยนำสารละลายดังกล่าวมาตกตะกอนด้วยสารละลาย NaOH 20% โดยน้ำหนักต่อปริมาตรจากหน่วยสถานีกรด-ด่าง ในถังปฏิกรณ์ TR6-1 และ TR6-2 เพื่อเปลี่ยนสารประกอบคลอไรด์ให้เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ ซึ่งของผสมที่ได้จะได้สารประกอบไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นตะกอน จากนั้นนำของผสมกรองผ่านเครื่องกรอง FD6-1 เพื่อแยกตะกอนออกจากสารละลาย สารละลายซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการจะกำจัดทิ้งไป ส่วนที่เป็นเค้กที่ได้จากการกรองจะมีความชื้นประมาณ 60 % ซึ่งเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ของแร่ดังกล่าวข้างต้น จะถูกนำมาล้างให้สะอาดและเจือจางด้วยน้ำในถังผสมสารละลาย TR6-3 จากนั้นนำของผสมดังกล่าวมากรองผ่านเครื่องกรอง FD6-2 เพื่อแยกตะกอนของสารประกอบไฮดรอกไซด์อีกครั้ง ส่วนสารละลายซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ต้องการจะทำการกำจัดทิ้งไป จากนั้นจะนำตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ได้ในรูปเค้กเปียกที่มีความชื้นประมาณ 60 % ไปอบในเครื่องอบแห้ง D6-1 ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเพื่อเปลี่ยนตะกอน Ce_2O_3 (Ce^{3+}) ให้เป็นตะกอน CeO_2 (Ce^{4+}) ให้มากที่สุด ซึ่งจะได้ส่วนของตะกอนแห้งของซีเรียม จากนั้นนำกรด HNO_3 จากหน่วยที่ 7 และ 8 และ HNO_3 65 % ที่เตรียมได้จากถัง TH20-1 มาทำ

ปฏิกิริยากับตะกอนซีเรียมแห้งในถัง TR6-4 เพื่อเปลี่ยนตะกอนแห้งของซีเรียมให้เป็นสารประกอบไนเตรท จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวมากรองผ่านเครื่องกรองเพื่อแยกส่วนที่ไม่ละลายออก ซึ่งของแข็งที่ไม่ละลายจะถูกแยกออกเพื่อกำจัดทิ้งต่อไป ส่วนสารละลายที่ได้จากการกรองจะนำมาทำให้เจือจางด้วยน้ำในถัง TS6-2 จากนั้นนำสารละลายเจือจางที่ได้มาสกัดด้วยสารละลาย TBP 50 % ที่เตรียมจาก TR20-2 ในเครื่องสกัดแยก XM6-1 เพื่อสกัดแยกซีเรียมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 (Ce^{IV}) ออกจากแตรเอิร์ทและ Ce^{III} ซึ่งสารละลายที่ได้จะแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ถูกสกัดด้วยสารละลาย TBP ซึ่งจะมีซีเรียม เวเลนซ์อิเล็กตรอน +4 ในรูปของไนเตรท ซึ่งจะออกมาทางยอดของหอสกัด และส่วนที่ไม่ถูกสกัดด้วยสารละลาย TBP จะเป็นส่วนของแตรเอิร์ทและซีเรียมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน +3 ซึ่งเป็นส่วนที่ออกมาทางด้านล่างของหอ ส่วนของสารละลาย TBP ซึ่งมี Ce^{IV} ในรูปของไนเตรทจะนำมาแยกไอออน Ce^{IV} และไนเตรทไอออนออกจากกันโดยการสกัดด้วยน้ำในเครื่องสกัด XM6-2 ต่อไป ในขั้นตอนการสกัด Ce^{IV} ด้วยน้ำ จะมีการเติมสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เพื่อรักษาเสถียรภาพของ Ce^{IV} ซึ่งสายของน้ำที่ออกมาจากเครื่องสกัด XM6-2 ทางด้านล่างจะมีไอออน Ce^{IV} อยู่ ส่วนในสายของสารละลาย TBP ที่มีไนเตรทไอออนอยู่จะถูกนำไปปรับสภาพในหน่วยที่ 21 ต่อไป สายของน้ำที่มี Ce^{IV} ไอออนจะนำมาทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลาย NH_4OH ที่มีความเข้มข้น 8 % ในถัง TJ6-2 เพื่อเปลี่ยนซีเรียมไนเตรทให้เป็นซีเรียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นนำของผสมดังกล่าวมากรองแยกด้วยเครื่องกรอง FD6-3 เพื่อแยกเอาซีเรียมไฮดรอกไซด์ ($Ce(OH)_4$) ออก ซึ่งเค้กที่ได้จากเครื่องกรอง FD6-3 จะนำไปอบแห้งในเครื่องอบแห้งซึ่งจะได้ CeO_2 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป ส่วนไอออน Ce^{III} ที่ถูกแยกจากเครื่องสกัดในส่วนของชั้นน้ำจากเครื่องแยกสกัด XM6-1 จะนำมาตกตะกอนให้เป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ในถังตกตะกอน TJ6-1 กับสารละลาย H_2O_2 35 % และสารละลาย NH_4OH 8% ที่ pH 5.5 หลังจากนั้นต้องทำให้สารละลายมีอุณหภูมิสูงถึง 80 องศาเซลเซียสเพื่อให้ Ce^{III} ตกตะกอนในรูป Ce_2O_3 ซึ่งของผสมที่ได้จะมีตะกอน Ce_2O_3 เพียง 50 % โดยน้ำหนัก จากนั้นนำของผสมไปกรองแยกตะกอนในเครื่องกรอง FD6-4 เพื่อแยกตะกอน Ce_2O_3 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ออกมาซึ่งของแข็งที่ได้จะมีความชื้น 60 % ส่วนสารละลายที่เหลือจากการกรองจากเครื่องกรอง FD6-4 จะถูกนำมาระเหยน้ำออกที่เครื่องต้มระเหย EE6-1 เพื่อให้ได้แตรเอิร์ทไนเตรทที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นซึ่งสารละลายที่ได้นี้จะนำไปใช้ในหน่วยที่ 7 ต่อไป

2.7.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

กระบวนการผลิตซีเรียบสามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์ โดยใช้โปรแกรมดังกล่าว ซึ่งจะได้จำนวน CEM จำนวน 22 CEM ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องของ Generic Rank ของแต่ละ CEM เมื่อทำการวิเคราะห์ "Non-local path" ของ CEM ของกระบวนการ จะพบ Non-local path เกิดขึ้น 5 Non-local path ดังนี้

```

F603  → F604  → Vr63, Dr63
F606  → F607  → F609
F606  → F609  → M5, M6, M19, F610
F606  → F610  → Vr64, tr64, fr64
F611  → F612  → Vs62, Ds62

```

ผลของ Non-local path ที่เกิดขึ้นจะมีผลทำให้มีการรวมกันของ CEM ของดังปฏิกรณ์ที่ 3 (TR6-3) กับเครื่องกรองที่ 1 (FD6-1) ถึงปฏิกรณ์ที่ 4 (TR6-4) เครื่องอบแห้ง (D6-1) ถังเก็บเด็กเปียก (B6-1) และเครื่องกรองที่ 2 (FD6-2) ซึ่งจะมีผลทำให้จำนวน CEM ของกระบวนการลดลงจาก 22 CEM เหลือเพียง 17 CEM เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "Assembling" ต่อไป ซึ่งในขั้นตอน "Assembling" เพื่อสร้าง Plant's CEM ของกระบวนการใหญ่ จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 57 เหลือเพียง 46 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ต่อไป ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ได้ทำการกำจัดตัวแปรที่ต้องการควบคุม M6, M9, Ds62, Dr63, sj62 และ M24 ออกจากเมตริกซ์ของกระบวนการเนื่องจากเป็นตัวแปรควบคุมที่มีความสำคัญต่อระบบน้อย (Non critical control objectives) ซึ่งเมื่อกำจัดตัวแปรที่ต้องการควบคุมดังกล่าวแล้วเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" กับ Plant Wide CEM จะพบว่าเมื่อใช้กรรมวิธี "Diagonal partitioning" จะทำให้เกิด Block ที่มีตัวแปรปรับกระบวนการมากกว่าตัวแปรที่ต้องการควบคุม และเป็น Block ที่มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดรูปแบบการควบคุมจำนวนมากมาย ด้วยเหตุนี้จึงใช้กรรมวิธี "Reverse-diagonal partitioning" เพื่อกำจัดตัวแปรปรับกระบวนการและลดขนาดของ Block ให้มีขนาดเล็กลงรวมทั้งเป็นการลดรูปแบบการควบคุมให้น้อยลงด้วย ซึ่งผลของการใช้กรรมวิธี "Reverse-diagonal partitioning" จะทำให้ได้รูปแบบการจับคู่ดังภาพที่ 54, 55 และ 56 ดังนี้

	Pd81	Pd82	Pd81	F818	F815	F820	F819	F013	F816	F817	F513	F332	F801	F514	F333	F802	
Dd81	1																
Dd82		2															
Dd81			3														
M20L				4													
M20R					5												
Cd4L						6											
Cd4R							7										
Vd81				x					8								
Vd81				x	x			x		9							
Vd83										x	10						
Ir81												11	11				
Ir81												x	12	12			
Vd81												x	x	13			
Ir82															14	14	
Ir82														x	15	15	
Vd82															x	x	16

ภาพที่ 54 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 6

	F605	Fa61	F622	F625	F623	F624	Fw01	F603	F611	F614	F202	F711	F810
M5	17	17											
Va67			18	18									
Va82			x		19								
Va64					x	20							
Va63	x						21	21					
Va62			x						22	22			
664				x							23	23	23
664					x			x			x	24	x
Va64					x				x		x	x	25

ภาพที่ 55 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 6

	F635	Pj64	F642	Pj63	F632	Fa62	F635	F641	F631	F626	Fa61	F1409	F637	Pe63	Fw61
F636	26														
Da64		27													
F644			28												
Da63				29											
Vj62			x		30										
Tj62			x		x	31									
ME61							32	32							
Vj61				x					33	33					
sj61				x					x	34					
Tj61									x	x	35				
Va66							x					36	36		
LE61							x	x						37	37
PE61							x	x						x	38

ภาพที่ 56 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 6

ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพที่ 54, 55 และ 56 จะพบว่าใน Block 11 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบในการควบคุม r61 โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F513 และ F332 จากกรรมวิธีในการวิเคราะห์จะเลือกใช้รูปแบบที่ 2 ในการควบคุม ส่วนในกรณี Block 12 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบในการควบคุมตัวแปร r61 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F601 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลายจากถังปฏิกรณ์ TR6-1 เนื่องจากให้ผลในการควบคุมโดยตรงในการควบคุม (Guideline 5) ในกรณี Block 14 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบในการควบคุมอัตราการป้อนสารตั้งต้น (r62) โดยใช้ตัวแปร F514 และ F333 ซึ่งในที่นี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F333 ควบคุม r62 ในกรณี Block 15 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุม r62 โดยใช้ตัวแปร F333 และ F602 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F602 ควบคุม r62 (Guideline 5) ส่วน Block 17 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบในการควบคุมตัวแปร M5 ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการอบแห้ง โดยใช้ตัวแปร F606 และ Fa61 เนื่องจาก Fa61 จะเป็นตัวแปรที่ให้ผลในการควบคุมต่อ M5 ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบที่ 2 โดยใช้ Fa61 ควบคุม M5 (Guideline 5) Block 18 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบในการควบคุม Vs67 โดยใช้ตัวแปร F622 และ F625 เนื่องจาก F625 เป็นอัตราการไหลออกจากถังปฏิกรณ์ซึ่งจะให้ผลในการควบคุมโดยตรง และง่ายในการควบคุม (Guideline 5) ซึ่งในที่นี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 ในกรณี Block 21 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบเช่นเดียวกันในการควบคุม Vr63 โดยใช้ตัวแปร Fw01 และ F603 ในการควบคุม ซึ่งในกรณีของถังผสม TR6-3 จะใช้น้ำในการผสมเพื่อเพิ่มปริมาตร ดังนั้นจะใช้ตัวแปร Fw01 ควบคุม Vr63 เนื่องจากอัตราการป้อนน้ำเข้าถังผสมสามารถให้ผลการควบคุมโดยตรง และปรับได้ง่าย (Guideline 5) ส่วนในกรณี Block 22 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบในการควบคุม Vs62 โดยใช้ตัวแปร F611 และ F614 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบที่ 2 โดยใช้ F614 ควบคุม Vs62 เนื่องจากให้ผลในการควบคุมโดยตรงเช่นเดียวกับ Block 21 ส่วนในกรณี Block 23 จะมีรูปแบบการควบคุม 3 รูปแบบในการควบคุม r64 โดยใช้ตัวแปร F202 F711 และ F810 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปร F202 ควบคุม r64 ดังกล่าว ในกรณี Block 32 จะมีรูปแบบการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากการต้มระเหยจากเครื่องต้มระเหย EE6-1(ME61) โดยใช้ตัวแปร F638 และ F641 2 รูปแบบการควบคุม ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้อัตราการไหลออกของสารละลายจากเครื่องต้มระเหย EE6-1 (F641) ควบคุมความเข้มข้นดังกล่าว (Guideline 5) ในกรณี Block 32 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบในการควบคุม Vj61 โดยใช้ตัวแปร F631 และ F626 ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปร F631 ควบคุม Vj61 เนื่องจาก F631 เป็นสายเข้าของสารละลาย NH_4OH ซึ่งจะให้ผลควบคุมได้เร็วกว่าการใช้ตัวแปร F631 ควบคุมกระบวนการ (Guideline 5) ในกรณี Block 36 มีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบเช่นเดียวกันในการควบคุม Vs66 ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F637 และตัวแปร F1409 ใน

กรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปร F1409 ควบคุมปริมาณสารละลายในถังพักดักกล้าว (Vs66) เนื่องจากปรับอัตราการไหลได้ง่ายและให้ผลโดยตรงในการควบคุมต่อตัวแปร Vs66 และในกรณี Block 37 เป็นการควบคุมระดับสารละลายในเครื่องต้มระเหย (LE61) ซึ่งมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบโดยใช้ตัวแปร Ps63 และ Fw61 ในการควบคุม เนื่องจาก Ps63 จะมีผลต่อ LE61 มากกว่า Fw61 ดังนั้นในกรณีนี้จะเลือกใช้ตัวแปร Ps63 ในการควบคุม LE61 ดังกล่าว สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการผลิตซีเรียมจากการทำ "System pairing" จะมีรูปแบบการควบคุมมากกว่า 1000 รูปแบบการควบคุม อย่างไรก็ตามวิธีใช้กรรมวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวจะได้รูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการสกัดซีเรียม

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	Dd61	Pd61
2	Pd62	Pd62
3	Df61	Pf61
4	M20L	F618
5	M20R	F615
6	Ce4L	F620
7	Ce4R	F619
8	Vs61	F2013
9	Vx61	F616
10	Vs63	F617
11	fr61	F332
12	tr61	F601
13	Vr61	F513
14	fr62	F333
15	tr62	F602
16	Vr62	F514
17	M5	Fa61
18	Vs67	F625

ตารางที่ 4 (ต่อ)

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
19	Vx62	F623
20	Vs64	F624
21	Vr63	Fw01
22	Vs62	F614
23	lr64	F202
24	lr64	F711
25	Vr64	F810
26	F636	F635
27	Dd64	Pd64
28	F644	F642
29	Dd63	Pd63
30	Vj62	F632
31	Tj62	Fs62
32	ME61	F641
33	Vj61	F631
34	sj61	F626
35	Tj61	Fs61
36	Vs66	F1409
37	LE61	Ps63
38	PE61	Fw61

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการสกัดซีเรียมเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 57 และ 58 ซึ่งในกระบวนการสกัดซีเรียมนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 22 หน่วย และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมความหนาแน่น (DC) 5 ลูป การควบคุมอัตราการไหล (FC) 2 ลูป การควบคุมอัตราการป้อนของสารตั้งต้น (FRC) 3 ลูป การควบคุมระยะเวลา (SC) 4 ลูป การควบคุมความเข้มข้น (CC) 6 ลูป และการควบคุมความดัน (PC) 1 ลูป การควบคุมระดับ (LC) 15 ลูป การควบคุมรวมการควบคุมอุณหภูมิ (TC) 2 ลูป รวมทั้งหมด 38 ลูปการควบคุม

กระบวนการสกัดแยกแอรเอิร์ทเป็นกลุ่มเป็นหน่วยกระบวนการที่ใช้ในการแยกแอรเอิร์ทจากสารละลายที่แยกไอออนของแอรซีเรียมออกแล้วจากเครื่องต้มระเหย EE6-1 สารละลายที่เหลือดังกล่าวจะมีสารประกอบ La_2O_3 , Nd_2O_3 , Pr_6O_{11} , Y_2O_3 และ H-Re (Gd, Dy, Sm) ซึ่งเป็นแอรเอิร์ทละลายอยู่ ขั้นตอนกระบวนการนี้จะเริ่มจากการนำสารละลายดังกล่าวมาเข้าเครื่องสกัดแยก Nd, Heavy Group ในหอสกัดแยก XC7-1 โดยการสกัดแบบไหลสวนทางกับสารละลาย TBP 50 % ซึ่งจะได้สารละลายแยกเป็น 2 สาย ได้แก่สายของสารละลายที่ออกทางด้านบนซึ่งเป็นสารละลาย TBP 50 % ที่มีไอออน Nd และ Heavy Rare Earth ละลายอยู่ ส่วนสายที่ออกทางด้านล่างจะมี $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ และ $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ ละลายอยู่ซึ่งจะนำไประเหยนํ้าออกที่เครื่องต้มระเหย EE7-1 ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสและความดัน 310 มิลลิเมตรปรอทเพื่อให้สารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นต่อไป สารละลายที่ได้จากเครื่องต้มระเหย EE7-1 จะถูกแยกออกเป็น 2 สาย โดยสายที่ 1 จะถูกนำไปแยกสกัดในหอสกัด XC7-1 อีกครั้ง ส่วนอีกสายหนึ่งจะนำไปใช้ในหน่วยกระบวนการที่ 8 ต่อไป สารละลาย TBP ที่มีไอออน Nd, กลุ่มแอรเอิร์ทหนักผสมอยู่จากเครื่องสกัดแยก XC7-1 จะถูกนำมาล้างในหอล้างสารละลาย XC7-2 ด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 5 นอร์มอล (HNO_3) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกบางอย่าง จากนั้นจะนำสายของสารละลาย TBP ที่ผ่านการล้างแล้วมาเข้าหอสกัดแยก XC7-3 เพื่อสกัดแยกไอออนของ Nd และกลุ่มแอรเอิร์ทหนักที่อยู่ในสารละลาย TBP ซึ่งได้แก่ $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$, $\text{RE}(\text{NO}_3)_3$ ออกจากสารละลายดังกล่าวโดยใช้นํ้าเป็นตัวสกัดแยก ซึ่งสายของผลิตภัณฑ์ที่ได้จาก XC7-3 จะมี 2 สายคือสายของสารละลาย TBP ที่ถูกใช้แล้วซึ่งจะนำกลับไปใช้ใหม่หรือส่งต่อไปยังถังพัก TS8-3 ต่อไป และส่วนของนํ้าซึ่งมีสารละลาย $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3$, $\text{RE}(\text{NO}_3)_3$ ละลายอยู่ ซึ่งจะนำของผสมดังกล่าวนี้มาเข้าเครื่องต้มระเหย EE7-2 ที่ความดัน 310 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเพื่อให้สารละลายเข้มข้นขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกนำไปใช้ 2 ส่วน คือส่วนหนึ่งจะถูกนำไปใช้ในหน่วยกระบวนการที่ 9 (XC9-1) เพื่อแยกไอออนต่าง ๆ ที่มีอยู่ออกจากกันและอีกส่วนหนึ่งจะถูกป้อนกลับไปยังเครื่องสกัด XC7-1 เพื่อทำการสกัดซ้ำต่อไป

ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" พบว่าใน Block 7 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 2 ตัวได้แก่ F641 และ F701 เพื่อควบคุมปริมาณของสารละลายภายในถังผสม (Vs71) ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F701 เนื่องจากจะให้ผลโดยตรงต่อปริมาณสารละลายที่อยู่ในถังพักสารละลาย (Guideline 5) และเนื่องจากตัวแปร F641 จะใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการของเครื่องต้มระเหย EE6-1 ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้ตัวแปร F641 ได้ ในกรณี Block 8 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณของสารละลายในถังพักสารละลาย (Vs73) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 2 ตัวได้แก่ F729 และ F731 เพื่อควบคุมปริมาณของสารละลายดังกล่าว ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F731 ควบคุมปริมาณสารละลาย เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรงต่อระดับสารละลายในถังพักเช่นเดียวกับ Block 7 (Guideline 5) ส่วนใน Block 9 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ โดยใช้ตัวแปร F731 และ F734 เพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการต้มระเหยจากเครื่องต้มระเหย EE7-1 (ME71) ให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการ ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F734 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลายที่ผ่านการต้มระเหยเนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรงต่อความเข้มข้นของสารละลายที่ผ่านการต้มระเหย (Guideline 5)

2.8.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

กระบวนการสกัดแยกแะเอิร์ทเป็นกลุ่มดังกล่าวสามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนา เนื่องจากในหน่วยกระบวนการนี้มีหน่วยอุปกรณ์ทั้งหมด 13 หน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุมซึ่งจะทำให้ได้ CEM ทั้งหมด 13 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์ จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความของ Generic Rank ของ CEM ที่ได้ หลังจากการเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM ของทั้งหมดเพื่อสร้างเป็น Plant Wide CEM จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 44 เหลือเพียง 29 ตัวแปรเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ต่อไป ในขั้นตอนการทำ "System pairing" กับ Plant Wide CEM จะพบว่าเมื่อใช้กรรมวิธี "Diagonal partitioning" จะทำให้เกิด Block ที่มีตัวแปรปรับกระบวนการมากกว่าตัวแปรที่ต้องการควบคุม และเป็น Block ที่มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดรูปแบบการควบคุมจำนวนมากมาย ด้วยเหตุนี้จึงใช้กรรมวิธี "Reverse-diagonal partitioning" เพื่อกำจัดตัวแปรปรับกระบวนการและลดขนาดของ Block ให้มีขนาดเล็กลงรวมทั้งเป็นการลดรูปแบบการควบคุมให้น้อยลงด้วย ซึ่งผลของการใช้กรรมวิธี "Reverse-diagonal partitioning" จะทำให้ได้รูปแบบการจับคู่ดังภาพที่ 60 และ 61 ดังนี้

Cause-and-Effect matrix after reverse partitioning in to diagonal form

	F723	F730	F710	F707	F704	F709	F641	F701	F729	F731	F734	F702	F715
M30L	1												
M33L		2											
M33R			3										
M33W				4									
M33T					5								
Vx72	x	x		x		6							
Va71							7	7					
Va73								8	8				
ME71									9	9			
Va78											10	10	

ภาพที่ 60 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 7

และเนื่องจากตัวแปร F731 จะถูกใช้ในการควบคุมตัวแปร Vs73 แล้วทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ได้ และเนื่องจากตัวแปร F731 จะถูกใช้ในการควบคุมตัวแปร Vs73 แล้วทำให้ไม่สามารถนำมาใช้เป็นตัวแปรสำหรับควบคุม ME72 ได้ ในกรณีของ Block 10 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมเช่นกัน โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 2 ตัวได้แก่ F702 และ F715 เพื่อควบคุมปริมาณสารละลายในถังพักสารละลาย (Vs76) ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F715 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลายจากถังพักควบคุม Vs76 เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) ในกรณี Block 11 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายที่ได้จากเครื่องต้มระเหย EE7-2 (ME72) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F715 และ F718 ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ F718 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลายจากเครื่องต้มระเหยควบคุมความเข้มข้นของสารละลาย (ME72) เช่นเดียวกับ Block 9 เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) และตัวแปร F715 ไม่สามารถนำมาใช้ได้เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการเพื่อควบคุม Vs76 ในกรณี Block 13 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบเช่นเดียวกันโดยใช้ตัวแปร F1420 และตัวแปร F721 ควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก (Vs72) ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ F721 ซึ่งเป็นอัตราการไหลของสารละลาย TBP 50 % จากถังพักสารละลายควบคุมปริมาณสารละลายในถังพักซึ่งให้ผลโดยตรงต่อปริมาณในถังพัก (Vs72) ส่วนใน Block 14 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ เพื่อควบคุมความเข้มข้นของ $RE(NO_3)_3$ ในสายของสารละลายที่ผ่านการสกัดแล้ว (F729) เพื่อให้สารละลาย $RE(NO_3)_3$ ถูกสกัดไปอยู่ในชั้นของสารละลาย TBP (M30R) ให้หมด โดยใช้ตัวแปร F712 และ F726 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปร F726 ควบคุมความเข้มข้นของ $RE(NO_3)_3$ ในสายออกของสารละลายที่ผ่านการสกัดแล้ว (M30R) เนื่องจาก F726 เป็นสายป้อนกลับของสารละลายที่ได้จากการสกัดและผ่านการต้มระเหยแล้วเนื่องจากสามารถปรับอัตราการไหลเข้าให้ช้าลงหรือเร็วขึ้นเพื่อให้สัมผัสกับสารละลาย TBP ด้วยเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้ประสิทธิภาพการสกัดเกิดได้ดีขึ้น (Guideline 5) ส่วน Block 18 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบเช่นเดียวกันเพื่อควบคุมปริมาณน้ำในถังพัก (Vs75) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F705 และ F745 เพื่อควบคุมตัวแปร Vs75 ดังกล่าว ซึ่งในที่นี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าถังพัก (F705) ควบคุมปริมาณของน้ำในถังพักเนื่องจากต้องการรักษาตัวแปร F745 ไว้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการเพื่อควบคุมอุปกรณ์อื่นต่อไป และอัตราการไหลของน้ำออกจากถังพักดังกล่าวจะให้ผลต่อการควบคุมปริมาณของน้ำในถังพักได้โดยตรง (Guideline 5) ในกรณี Block 19 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมระดับของของเหลวภายใน Separator ของเครื่องต้มระเหย EE7-1 (LE71) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ Ps71 และ Fw71 ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมรูปแบบที่ 1 โดยการใช้ Ps71 ควบคุมระดับของของเหลวภายใน Separator (LE71) เนื่องจาก Ps71 จะให้ผลในการ

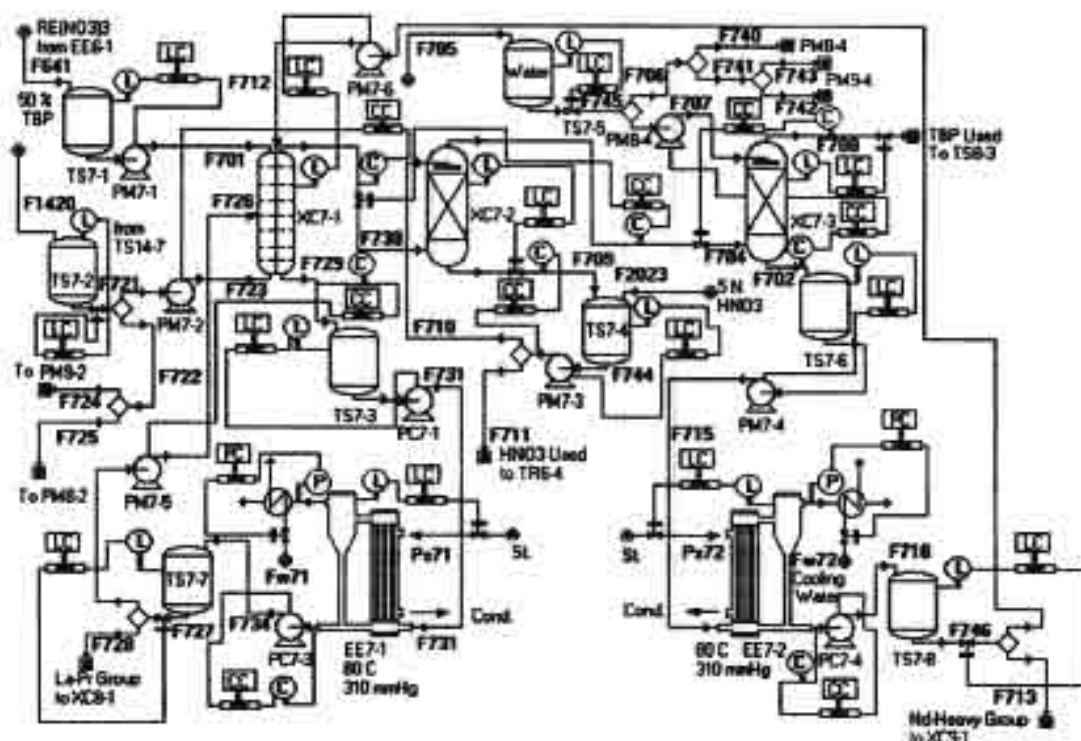
ควบคุมได้ดีกว่า Fw71 (Guideline 5) และนอกจากนี้ยังไม่สามารถใช้ Fw71 ควบคุม LE71 ได้ เนื่องจาก Fw71 จะถูกใช้ในการควบคุม PE71 ส่วนใน Block 21 จะมีรูปแบบในการควบคุม ปริมาณสารละลายที่อยู่ในถัง (Vs74) 2 รูปแบบการควบคุม โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F2023 และ F744 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยการใช้อัตราการไหลออก ของกรดในตริกผสมจากถังพักดังกล่าว เนื่องจากส่งผลในการควบคุมโดยตรงต่อปริมาณสารละลายในถัง (Guideline 5) และใน Block 22 ซึ่งมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบเพื่อควบคุม ระดับของเหลวภายใน Separator ของเครื่องต้มระเหย EE7-2 (LE72) โดยใช้ตัวแปร Ps72 และ Fw72 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการในการควบคุม ซึ่งในที่นี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยการใช้ Ps72 ควบคุม LE72 ในลักษณะเดียวกับ Block 19 ดังที่ได้กล่าวแล้ว เมื่อใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้น จะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังนี้

ตารางที่ 5 รายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการสกัดแยกแอมโมเนียเป็นกลุ่ม

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	M30L	F723
2	M33L	F730
3	M33R	F710
4	M33W	F707
5	M33T	F704
6	Vx72	F709
7	Vs71	F701
8	Vs73	F731
9	ME71	F734
10	Vs76	F715
11	ME72	F718
12	Vx73	F708
13	Vs72	F721
14	M30R	F726
15	Vx71	F712
16	Vs77	F727
17	Vs78	F746
18	Vs75	F745

19	LE71	Ps71
20	PE71	Fw71
21	Vs74	F744
22	LE72	Ps72
23	PE72	Fw72

รูปแบบการควบคุมของกระบวนการสกัดแยกแเออร์ทเป็นกลุ่มเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 62 ดังนี้



ภาพที่ 62 แสดงกระบวนการสกัดแเออร์ทเป็นกลุ่มเมื่อใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ

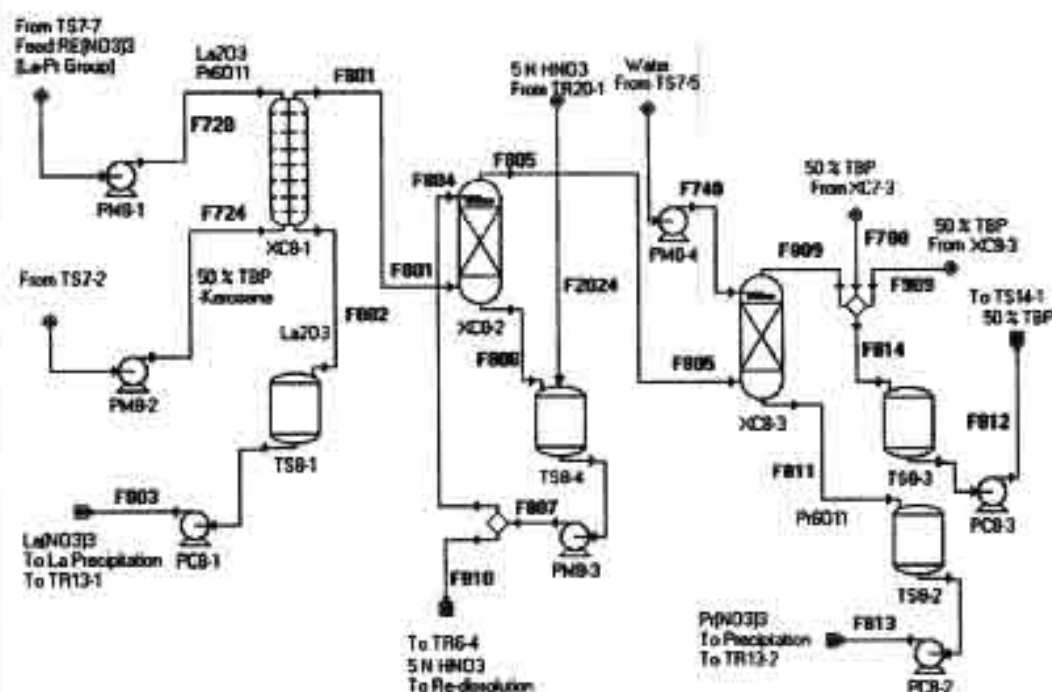
สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการสกัดแยกแเออร์ทเป็นกลุ่มเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมดังภาพที่ 62 ซึ่งในกระบวนการนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 13 หน่วย และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมระดับ

(LC) 13 ลูบ การควบคุมความเข้มข้น (CC) 8 ลูบ และการควบคุมความดัน (PC) 2 ลูบรวมทั้ง
หมด 23 ลูบการควบคุม

2.9 กระบวนการสกัดแยกแลนทานัมและพราซีโอดีเนียม (หน่วยที่ 8)

2.9.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

รายละเอียดของกระบวนการสกัดแยกแลนทานัมและพราซีโอดีเนียม
สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 63 ดังนี้



ภาพที่ 63 แสดงรายละเอียดกระบวนการสกัดแยกแลนทานัมและพราซีโอดีเนียม

กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ดังนี้

- หอสกัดแยกที่ 1 (XC8-1)
- หอล้างสารละลาย (XC8-2)
- หอสกัดแยกที่ 2 (XC8-3)
- ถังพักสารละลายที่ 1 (TS8-1)
- ถังพักสารละลายที่ 2 (TS8-4)
- ถังพักสารละลายที่ 3 (TS8-3)
- ถังพักสารละลายที่ 4 (TS8-4)

กระบวนการสกัดแยกแฉกแทนนัมและพราซีโอดีเนียมเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกไอออนของแฉกแทนนัมและไอออนของพราซีโอดีเนียมออกจากกัน การทำงานของกระบวนการนี้จะเริ่มจากการนำสารละลายผสมที่มี $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ และ $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ จากหน่วยที่ 7 เข้าหอสกัดแยกที่ 1 (XC8-1) เพื่อทำการแยกไอออนของ Pr และ La ออกจากกันโดยให้ไหลสวนทางกับสารละลาย TBP 50 % สารละลายที่ได้จากการสกัดจะแยกเป็น 2 สาย สายที่ออกทางด้านบนจะเป็นสายของสารละลาย TBP ที่มีไอออนของ Pr อยู่ในรูปของ $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ ส่วนอีกสายหนึ่งซึ่งออกมาทางด้านล่างเป็นสารละลายส่วนที่เหลือซึ่งจะมีไอออน La อยู่ในสารละลายในรูปของ $\text{La}(\text{NO}_3)_3$ ซึ่งสารละลายดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปทำการสกัดไอออนของ La ในถังปฏิกรณ์ TR13-1 ต่อไป สำหรับอัตราส่วนของสารละลาย ที่ใช้ในการสกัดจะใช้อัตราส่วนของสารอินทรีย์และสารละลายที่ต้องการสกัดในอัตราส่วน 0.8 : 1 ส่วนของสารละลาย TBP ที่มี $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ ละลายอยู่อาจจะมีการตกตะกอนด้วยจึงต้องนำมาล้างด้วยกรดไนตริก (HNO_3) 5 N ที่หอล้างสารละลาย XC8-2 โดยสารละลายกรดที่ใช้จะมาจากหน่วยที่ 20 สำหรับสารละลายกรดที่ใช้ล้างสารละลาย TBP แล้ว จะถูกแยกเป็น 2 สายเพื่อนำกลับไปยังหอล้างสารละลาย TBP ในหอล้างสารละลาย XC8-2 และส่งไปยังถังปฏิกรณ์ TR6-4 เพื่อละลายตะกอนต่อไป สารละลาย TBP ที่ออกมาทางด้านบนของหอล้าง XC8-2 แล้วจะถูกส่งไปสกัดแยกไอออนของ Pr ที่หอสกัด XC8-3 เพื่อแยกไอออน Pr ออกจากสารละลาย TBP โดยให้ไหลสวนทางกับน้ำ จากนั้นนำชั้นน้ำซึ่งมีไอออนของ Pr ในรูปของ $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3$ ละลายอยู่ไปเข้าหน่วยตะกอนแร่เอิร์ทในหน่วยที่ 13 ต่อไป ส่วนสารละลาย TBP ที่ถูกสกัดแยกไอออนของ Pr ออกแล้วซึ่งจะออกมาทางด้านบนของหอสกัดจะถูกส่งไปยังหน่วยปรับสภาพต่อไปเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ต่อไป

2.9.2 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการสกัดแยกแกลนทานัมและพราซิโอดีเนียมสามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนา เนื่องจากในกระบวนการนี้มีหน่วยอุปกรณ์ทั้งหมด 7 หน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้ได้ CEM ทั้งหมด 7 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์ข้างต้น จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนการทำ "Non-local path" ของระบบดังกล่าวจะไม่พบ "Non-local path" เกิดขึ้น หลังจากการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM ของทั้งหมดเพื่อสร้างเป็น Plant's CEM จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 21 ตัวแปรเหลือเพียง 16 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ในขั้นตอนการทำ "System pairing" จะได้รายละเอียดและรูปแบบดังต่อไปนี้

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F724	F728	F801	F804	F740	F805	F802	F803	F806	F814	F812	F811	F813	F809	F024	F807
MPv1	1															
MPv2		2														
MPv3			3													
MPv4				4												
MPv5					5											
MPv6						6										
Vs81	x	x	x				7									
Vs81							x	8								
Vs82		x	x		x				9							
Vs83										10	10					
Vs82											11	11				
Vs83				x	x						11		11			
Vs84			x					x						12	12	

ภาพที่ 64 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 8

ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพที่ 64 จะพบว่าใน Block 10 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบ ในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก TS8-3 (Vs83) โดยใช้ตัวแปร F814 และ F812 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะ

BLOCK 11		
F811 F813 F809		
Vs82	x	x
Vx83	x	x
Configuration number 1		
F811 F809		
Vs82	1	
Vx83	1	1
Configuration number 2		
F813 F811		
Vs82	1	1
Vx83	1	
Configuration number 3		
F813 F809		
Vs82	1	
Vx83		1

ภาพที่ 65 แสดงผลที่ได้จากการใช้ Relative Order Matrix ของ Block 11

เลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปร F814 ควบคุม Vs83 เนื่องจากต้องการรักษาตัวแปรปรับกระบวนการ F812 ไว้ใช้ในการควบคุมตัวแปรในหน่วยกระบวนการที่ 14 และตัวแปร F814 จะให้ผลในการควบคุมโดยตรงต่อ Vs83 เช่นเดียวกัน (Guideline 5) ส่วนในกรณี Block 11 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 3 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก TS8-2 (Vs82) และปริมาณของสารละลายที่อยู่ในหอสกัด XC8-3 (Vx83) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 3 ตัวแปรได้แก่ F811, F813 และ F809 จากการใช้ Relative Order Matrix กับ Block 11 ได้ผลของ Relative Order Matrix ดังแสดงในรูปที่ 65 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 3 เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อที่ 1 และ 3 ของ Relative Order Matrix โดยใช้ตัวแปร F813 ควบคุม Vs82 และใช้ตัวแปร F809 ควบคุม Vx83 ใน Block 12 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณของสารละลายในถังพัก TS8-4 (Vs84) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F2024 และ F807 ในกรณีนี้เลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F807 ควบคุมตัวแปร Vs84 เนื่องจากตัวแปร F807 ให้ผลในการควบคุมโดยตรงต่อตัวแปร Vs84 (Guideline 5) และให้ผลในการควบคุมได้เร็ว (Guideline 7) เนื่องจากตัวแปร F807 เป็นสายออกของสารละลายจากถังพักซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ง่ายกว่าสายเข้าถังพัก สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการสกัดแยกแอลกอฮอล์และพราซีโอติเนียมจะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด 12 รูปแบบการควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้น จะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องควบคุมที่เหมาะสมดังนี้

ตารางที่ 6 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการสกัดแยกแอลกอฮอล์และพราซิโอดีเนียม

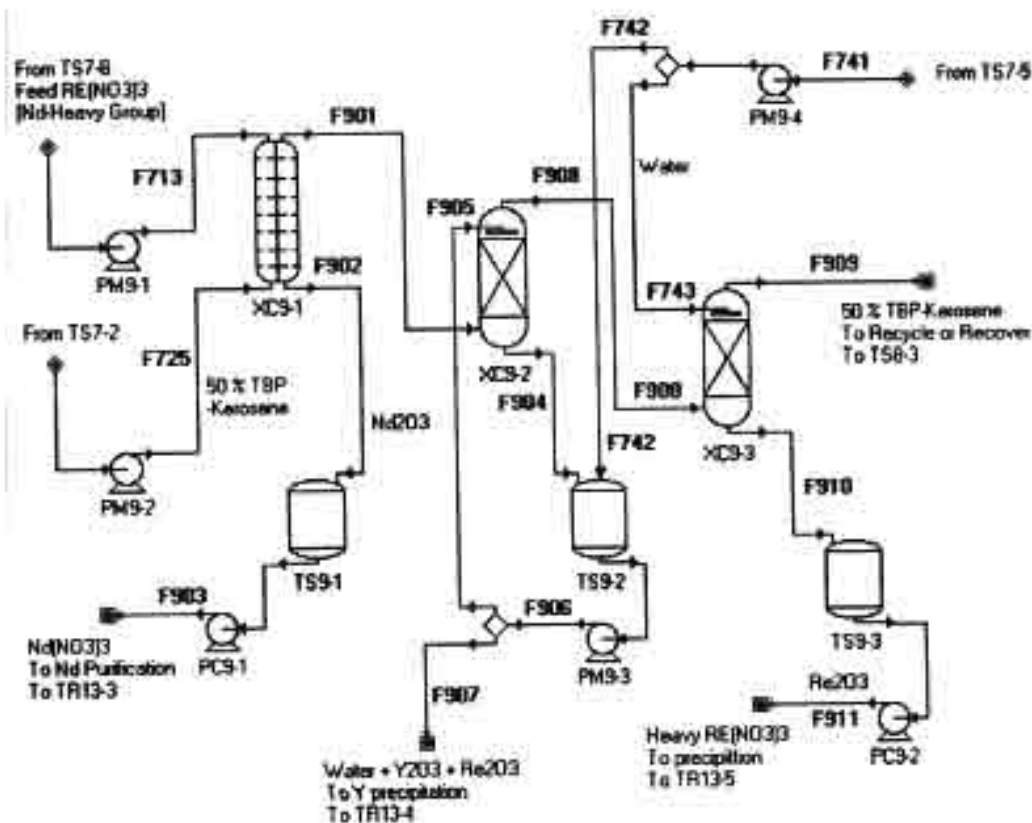
คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	MPr1	F724
2	MPr2	F728
3	MPr3	F801
4	MPr4	F804
5	MPr5	F740
6	MPr6	F805
7	Vx81	F802
8	Vs81	F803
9	Vx82	F806
10	Vs83	F814
11	Vs82	F813
12	Vx83	F809
13	Vs84	F807

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการสกัดแยกแอลกอฮอล์และพราซิโอดีเนียม เมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 66 ซึ่งในระบบดังกล่าวจะประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการ 7 หน่วย จากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วย การควบคุมระดับ (LC) 7 ลูป การควบคุมความเข้มข้น (CC) 6 ลูป ซึ่งรวมทั้งหมด 13 ลูปการควบคุม

2.10 กระบวนการสกัดนีโอติเนียมและแรเอิร์ทกลุ่มหนัก (หน่วยที่ 9)

2.10.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

สำหรับรายละเอียดกระบวนการสกัดนีโอติเนียมและแรเอิร์ทกลุ่มหนักสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 67 ดังนี้



ภาพที่ 67 แสดงรายละเอียดกระบวนการสกัดนีโอติเนียมและแรเอิร์ทกลุ่มหนัก

กระบวนการสกัดนีโอติเนียมและแรเอิร์ทกลุ่มหนักประกอบด้วยหน่วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- หอสกัดแยกที่ 1 (XC9-1)
- หอล้างสารละลาย (XC9-2)
- หอสกัดแยกที่ 2 (XC9-3)
- ถังพักสารละลายที่ 1 (TS9-1)
- ถังพักสารละลายที่ 2 (TS9-2)
- ถังพักสารละลายที่ 3 (TS9-3)

กระบวนการสกัดแยกนีโอติเนียมและแรเอิร์ทกลุ่มหนักเริ่มจากการนำสารละลายจากถังพักสารละลาย TS7-8 ซึ่งมีไอออนของ Nd และแรเอิร์ทหนักผสมกันซึ่งสารละลายดังกล่าวประกอบด้วย Nd(OH)₃ และ RE(NO₃)₃ ซึ่งคิดในรูปของ Nd₂O₃ และ RE₂O₃ โดย

RE_2O_3 จะประกอบด้วย Y_2O_3 , Sm_2O_3 , Gd_2O_3 และ Dy_2O_3 จะถูกนำมาสกัดแยกไอออนของ Nd ออกจากไอออนของแอรเอิร์ทกลุ่มหนักด้วยสารละลาย TBP 50 % โดยการป้อนเข้าทางด้านบนของเครื่องสกัดแยก XC9-1 ด้วยอัตราส่วนระหว่างสารละลาย TBP ต่อสารละลายที่ต้องการสกัดมีค่าเท่ากับ 2 : 1 แอรเอิร์ทหนักจะถูกสกัดเข้าไปอยู่ในชั้นของสารละลาย TBP ส่วน Nd_2O_3 ยังคงอยู่ในสารละลายที่ป้อนเข้าเครื่องสกัด จากนั้นจะสกัดแยกไอออน Y จากแอรเอิร์ทกลุ่มหนักด้วยน้ำโดยให้สารละลายชั้น TBP ไหลสวนทางกับน้ำในหอสกัดแยก XC9-2 ไอออนของ Y จะถูกสกัดแยกจากแอรเอิร์ทกลุ่มหนักมาอยู่ในชั้นน้ำและสายของสารละลาย TBP ที่มีแอรเอิร์ทปนอยู่ซึ่งผ่านการแยกสกัด Y จากหอสกัดแยก XC9-2 แล้ว จะถูกนำไปสกัดแยกแอรเอิร์ทที่เหลือในสารละลาย TBP โดยให้ไหลสวนทางกับน้ำในหอสกัดแยก XC9-3 จากนั้นไอออนของแอรเอิร์ทหนักจะถูกส่งไปตกตะกอนในหน่วยที่ 13 เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบคลอไรด์ของแอรเอิร์ทต่อไป

2.10.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการสกัดนีโอติเนียมและแอรเอิร์ทกลุ่มหนักสามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์ โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนา เนื่องจากในกระบวนการนี้มีหน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุมจำนวน 6 หน่วยอุปกรณ์ ดังนั้นจะทำให้ได้ CEM 6 CEM จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank รวมทั้งไม่พบ "Non-local path" เกิดขึ้น หลังจากทำ "Assembling" เพื่อสร้างเป็น Plant Wide CEM จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 19 เหลือเพียง 14 ตัวแปร ซึ่งจะเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ต่อไป ซึ่งจะได้รายละเอียดและรูปแบบดังภาพที่ 67

ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" นั้นพบว่าใน Block 10 มีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 3 รูปแบบเพื่อควบคุมปริมาณสารละลายในถังพักสารละลาย TS9-3 (Vs93) และปริมาณสารละลายที่อยู่ในหอสกัดแยก XC9-3 (Vx93) โดยใช้ตัวแปร F910, F911 และ F909 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ จากการใช้ Relative Order Matrix กับ Block 10 จะได้รูปแบบของ Relative Order Matrix ดังแสดงในภาพที่ 120 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 3 โดยใช้ตัวแปร F911 ควบคุม Vs93 และใช้ตัวแปร F909 ควบคุม Vx93 เนื่องจาก

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F725	F713	F901	F905	F743	F908	F902	F903	F904	F910	F911	F909	F742	F906
MREL	1													
MREB		2												
MRT			3											
MRW				4										
MREW					5									
MRET						6								
Vx91	x	x	x				7							
Vs91							x	8						
Vx92			x	x		x				9				
Vs93												10	10	
Vx93						x	x					10		10
Vs92										9				11 11

ภาพที่ 67 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 9

BLOCK 10

	F910	F911	F909
Vs93	x	x	
Vx93	x		x

Configuration number 1.

	F910	F909
Vs93	1	
Vx93	1	1

Configuration number 2.

	F911	F910
Vs93	1	1
Vx93		1

Configuration number 3.

	F911	F909
Vs93	1	
Vx93		1

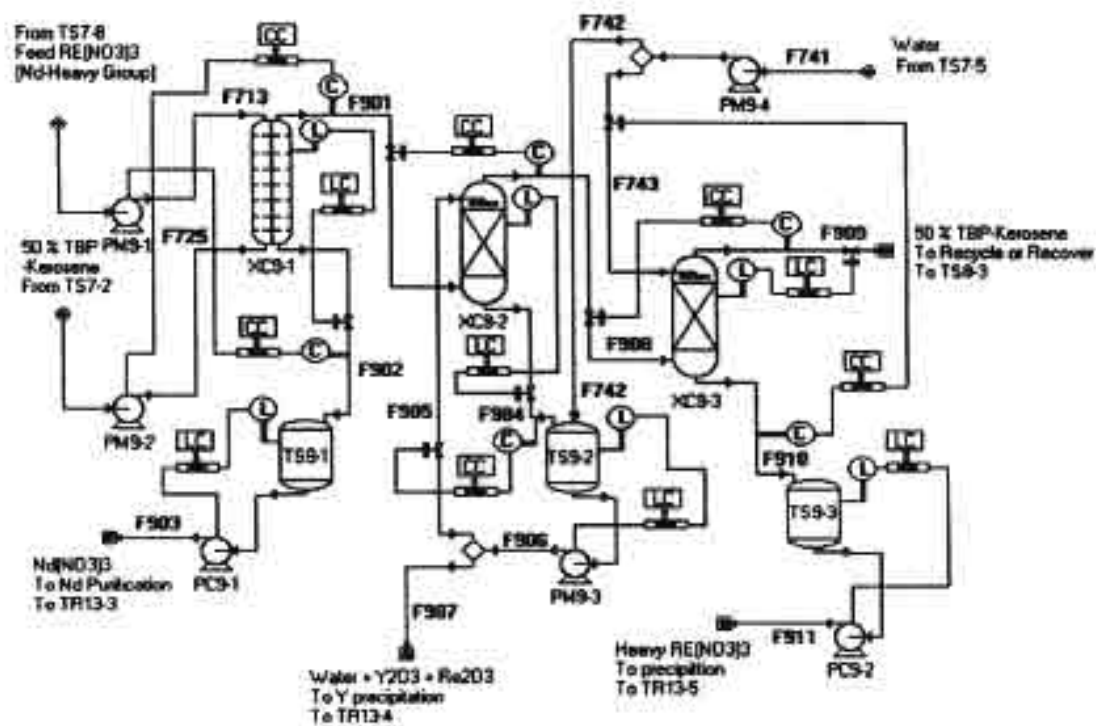
ภาพที่ 68 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 9

Relative Order Matrix ของรูปแบบการควบคุมที่ 3 จะมีคุณสมบัติเป็นไปตามกฎข้อ 1 และ 3 ซึ่งจะให้ผลในการควบคุมที่ดีกว่ารูปแบบการควบคุมอื่น ๆ ส่วนในกรณี Block 11 จะมีรูปแบบในการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายที่อยู่ในถังพักสารละลาย TS9-2 (Vs92) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F742 และ F906 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F906 ควบคุม Vs92 เนื่องจากให้ผลในการควบคุมโดยตรง (guideline 5) และให้ผลอย่างรวดเร็ว (guideline 7) สำหรับรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะเกิดขึ้น 6 รูปแบบการควบคุม เมื่อทำการวิเคราะห์โดยอาศัยหลักและวิธีข้างต้นจะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังตารางที่ 7 ดังนี้

ตารางที่ 7 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการสกัดนีโอติเนียมและแรเอิร์ทกลุ่มหนัก

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	MREL	F725
2	MRER	F713
3	MRT	F901
4	MRW	F905
5	MREW	F743
6	MRET	F908
7	Vx91	F902
8	Vs91	F903
9	Vx92	F904
10	Vs93	F909
11	Vx93	F910
12	Vs92	F906

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการดังกล่าวจะได้รูปแบบการควบคุมดังภาพที่ 62 ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีหน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง 6 หน่วยอุปกรณ์และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยการควบคุมระดับหรือปริมาณสารละลายและควบคุมความเข้มข้นของสาร อย่างละ 6 อุปกรณ์ควบคุม ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 12 อุปกรณ์

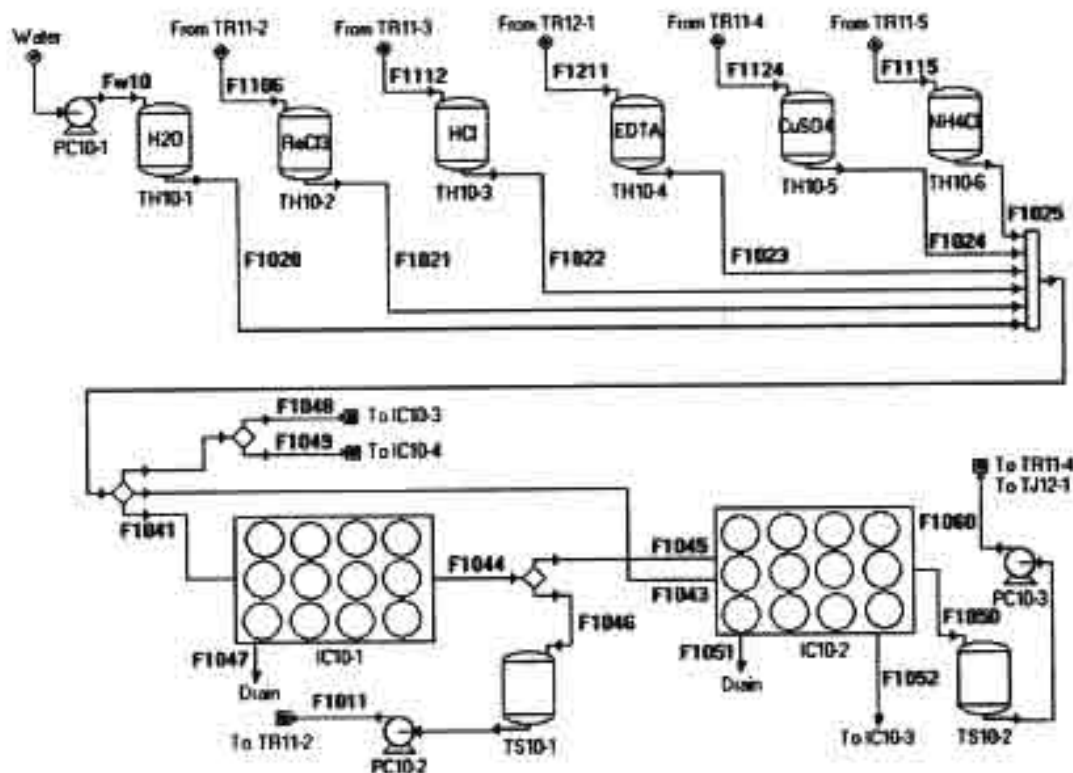


ภาพที่ 62 แสดงกระบวนการสกัดนีโอติเนียมและแรเอิร์ทกลุ่มหนักเมื่อใช้รูปแบบการควบคุม
กระบวนการ

2.11 กระบวนการแยกแอร์ไธด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออน (หน่วยที่ 10)

2.9.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

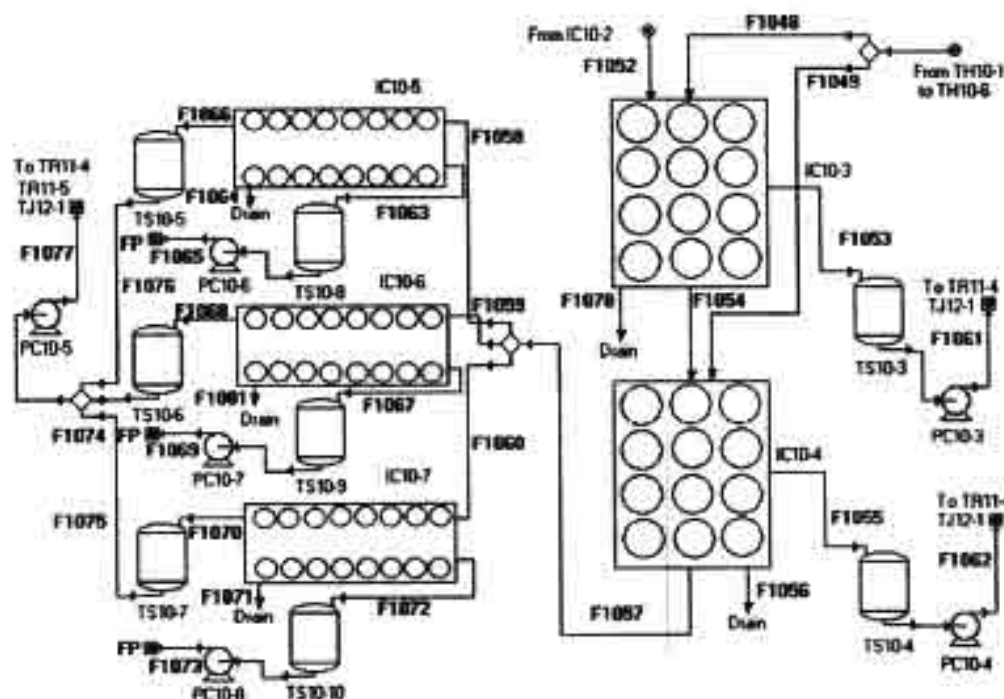
รายละเอียดของกระบวนการแยกแอร์ไธด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 63 และ 64 ดังนี้



ภาพที่ 63 แสดงรายละเอียดกระบวนการแยกแอร์ไธด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออน

สำหรับกระบวนการแยกแอร์ไธด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออนประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

- | | |
|--|-------------------------|
| - ถังพักที่ 1 (TH10-1) | - ถังพักที่ 2 (TH10-2) |
| - ถังพักที่ 3 (TH10-3) | - ถังพักที่ 4 (TH10-4) |
| - ถังพักที่ 5 (TH10-5) | - ถังพักที่ 6 (TH10-6) |
| - เครื่องแลกเปลี่ยนไอออนที่ 1 (IC10-1) | - ถังพักที่ 7 (TS10-1) |
| - เครื่องแลกเปลี่ยนไอออนที่ 2 (IC10-2) | - ถังพักที่ 8 (TS10-2) |
| - เครื่องแลกเปลี่ยนไอออนที่ 3 (IC10-3) | - ถังพักที่ 9 (TS10-3) |
| - เครื่องแลกเปลี่ยนไอออนที่ 4 (IC10-4) | - ถังพักที่ 10 (TS10-4) |



ภาพที่ 64 แสดงรายละเอียดกระบวนการแยกแอร์คิวต์ด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออน (ต่อ)

- เครื่องแลกเปลี่ยนไอออนที่ 5 (IC10-5) - ถังพักที่ 11 (TS10-5)
- เครื่องแลกเปลี่ยนไอออนที่ 6 (IC10-6) - ถังพักที่ 12 (TS10-6)
- เครื่องแลกเปลี่ยนไอออนที่ 7 (IC10-7) - ถังพักที่ 13 (TS10-7)
- ถังพักที่ 14 (TS10-8)
- ถังพักที่ 15 (TS10-9)
- ถังพักที่ 16 (TS10-10)

สารละลาย ReCl_3 จากหน่วยเตรียมสารละลายสำหรับระบบแลกเปลี่ยนไอออน (หน่วยที่ 11) จะถูกนำมาพักไว้บนถังพักที่ถัง TH10-2 เพื่อเตรียมผ่านสัหแลกเปลี่ยนไอออนที่บรรจุไว้ด้วยเรซินต่าง ๆ นอกจากนี้ยังต้องมีถังพักสำหรับน้ำสะอาดที่แยกไอออนแล้ว, สารละลายกรด HCl , สารละลาย CuSO_4 , สารละลาย NH_4Cl และสารละลาย EDTA โดยมีขั้นตอนการทำงานตามลำดับดังต่อไปนี้

เมื่อเตรียมเรซินในหอแลกเปลี่ยนไอออนต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว เริ่มผ่านน้ำที่กำจัดไอออนเข้าสู่หอ IC10-1 จนครบทุกหอ จากนั้นจึงผ่านกรด HCl เข้มข้น 4 % และล้างออกด้วยน้ำ แล้วจึงผ่านสารละลาย ReCl_3 ที่มีอยู่ลงไป ให้หมดภายใน 52 ชั่วโมง (ใช้หอเรซิน 3 สาย สายละ 4 หอ) เมื่อเรซินในหอ IC10-1 จับไอออน Re ไว้จนเต็มแล้ว จึงผ่านสารละลาย EDTA ลงไปเพื่อดึงเอา Re ไอออนจากเรซินแล้วจึงส่งต่อไปยังหอเรซิน IC10-2 ต่อไป โดยไอออนของ Re เข้าแทนที่ Cu ไอออน และ Cu ไอออนรวมกับ EDTA เป็น Cu-EDTA เก็บไว้ในถังเก็บสาร

ละลาย สารละลาย EDTA จะถูกปั๊มเข้าสู่หอเรซิน IC10-2 เพื่อดึง RE ไอออนออกจากเรซิน แล้วส่งไปยังหอเรซิน IC10-3 เพื่อให้ RE ไอออนแทนที่ Cu และสารละลาย Cu-EDTA จะถูกนำไปใช้ในหน่วยที่ 11 ในขณะที่เดียวกันก็จะทำการล้างเรซิน IC10-1 แล้วปล่อยสารละลาย ReCl_3 เข้าไปเพื่อให้เรซินจับไอออน RE ตามขั้นตอน น้ำ - HCl - น้ำ - ReCl_3 - น้ำ จากนั้นปล่อยสารละลาย EDTA เข้าสู่หอ IC10-4 เพื่อดึงเอา RE ไอออนออกมาแล้วส่งต่อไปยังหอ IC10-4 เพื่อให้ RE ไอออนถูกจับอยู่ในหอ IC10-4 ต่อไป ส่วน Cu-EDTA จะถูกส่งไปใช้ในหน่วยที่ 11 ในขณะที่เดียวกันก็ทำการล้างเรซินในหอ IC10-2 และส่งสารละลาย EDTA ไปสู่หอ IC10-4 เพื่อไล่อิออนของ RE ออก แล้วส่งผ่านไปยังหอ IC10-5, 6, 7 พร้อม ๆ กับ Cu ไอออนที่ได้จากหอ IC10-5, 6, 7 รวมกับสารละลาย EDTA กลายเป็นสารละลาย Cu-EDTA นำไปเก็บไว้ในถังเก็บเพื่อใช้ในหน่วยที่ 11 และ 12 ต่อไป ในขณะที่เดียวกันหอ IC10-3 ถูกล้างและเตรียมให้ Cu ไอออนจับอยู่บนเรซินตามขั้นตอน น้ำ - HCl - น้ำ - CuSO_4 - น้ำ ตามลำดับ สารละลาย EDTA ถูกส่งไปยังหอ IC10-5, 6, 7 เพื่อไล่อิออนของ RE จากหอแถวบนไปสู่หอแถวล่างเพื่อให้ฟอร์ม Complex กับ NH_4 ไอออนแล้วไหลออกไปสู่ถัง TS10-8, 9, 10 ถ้าไอออนของ Cu ติดตามด้วยก็จะถูกจับไว้ในห้องแถวล่าง ในขณะที่เดียวกัน ทำการล้างเรซินในหอ IC10-4 เพื่อเตรียมให้เป็น Cu -Resin ต่อไป โดยมีขั้นตอน น้ำ - HCl - น้ำ - CuSO_4 - น้ำ ตามลำดับ และทำการล้างและ Regenerate เรซินในหน่วย IC10-5, 6, 7 ทั้งแถวบนและแถวล่างพร้อม ๆ กัน โดยแถวบนทำการ Regenerate ด้วย CuSO_4 ส่วนแถวล่างล้างด้วย NH_4Cl

2.11.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการแยกแอร์ด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออนสามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์ได้ทั้งสิ้น 23 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในระบบควบคุม จากการวิเคราะห์ Generic Rank สำหรับแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนการทำ "Non-local path" ของระบบนี้ จะไม่พบ "Non-local path" เกิดขึ้น หลังจากขั้นตอนการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM ของทั้งหมดเพื่อสร้าง Plant Wide CEM จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 46 เหลือเพียง 40 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ซึ่งได้รายละเอียดดังภาพที่ 65, 66 และ 67 ดังนี้

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F1041	F1043	F1052	F1054	F1058	F1059	F1060	F1044	F1060	F1067	F1068	F1076
MC1	1											
Mc2		2										
Mc3			3									
Vc2		x	3									
Mc4				4								
Vc3			x	4								
Mc5					5							
Mc6						6						
Mc7							7					
Vc1		x						8				
Vc2							x		9			
Vc4				x						10		
Vc5					x						11	
Vc5										x		12

ภาพที่ 65 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 10

	F1068	F1074	F1070	F1075	Fw10	F1020	F1106	F1021	F1112	F1022	F1211	F1023	F1124	F1024
Vc6	13													
Vs6	x	14												
Vc7			15											
Vs7			x	16										
Vh1					17	17								
Vh2						18	18							
Vh3							19	19						
Vh4								20	20					
Vh6										21	21			

ภาพที่ 66 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 10 (ต่อ)

	F1115	F1025	F1046	F1011	F1053	F1061	F1055	F1062	F1063	F1065	F1067	F1068	F1072	F1073
Vh6	22	22												
Vs1			23	23										
Vs3				24	24									
Vs4					25	25								
Vs8						26	26							
Vs9							27	27						
Vs10									28	28				

ภาพที่ 67 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 10 (ต่อ)

ผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ดังภาพที่ 65, 66 และ 67 จะพบความบกพร่องเกิดขึ้นใน Block 3 เนื่องจากมีจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุมมากกว่าตัวแปรรับกระบวนการ ในกรณีนี้จะเลือกที่จะควบคุมตัวแปร Mc3 ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ (Guideline 4) และกำจัดตัวแปร Vc2 ซึ่งเป็นปริมาตรของสารละลายที่อยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนไอออน โดยใช้ตัวแปร F1052 ซึ่งเป็นอัตราการป้อนสารละลายเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนเครื่องที่ 3 และเป็นสายออกของสารละลายจากเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนเครื่องที่ 2 ใน

กรณี Block 4 จะมีความบกพร่องเชิงโครงสร้างเช่นเดียวกับใน Block ที่ 3 ในกรณีนี้จะเลือกที่จะควบคุม Mc4 ซึ่งเป็นความเข้มข้นของสารละลายที่ต้องการ (Guideline 4) และกำจัดตัวแปร Vc3 โดยใช้อัตราการป้อนสารละลายเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนที่ 4 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ในกรณี Block 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 และ Block 28 จะเป็นการควบคุมปริมาณสารละลายที่อยู่ในถังพักต่าง ๆ ซึ่งในแต่ละ Block จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถัง ๆ โดยใช้อัตราการไหลเข้าของสารละลายและอัตราการไหลออกของสารละลายแต่ละอุปกรณ์ดังกล่าวเป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบที่ 2 ของทุก Block เนื่องจากอัตราการไหลออกของสารละลายจะให้ผลการควบคุมโดยตรงกว่าอัตราการไหลเข้าของสารละลาย และให้ผลในการควบคุมระดับของสารละลายได้เร็วเนื่องจากปรับอัตราการไหลจากปั๊มได้โดยตรง (Guideline 5, 7) ซึ่งจากการพิจารณาดังกล่าวจะใช้ F1020 ควบคุม Vh1 ใช้ F1021 ควบคุม Vh2 ใช้ F1022 ควบคุม Vh3 ใช้ F1023 ควบคุม Vh4 ใช้ F1024 ควบคุม Vh5 ใช้ F1025 ควบคุม Vh6 ใช้ F1011 ควบคุม Vs1 ใช้ F1061 ควบคุม Vs3 ใช้ F1062 ควบคุม Vs4 ใช้ F1065 ควบคุม Vs8 ใช้ F1069 ควบคุม Vs9 และใช้ตัวแปร F1073 ควบคุม Vs10 ตามลำดับ สำหรับรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ

ตารางที่ 8 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการแยกแรมเอิร์ทด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออน

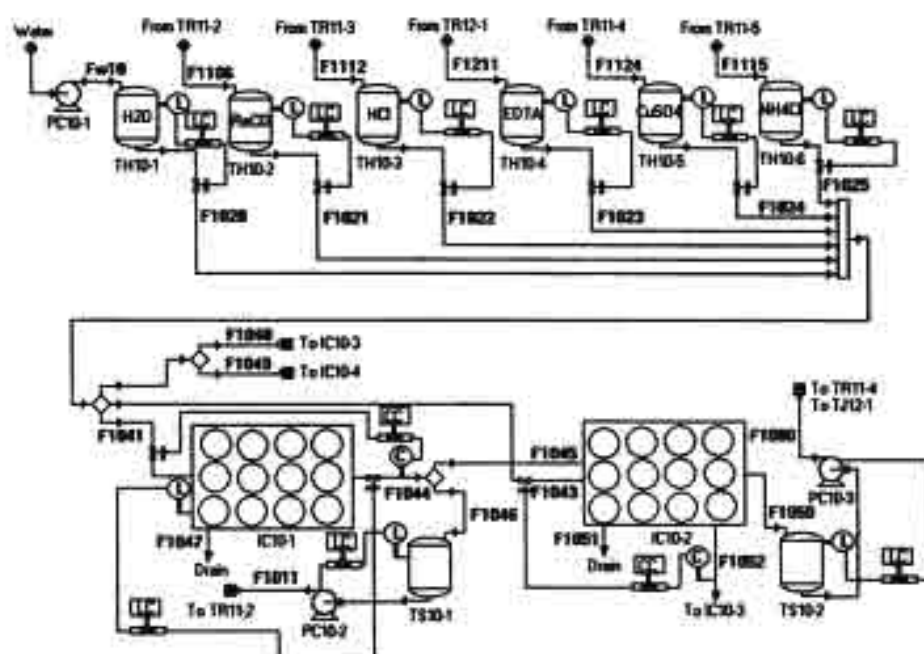
คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	Mc1	F1041
2	Mc2	F1043
3	Mc3	F1052
4	Mc4	F1054
5	Mc5	F1058
6	Mc6	F1059
7	Mc7	F1060
8	Vc1	F1044
9	Vs2	F1080
10	Vc4	F1057
11	Vc5	F1066
12	Vs5	F1076

ตารางที่ 8 (ต่อ)

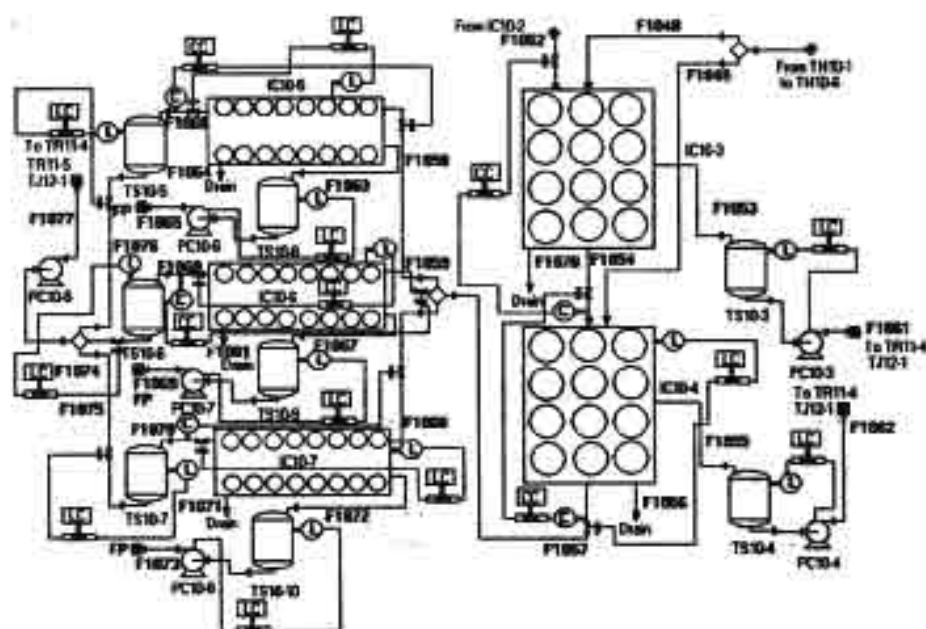
คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
13	Vc6	F1068
14	Vs6	F1074
15	Vc7	F1070
16	Vs7	F1075
17	Vh1	F1020
18	Vh2	F1021
19	Vh3	F1022
20	Vh4	F1023
21	Vh5	F1024
22	Vh6	F1025
23	Vs1	F1011
24	Vs3	F1061
25	Vs4	F1062
26	Vs8	F1065
27	Vs9	F1069
28	Vs10	F1073

กระบวนการนี้จะมีรูปแบบมากกว่า 1000 รูปแบบการควบคุม จากการใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ดังข้างต้นจะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังตารางที่ 7 ข้างต้น

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการแยกแอร์เอิร์ทด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออน เมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 68 และ 69 ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยการควบคุมระดับปริมาณสารละลาย (LC) 21 ลูบ และการควบคุมความเข้มข้น (CC) 7 ลูบ รวมทั้งหมด 28 ลูบการควบคุม



ภาพที่ 68 แสดงรายละเอียดกระบวนการแยกแอร์ทด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมกระบวนการ

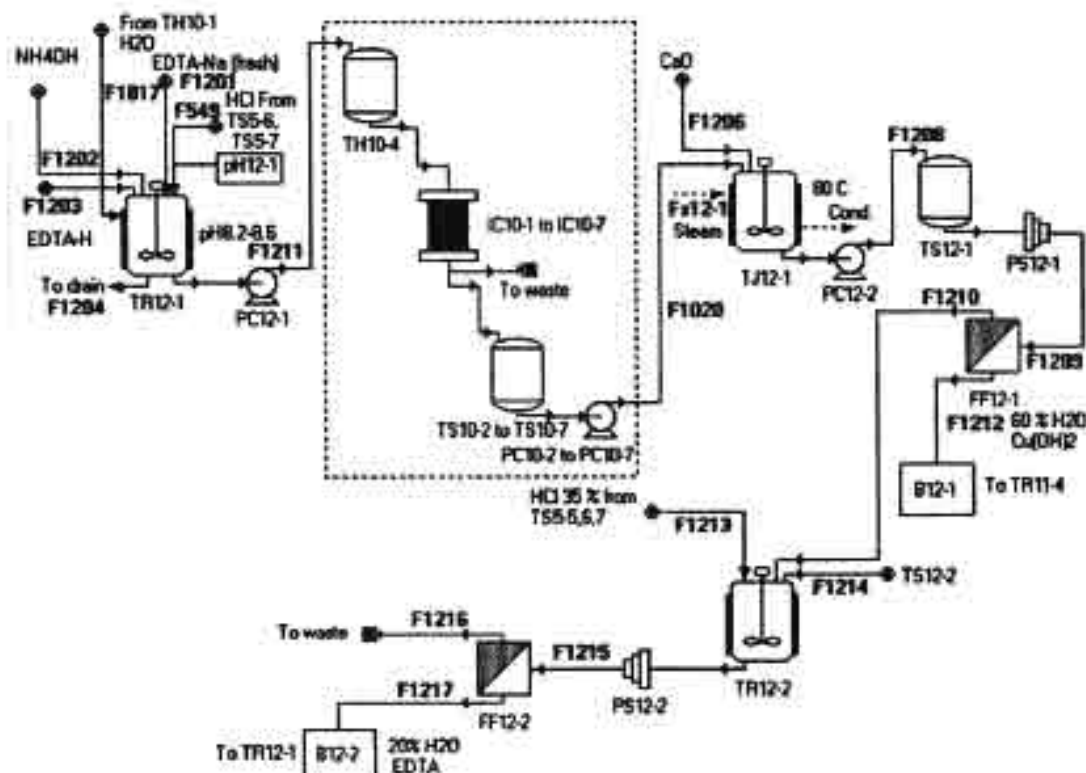


ภาพที่ 69 แสดงรายละเอียดกระบวนการแยกแอร์ทด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมกระบวนการ (ต่อ)

2.13 หน่วยคินสภาพสารละลายและตกตะกอนแอมโมเนียสำหรับระบบแลกเปลี่ยนไอออน (หน่วยที่ 12)

2.13.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

รายละเอียดของกระบวนการสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 70 และ 71 และดังนี้



ภาพที่ 70 แสดงรายละเอียดกระบวนการคินสภาพสารละลายและตกตะกอนแอมโมเนียสำหรับระบบแลกเปลี่ยนไอออน

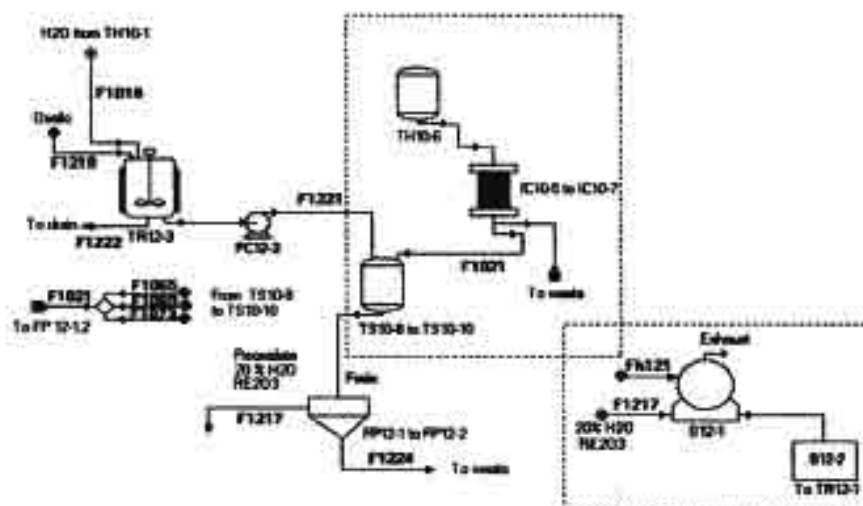
สำหรับกระบวนการดังกล่าวจะประกอบด้วยหน่วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

- ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (TR12-1)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (TJ12-1)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (TR12-2)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (TR12-3)
- ถังพักสารละลายที่ 1 (TS12-1)
- เครื่องกรองที่ 1 (FF12-1)
- เครื่องกรองที่ 2 (FF12-2)
- เครื่องกรอง FP12-1,2,3
- เครื่องอบแห้งที่ 1 (D12-1)

กระบวนการคืนสภาพสารละลายและตกตะกอนแร่เอิร์ทสำหรับระบบแลกเปลี่ยนไอออน เป็นกระบวนการที่ใช้เตรียมสารละลาย 0.015 M EDTA และปรับให้มีค่า pH ระหว่าง 8.2-8.6 ก่อนนำไปใช้งานในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนซึ่งจะนำไปใช้งานยังหน่วยที่ 10 ในขณะที่สารละลาย EDTA ที่ผ่านการนำไปใช้ในกระบวนการของการแลกเปลี่ยนไอออนแล้วจะได้สารละลาย Cu-EDTA ซึ่งต้องนำมาปรับสภาพตามสมการดังนี้



แล้วนำไปกรองยังเครื่องกรองเพื่อกรองเอาตะกอน Cu(OH)_2 ในสารละลายออกแล้วนำไปอบแห้งเพื่อนำไปใช้ในการเตรียมสารละลาย CuSO_4 ต่อไป ส่วนสารละลายอีกส่วนหนึ่งที่ผ่านจากเครื่องกรอง จะถูกนำมาผสมกับกรดไฮโดรคลอริก 35 % ซึ่งจะได้ Acid.EDTA (H.EDTA) ซึ่งเป็นตะกอน เมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้สารที่จะนำไปใช้ในการเตรียมสารละลาย EDTA ต่อไป



ภาพที่ 71 แสดงรายละเอียดกระบวนการคืนสภาพสารละลายและตกตะกอนแร่เอิร์ทสำหรับระบบแลกเปลี่ยนไอออน (ต่อ)

2.13.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการคืนสภาพสารละลาย และตกตะกอนแร่เอิร์ทสำหรับระบบ แลกเปลี่ยนไอออนสามารถสร้าง CEM ของแต่ละอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาเนื่องจากในกระบวนการนี้มีอุปกรณ์ 7 หน่วยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้ได้ CEM ทั้งหมด 7 CEM เนื่องจากหน่วยกระบวนการนี้ทำงานแยกกันซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการเป็นกระบวนการย่อย ๆ ทั้งหมดได้ 2 กระบวนการย่อย ดังนั้นในขั้นตอนการสร้างระบบควบคุม จะพิจารณาจากกระบวนการย่อย ๆ เหล่านั้นโดยใช้ขั้นตอนและกรรมวิธีเช่นเดียวกัน จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ของระบบดังกล่าวจะไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนการสร้างระบบควบคุมของกระบวนการซึ่งแบ่งได้เป็นกระบวนการย่อยดังนี้

1. หน่วยดังปฏิกรณ์ TJ12-1, TR12-2, ถังพัก TS12-1, เครื่องกรอง FF12-1 และเครื่องกรอง FF12-2
2. หน่วยอุปกรณ์เครื่องกรอง FP12-1, FP12-2, FP12-3 และเครื่องกรอง D12-1

เมื่อทำการวิเคราะห์ "Non-local path" ของ CEM ของแต่ละกระบวนการย่อยต่าง ๆ ทั้ง 2 กระบวนการจะไม่พบ "Non-local path" ของกระบวนการย่อยที่ 1 แต่จะพบ Non-local path เกิดขึ้น 1 Non-local path ในกระบวนการย่อยที่ 2 ดังนี้

$$F_{mix} \longrightarrow F_{1217} \longrightarrow M_{91}$$

จาก Non-local path ที่เกิดขึ้นจะทำให้มีการรวมกันของ CEM ของอุปกรณ์เครื่องกรอง (FP12-1) กับเครื่องอบแห้ง (D12-1) ซึ่งจะทำให้จำนวน CEM ของกระบวนการย่อยที่ 2 รวมกันเป็น 1 CEM เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "Assembling" ต่อไป ในขั้นตอนการทำ "Assembling" เพื่อสร้าง Plant Wide CEM ของแต่ละกระบวนการย่อย ซึ่งในกระบวนการย่อยที่ 1 จำนวนตัวแปรปรับปรับกระบวนการลดลงจาก 14 เหลือเพียง 11 ตัวแปร ส่วนในหน่วยอุปกรณ์ย่อยที่ 1 จำนวนตัวแปรจะลดลงจาก 4 เหลือเพียง 3 ตัวแปรเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ต่อไป ในขั้นตอนการทำ "System pairing" ของกระบวนการย่อยที่ 1 จะทำการกำจัดตัวแปร F1210 ซึ่งเป็นตัวแปรปรับกระบวนการออกเนื่องจากเป็นอัตราไหลของสารละลายจากเครื่องกรองซึ่งไม่สามารถนำมาใช้ในการปรับหรือควบคุมตัวแปรอื่น ๆ ได้เนื่องจากอัตราการไหลดังกล่าวจะแปรผันตามอัตราการป้อนของผสมเข้าเครื่องกรอง และจะกำจัดตัวแปร F1212, r_{j1} , r_{j2} , F1217 ออก ซึ่งจะได้รายละเอียดและรูปแบบดังภาพที่ 72 ดังต่อไปนี้

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	PR1	PR2	F1208	F1209	F1020	F1206	Fs1	F1213	F1214	F1215
DR1	1									
DR2		2								
Vs1			3	3						
Vj1			3		3	3				
uj1			3		3	3				
Tj1			3		3	3	3			
Vr2								4	4	4
tr2								4	4	4

ภาพที่ 72 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 12 (หน่วยกระบวนการย่อยที่ 1)

ผลที่ได้พบว่าใน Block 3 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 8 รูปแบบ ในการควบคุมตัวแปร Vs_1 , Vj_1 , uj_1 และ Tj_1 โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F1208, F1209, F1020, F1206 และ Fs1 เนื่องจากเมื่อใช้หลักของ Relative Order ในการพิจารณาเลือกรูปแบบการควบคุม แต่ละรูปแบบการควบคุมจะให้ค่า Relative Order ที่มีรูปแบบเดียวกัน เมื่อพิจารณาเลือกตัวแปรกระบวนการตามกรรมวิธีเช่นเดียวกับหน่วยกระบวนการอื่นจะพบว่ารูปแบบการควบคุมที่ 8 เป็นรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ ตัวแปร Fs1 ควบคุมอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ (Tj_1) ใช้ F208 ควบคุมระยะเวลาของการทำปฏิกิริยาเคมีภายในถังปฏิกรณ์ (uj_1) ใช้ตัวแปร F1020 ควบคุม Vj_1 และใช้ตัวแปร F1209 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลายในถังผสมควบคุมปริมาตรสารละลายในถัง (Vs_1) เนื่องจากทุกตัวแปรข้างต้นจะให้ผลในการควบคุมตัวแปรได้อย่างรวดเร็วและโดยตรง (Guideline 5, 7) ส่วนในกรณี Block 4 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 6 รูปแบบในการควบคุมตัวแปร Vr_2 และ tr_2 โดยใช้ตัวแปร F1213, F1214 และ F1215 ซึ่งในกรณีนี้จะต้องกำจัดตัวแปรปรับกระบวนการออก 1 ตัว ซึ่งในที่นี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F1213 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลายจากถังปฏิกรณ์ TR12-2 (F1213) และใช้ตัวแปร F1215 ควบคุม tr_2 ซึ่งเป็นระยะเวลาของสารที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากให้ผลในการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) เช่นเดียวกัน ซึ่งรูปแบบการควบคุมของหน่วยกระบวนการย่อยนี้จะให้รูปแบบการควบคุม 84 รูปแบบการควบคุม แต่จากการวิเคราะห์ด้วยกรรมวิธีข้างต้นจะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมดังตารางที่ 9 ดังนี้

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	Pp	Fh1	Fmix
Dp	1		
M91		2	2

ภาพที่ 74 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 12 (หน่วยกระบวนการย่อยที่ 2)

ในขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังกล่าวจะพบว่าใน Block 2 จะมีรูปแบบในการควบคุม 2 รูปแบบเพื่อควบคุมความเข้มข้นหรือความชื้นของ RE-Oxalate (M91) จากเครื่องอบแห้ง โดยใช้ตัวแปร Fh1 และ Fmix ในการควบคุม ซึ่งในที่นี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปร Fh1 ควบคุม M91 ดังกล่าว รูปแบบการควบคุมของกระบวนการย่อยที่ 2 นี้จะมี 2 รูปแบบการควบคุม เมื่อใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้นจะได้รูปแบบการจัดคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการคืนสภาพสารละลายและตกตะกอนแอมโมเนียสำหรับระบบแลกเปลี่ยนไอออน(หน่วยกระบวนการย่อยที่ 2)

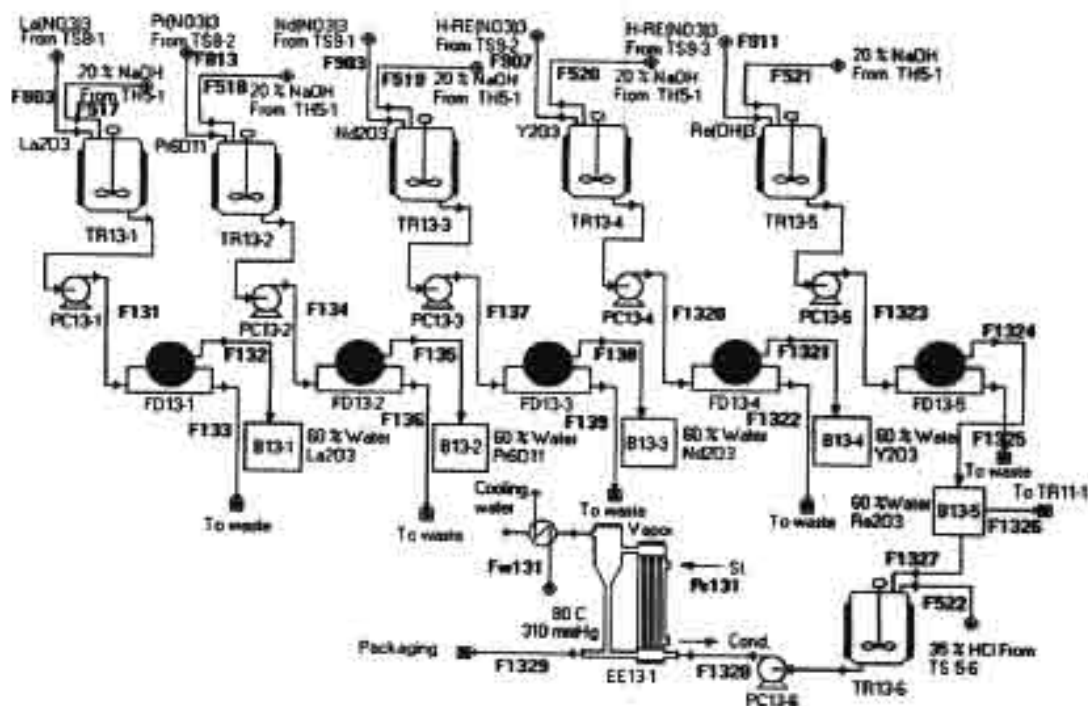
คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
การ		
1	Dp	Pp
2	M91	Fh1

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการย่อยที่ 2 เมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการจะได้รูปแบบการควบคุมดังภาพที่ 75 ดังนี้

2.14 กระบวนการตกตะกอนแอร์ท (หน่วยที่ 13)

2.14.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

รายละเอียดของกระบวนการตกตะกอนแอร์ทสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 76



ดังนี้

ภาพที่ 76 แสดงรายละเอียดกระบวนการตกตะกอนแอร์ท

กระบวนการตกตะกอนแอร์ทประกอบด้วยหน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ

ดังนี้

- | | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| - ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (TR13-1) | - เครื่องกรองตะกอนที่ 1 (FD13-1) |
| - ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (TR13-2) | - เครื่องกรองตะกอนที่ 2 (FD13-2) |
| - ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (TR13-3) | - เครื่องกรองตะกอนที่ 3 (FD13-3) |
| - ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (TR13-4) | - เครื่องกรองตะกอนที่ 4 (FD13-4) |
| - ถังปฏิกรณ์ที่ 5 (TR13-5) | - เครื่องกรองตะกอนที่ 5 (FD13-5) |
| - ถังพักตะกอนเปียกที่ 1 (B13-5) | - ถังปฏิกรณ์ที่ 6 (TR13-6) |

- เครื่องต้มระเหยที่ 1 (EE13-1)

กระบวนการตกตะกอนแร่เอิร์ทเป็นกระบวนการที่ใช้ในตกตะกอนไอออนของแร่เอิร์ทซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายในเตรตต่าง ๆ จากหน่วยอุปกรณ์ XC8-1, XC8-3, XC9-1 และ XC9-2 ให้เป็นตะกอนของสารประกอบไฮดรอกไซด์ โดยให้ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลาย NaOH ซึ่งมีความเข้มข้น 20 % โดยมีมวลต่อปริมาตรในถังปฏิกรณ์ TR13-1, TR13-2, TR13-3 และ TR13-4 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้หลังจากทำปฏิกิริยาเคมีแล้วจะได้สารประกอบไฮดรอกไซด์ของแร่เอิร์ทไอออนต่าง ๆ จากนั้นนำของผสมดังกล่าวไปผ่านเครื่องกรอง FD13-1, FD13-2, FD13-3 และ FD13-4 ตามลำดับเพื่อแยกตะกอนดังกล่าวออกจากของผสมซึ่งจะได้เค้กของสารประกอบ $\text{La}(\text{OH})_3$, $\text{Pr}(\text{OH})_3$, $\text{Nd}(\text{OH})_3$ และ $\text{Y}(\text{OH})_3$ ซึ่งมีความชื้นร้อยละ 60 และสารละลายของแร่เอิร์ทในรูปในเตรตไอออนอีกส่วนหนึ่งที่ได้จากเครื่องสกัด XC9-3 จะถูกป้อนเข้าสู่เครื่องตกตะกอนแร่เอิร์ทหนักเพื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลาย NaOH เข้มข้น 20% โดยมีมวลต่อปริมาตร ซึ่งจะได้ตะกอนของ $\text{RE}(\text{OH})_2$ จากนั้นนำของผสมดังกล่าวไปผ่านเครื่องกรองตะกอน FD13-5 เพื่อกรองตะกอนไฮดรอกไซด์ออกจากของผสม ซึ่งจะทำให้ได้เค้กที่มีความชื้นร้อยละ 60 เค้กที่ได้นี้จะถูกละลายตะกอนโดยทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในถังปฏิกรณ์ TR13-6 จากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะได้สารละลาย ReCl_3 และน้ำ จากนั้นทำสารละลายให้มีฤทธิ์เป็นกลางโดยเติมด่างอ่อนแล้วนำสารละลายดังกล่าวมาระเหยน้ำออก โดยใช้เครื่องระเหยสูญญากาศที่ความดัน 310 มิลลิเมตรปรอท อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์แร่เอิร์ทคลอไรด์ที่มีความชื้นร้อยละ 20 จากนั้นนำแร่เอิร์ทคลอไรด์ที่ได้ไปอบแห้งเพื่อให้ได้ RECl_3 แห่งต่อไป

2.14.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการตกตะกอนแร่เอิร์ทสามารถสร้าง CEM ของแต่ละอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากในกระบวนการนี้มีอุปกรณ์ 13 หน่วยที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้ได้ CEM ทั้งหมด 13 CEM เนื่องจากหน่วยกระบวนการนี้ทำงานแยกกันซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการเป็นกระบวนการย่อย ๆ ทั้งหมดได้ 5 กระบวนการย่อย ดังนั้นในขั้นตอนการสร้างระบบควบคุมจะพิจารณาจากกระบวนการย่อย ๆ เหล่านั้นโดยใช้ขั้นตอนและกรรมวิธีเช่นเดียวกัน จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ของระบบดังกล่าวจะไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนการสร้างระบบควบคุมของกระบวนการซึ่งแบ่งได้เป็นกระบวนการย่อยดังนี้

1. หน่วยอุปกรณ์ TR13-1 และเครื่องกรอง FD13-1
2. หน่วยอุปกรณ์ TR13-2 และเครื่องกรอง FD13-2
3. หน่วยอุปกรณ์ TR13-3 และเครื่องกรอง FD13-3
4. หน่วยอุปกรณ์ TR13-4 และเครื่องกรอง FD13-4

5. หน่วยอุปกรณ์ TR13-5, เครื่องกรอง FD13-5, ถังพักตะกอน B13-5, ถังปฏิกรณ์ TR13-6 และเครื่องต้มระเหย EE13-1

เมื่อทำการวิเคราะห์ "Non-local path" ของ CEM ของแต่ละกระบวนการย่อยต่าง ๆ ทั้ง 5 กระบวนการจะไม่พบ "Non-local path" ของกระบวนการย่อยที่ 1-4 แต่จะพบ Non-local path เกิดขึ้น 1 Non-local path ในกระบวนการย่อยที่ 5 ดังนี้

F1323 → F1324 → VB35

จาก Non-local path ที่เกิดขึ้นจะทำให้มีการรวมกันของ CEM ของอุปกรณ์ถังพักตะกอน (B13-5) กับเครื่องกรองที่ 5 (FD13-5) ซึ่งจะทำให้จำนวน CEM ของกระบวนการย่อยที่ 5 ลดลงจาก 5 CEM เหลือ 4 CEM เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "Assembling" ต่อไป ในขั้นตอนการทำ "Assembling" เพื่อสร้าง Plant Wide CEM ของแต่ละกระบวนการย่อย ซึ่งในกระบวนการย่อยที่ 1-4 จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการยังคงเท่าเดิมแต่ในกรณีกระบวนการย่อยที่ 5 จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 14 เหลือเพียง 11 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ต่อไป ในขั้นตอนการทำ "System pairing" จะได้รายละเอียดและรูปแบบดังภาพที่ 77 ต่อไปนี้

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F517	F131	P131
F131	1		
F132		2	
V131	x	2	
t131	x	2	
D131			3

ภาพที่ 77 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 13 (กระบวนการย่อยที่ 1)

ในขั้นตอนการทำ "System pairing" จะทำการตัดตัวแปร F803 ออกเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวจะใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการสำหรับถังพักสารละลาย TS8-1 ซึ่งเมื่อทำการตัดตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวแล้วจะได้ผลแสดงดังภาพที่ 138 ซึ่งจะพบว่าใน Block 2 จะพบ Rank Deficiency เกิดขึ้นเนื่องจากมีจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุมมากกว่าตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในที่นี้จะต้องเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุมเพียงตัวใดตัวหนึ่งจากจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุม F132, V131 และ t131 ตามลำดับโดยใช้ตัวแปร F131 เป็นตัวแปรปรับ

กระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกควบคุมตัวแปร t131 เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (Guideline 4) ซึ่งเมื่อทำการกำจัดตัวแปร F132 และ V131 ออกแล้วจะได้รูปแบบการควบคุมเพียง 1 รูปแบบการควบคุมซึ่งเป็นรูปแบบการควบคุมที่นำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการซึ่งรูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมแสดงได้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการตกตะกอนแร่เอิร์ท (หน่วยกระบวนการย่อยที่ 1)

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	f131	F517
2	D131	P131
3	t131	F131

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F518	F134	P132
f132	1		
F135		2	
V132	x	2	
t132	x	2	
D132			3

ภาพที่ 78 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 13 (กระบวนการย่อยที่ 2)

ขั้นตอนการทำ "System pairing" ของกระบวนการย่อยที่ 2 จะทำการตัดตัวแปร F813 ออกเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวจะใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการสำหรับถังพักสารละลาย TS8-2 ซึ่งเมื่อทำการตัดตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวแล้วจะได้ผลแสดงดังภาพที่ 139 ซึ่งใน Block 2 จะพบ Rank Deficiency เกิดขึ้นเนื่องจากมีจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุม

มากกว่าตัวแปรปรับกระบวนการเช่นเดียวกับกระบวนการย่อยที่ 1 ซึ่งในที่นี้จะต้องเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุมเพียงตัวใดตัวหนึ่งจากจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุม F135, V132 และ I132 ตามลำดับโดยใช้ตัวแปร F134 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกควบคุมตัวแปร I132 เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (Guideline 4) ซึ่งเมื่อทำการกำจัดตัวแปร F135 และ V132 ออกแล้วจะมีผลทำให้เกิดรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ของกระบวนการย่อย 1 รูปแบบการควบคุม ซึ่งรูปการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมแสดงได้ดังตารางที่ 12 ดังนี้

ตารางที่ 12 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการตกตะกอนแอร์โท (หน่วยกระบวนการย่อยที่ 2)

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	f133	F518
2	D132	P132
3	I132	F134

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F519	F137	P133
f133	1		
F138		2	
V133	x	2	
I133	x	2	
D133			3

ภาพที่ 79 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 13 (กระบวนการย่อยที่ 3)

การทำ "System pairing" ของกระบวนการย่อยที่ 3 จะทำการตัดตัวแปร F903 ออกเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวจะใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการสำหรับถังพักสารละลาย TS9-1 ซึ่งเมื่อทำการตัดตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวแล้วจะได้ผลแสดงดังภาพที่ 79 จากภาพพบ

ว่าใน Block 2 จะมี Rank Deficiency เกิดขึ้นเนื่องจากมีจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุมมากกว่าตัวแปรปรับกระบวนการเช่นเดียวกับกระบวนการย่อยที่ 2 ซึ่งในที่นี้จะต้องเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุมเพียงตัวใดตัวหนึ่งจากจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุม F138, V133 และ I133 ตามลำดับโดยใช้ตัวแปร F137 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกควบคุมตัวแปร I133 เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (Guideline 4) ซึ่งเมื่อทำการกำจัดตัวแปร F138 และ V133 ออกแล้วจะมีผลทำให้เกิดรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ของกระบวนการย่อย 1 รูปแบบการควบคุม ซึ่งรูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมแสดงได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการตกตะกอนแร่เอิร์ท (หน่วยกระบวนการย่อยที่ 3)

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	F133	F519
2	D133	P133
3	I133	F137

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F520	F1320	P134
F134	1		
F321		2	
V134	x	2	
I134	x	2	
D134			3

ภาพที่ 80 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 13 (กระบวนการย่อยที่ 4).

ขั้นตอนการทำ "System pairing" ของกระบวนการย่อยที่ 4 จะทำการตัดตัวแปร F907 ออกเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวจะใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการสำหรับถังพักสาร

ละลาย TS9-2 ซึ่งเมื่อทำการตัดตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวแล้วจะได้ผลแสดงดังภาพที่ 141 ใน Block 2 จะพบ Rank Deficiency เกิดขึ้นเนื่องจากมีจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุมมากกว่าตัวแปรปรับกระบวนการเช่นเดียวกับกระบวนการย่อยที่ 2 ซึ่งในที่นี้จะต้องเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุมเพียงตัวใดตัวหนึ่งจากจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุม F1321, V134 และ t134 ตามลำดับโดยใช้ตัวแปร F1320 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกควบคุมตัวแปร t134 เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (Guideline 4) ซึ่งเมื่อทำการกำจัดตัวแปร F1321 และ V134 ออกแล้วจะมีผลทำให้เกิดรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ของกระบวนการย่อย 1 รูปแบบการควบคุม ซึ่งรูปแบบการจัดระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมแสดงได้ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการตกตะกอนแร่เอิร์ท (หน่วยกระบวนการย่อยที่ 4)

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	f134	F520
2	D134	P134
3	t134	F1320

ขั้นตอนการทำ "System pairing" ของกระบวนการย่อยที่ 5 จะทำการตัดตัวแปร F911 ออกเนื่องจากตัวแปรดังกล่าวจะใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการสำหรับถังพักสารละลาย TS9-3 ซึ่งเมื่อทำการตัดตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวแล้วจะได้ผลแสดงดังภาพที่ 142 ใน กรณี Block 3 จะมี Rank Deficiency เกิดขึ้นเนื่องจากมีจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุมมากกว่าตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในที่นี้จะต้องเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุมเพียงตัวใดตัวหนึ่งจากจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุม V135, และ t135 ตามลำดับโดยใช้ตัวแปร F1323 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกควบคุมตัวแปร t135 เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (Guideline 4) และทำการกำจัดตัวแปร V135 ออก ในกรณี Block 4 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 4 รูปแบบการควบคุมในการควบคุมตัวแปร f136, VB35, V136 และ t136 โดยใช้ตัวแปร F1327, F522, F1326 และ F1328 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งจากการสร้าง Relative Order Matrix ของ Block 4 และ Block 6 ได้ Relative Order Matrix ดังแสดงดังภาพที่ 143 ซึ่งในกรณีนี้ไม่สามารถเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ Relative Order Matrix ได้เนื่องจากในแต่ละ Block จะให้รูปแบบ Relative Order Matrix ที่มี

ลักษณะเหมือนกัน ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้หลักการเลือกตามซึ่งในกรณี Block 4 จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ F1328 ควบคุม I136 ใช้ F1327 ควบคุม I136 เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) และใช้ F1326 ควบคุม VB35 เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) และจะใช้ตัวแปร F522 ควบคุม

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F521	P135	F1328	F1327	F522	F1326	F1328	F1329	Pe31	Fw31
I135	1									
D135		2								
V135	x		3							
I135	x		3							
I136				4	4					
VB35			x	4		4				
V136				4	4			4		
I136				4	4			4		
M47							x	5		
M8							x	5		
PE31							x	x	6	6
LE31							x	x	6	6

ภาพที่ 81 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 13 (กระบวนการย่อยที่ 5)

V136 เนื่องจากตัวแปร F522 เป็นสายของสารละลายกรด HCl จากถังพักซึ่งสามารถปรับอัตราไหลได้ง่ายกว่าการปรับอัตราการไหลของเด็กเปียก และนอกจากนี้ตัวแปร F1328 ดังกล่าวถูกใช้ในการควบคุม I136 จึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ ในกรณีของ Block 5 จะพบ Rank Deficiency เกิดขึ้นเนื่องจากจำนวนตัวแปรที่ต้องการควบคุมมีมากกว่าตัวแปรปรับกระบวนการซึ่งจะต้องเลือกตัวแปรที่ต้องการควบคุมเพียงตัวใดตัวหนึ่งจากตัวแปรที่ต้องการควบคุม M47 และ M8 เนื่องจากในกรณีนี้เป็นการระเหยนํ้าออกจากสารละลายเพื่อควบคุมความเข้มข้นของสารละลาย $RECl_3$ ให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอบแห้งและบรรจุตั้ง

นั้นจึงทำการกำจัดตัวแปร M8 (Guideline 4) และในกรณีของ Block 6 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุม PE31 และ LE31 โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ Ps31 และ Fw31 ซึ่งในที่นี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ Fw31 ควบคุมความดันภายในเครื่องต้มระเหยเนื่องจากให้ผลโดยตรงต่อความดันในเครื่องต้มระเหย (Guideline 5) สำหรับรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมดของกระบวนการย่อยที่ 5 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด 8 รูปแบบการควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้น จะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังตารางที่ 15 ดังนี้

BLOCK 4

F1327 F522 F1326 F1328

F136	x	x		
VB35	x		x	
V136	x	x		x
I136	x	x		x

Configuration number 1.

F1327 F1326 F522 F1328

F136	1		1	
VB35	1	1		
V136	1		1	1
I136	1		1	1

Configuration number 2.

F1327 F1326 F326 F522

F136	1		1	
VB35	1	1		
V136	1		1	1
I136	1		1	1

Configuration number 3.

F522 F1326 F1327 F1328

F136	1		1	
VB35		1	1	
V136	1		1	1
I136	1		1	1

Configuration number 4.

F522 F1326 F1328 F1327

F136	1		1	
VB35		1		1
V136	1		1	1
I136	1		1	1

BLOCK 6

Ps31 Fw31

PE31	x	x
LE31	x	x

Configuration number 1.

Ps31 Fw31

PE31	1	1
LE31	1	1

Configuration number 2.

Fw31 Ps31

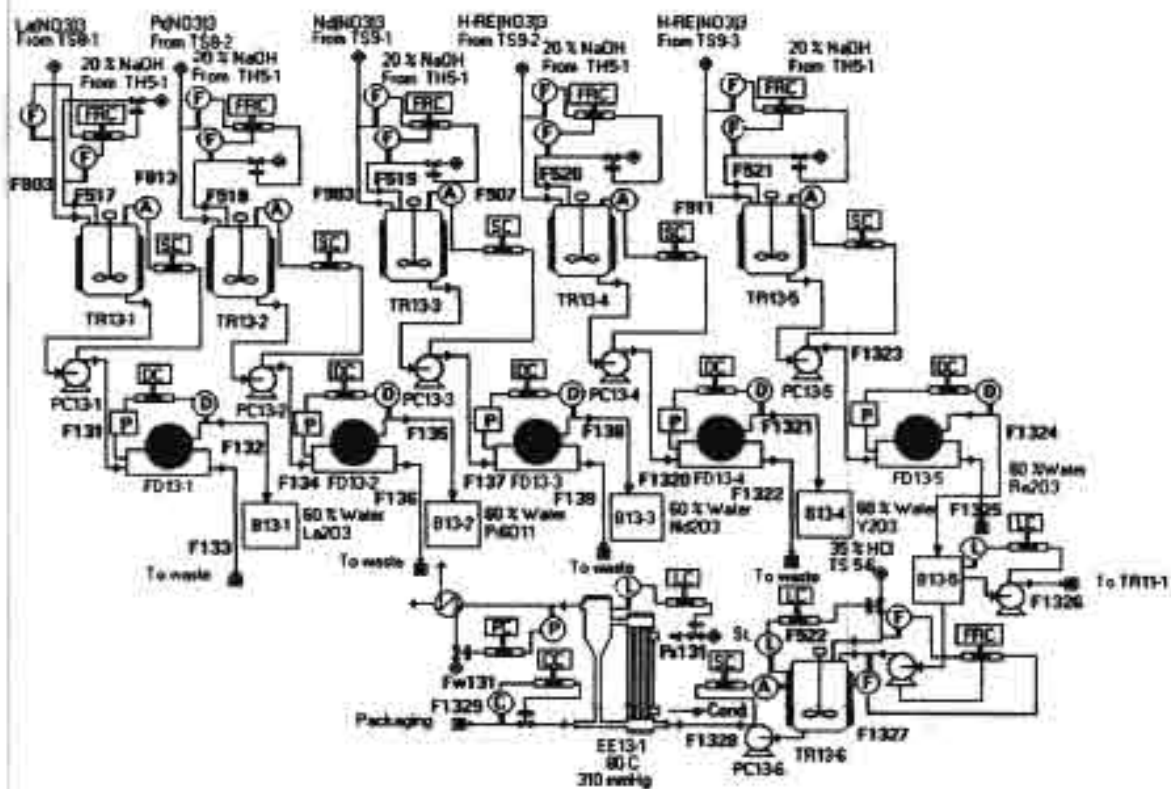
PE31 1 1
LE31 1 1

ภาพที่ 82 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 4 และ Block 6

ตารางที่ 15 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการตกตะกอนแอร์เทรท (หน่วยกระบวนการย่อยที่ 5)

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	f135	F521
2	D135	P135
3	f135	F1323
4	f136	F1327
5	VB35	F1326
6	V136	F522
7	f136	F1328
8	M47	F1329
9	PE31	Ps31
10	LE31	Fw31

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการตกตะกอนแอร์เทรทเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 83 ซึ่งในกระบวนการนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 13 หน่วยปฏิบัติการ และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมซึ่งประกอบด้วย การควบคุมระดับ (LC) 3 ลูป การควบคุมความหนาแน่น (DC) 5 ลูป การควบคุมอัตราส่วนการป้อนสารตั้งต้น (FRC) 6 ลูป การควบคุมระยะเวลาในถังปฏิกรณ์ (SC) 6 ลูป การควบคุมความดัน (PC) 1 ลูป การควบคุมความเข้มข้น (CC) 1 ลูป ซึ่งรวมทั้งหมด 22 ลูปการควบคุม

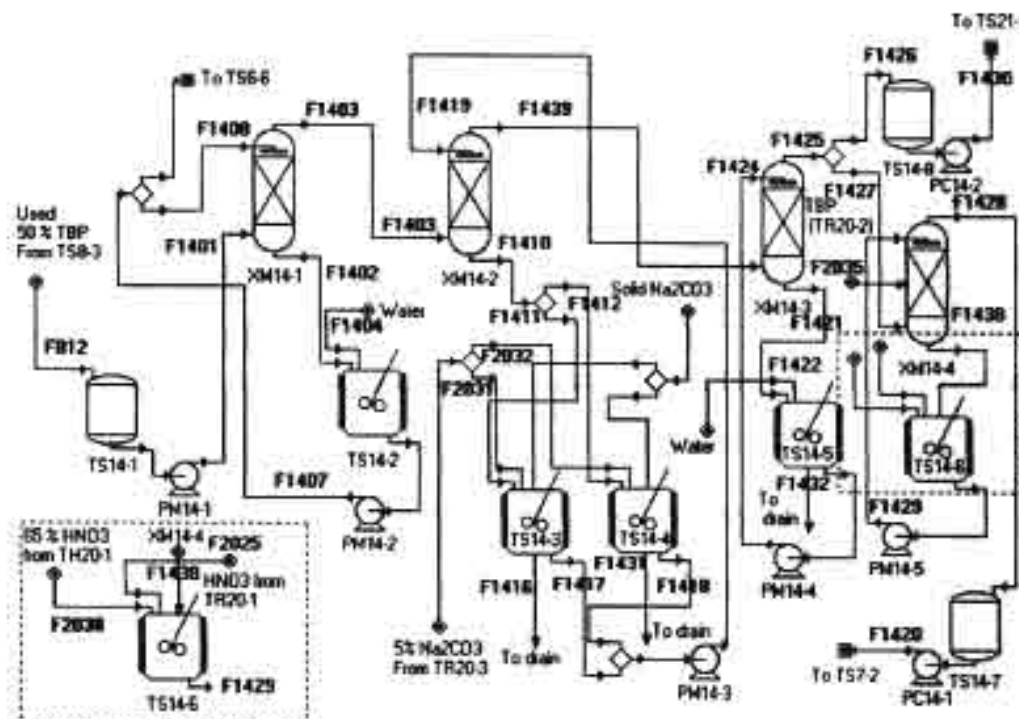


ภาพที่ 83 แสดงกระบวนการตกตะกอนแร่อิธเมื่อใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ

2.15 กระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50 % (หน่วยที่ 14)

2.15.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

สำหรับรายละเอียดของกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50 % สามารถแสดงแผนภาพกระบวนการได้ดังภาพที่ 84 ดังนี้



ภาพที่ 84 แสดงรายละเอียดกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50 %

กระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50 % ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- | | |
|---|--------------------------------|
| - ถังพักสารละลายที่ 1 (TS14-1) | - หอสกัดที่ 1 (XM14-1) |
| - ถังผสมสารละลายที่ 1 (TS14-2) | - หอสกัดที่ 2 (XM14-2) |
| - ถังเตรียมสารละลาย Na_2CO_3 ที่ 1 (TS14-3) | - หอสกัดที่ 3 (XM14-3) |
| - ถังเตรียมสารละลาย Na_2CO_3 ที่ 2 (TS14-4) | - หอสกัดที่ 4 (XM14-4) |
| - ถังพักสารละลายที่ 2 (TS14-7) | - ถังผสมสารละลายที่ 2 (TS14-5) |
| - ถังพักสารละลายที่ 3 (TS14-8) | - ถังผสมสารละลายที่ 3 (TS14-6) |

กระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50 % เริ่มจากการนำสารละลาย TBP ที่ผ่านกระบวนการสกัดจากหน่วยที่ 7, 8 และ 9 มาล้างด้วยน้ำที่หอสกัด XM14-1 หลังจากนั้นจะถูกส่งไปยังหอสกัด XM14-2 เพื่อล้างสิ่งสกปรกด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่มีความ

เข้มข้น 5 % โดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นสารละลาย TBP ที่ผ่านหอสกัด XM14-2 จะถูกส่งมาล้างด้วยน้ำอีกครั้งหนึ่งในหอสกัด XM14-3 ซึ่งสารละลาย TBP บางส่วนจะถูกส่งไปหน่วยกระบวนการที่ 21 และส่วนของสารละลาย TBP จาก XM14-3 ที่ล้างด้วยน้ำสะอาดแล้วจะนำมาล้างอีกครั้งด้วยสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 2 นอร์มอล และกรดไนตริกที่ใช้ล้างสารละลาย TBP แล้ว จะถูกนำมาใช้เป็นสายป้อนกลับเข้ากระบวนการเพื่อล้างสารละลาย TBP อีกครั้งหนึ่ง สารละลาย TBP ที่ผ่านการล้างด้วยสารละลายกรดไนตริกแล้วก็จะนำไปกักเก็บไว้ในหน่วยกระบวนการที่ 7, 8 และ 9 ต่อไป

2.15.2 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50% สามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนาเช่นเดียวกับหน่วยกระบวนการอื่น ๆ ซึ่งในหน่วยกระบวนการนี้จะสามารถสร้าง CEM ได้ทั้งหมด 12 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนการทำ "Non-local path" ของระบบดังกล่าวจะไม่พบ "Non-local path" เกิดขึ้น หลังจากเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM เป็น Plant's CEM จะมีผลทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 41 ตัวแปรลดลงเหลือ 32 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ต่อไป ซึ่งในขั้นตอนการทำ "System pairing" กับ Plant Wide CEM จะพบว่าเมื่อใช้กรรมวิธี "Diagonal partitioning" จะทำให้เกิด Block ที่มีตัวแปรปรับกระบวนการมากกว่าตัวแปรที่ต้องการควบคุม และเป็น Block ที่มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดรูปแบบการควบคุมจำนวนมากมาย ด้วยเหตุนี้จึงใช้กรรมวิธี "Reverse-partitioning" เพื่อกำจัดตัวแปรปรับกระบวนการและลดขนาดของ Block ให้มีขนาดเล็กลงรวมทั้งเป็นการลดรูปแบบการควบคุมให้น้อยลงด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการทำ "System pairing" สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังภาพที่ 85 และ 86 ดังนี้

Cause-and-Effect matrix after reverse partitioning in to diagonal form

	F1401	F1408	F1403	F1419	F1439	F1424	F1427	F812	F1421	F1422	F1402	F1410	F2031	F1441
CG	1													
CL		2												
OGT			3											
CLS				4										
CGO					5									
CLW						6								
CT							7							
V141	x							8						
X143				x	x				9					
V145					x				x	10				
X141	x	x	x									11		
X142			x	x	x							12		
V143													13	13
M48												x		14

ภาพที่ 85 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 14

ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพข้างต้น จะพบว่าใน Block 13 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้เกิดขึ้น 2 แบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก TS14-3 (V_{143}) โดยใช้ตัวแปร F2031 และ F1441 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมรูปแบบที่ 1 โดยใช้ตัวแปร F2031 ซึ่งเป็นอัตราการเติมสารละลาย Na_2CO_3 5% จากถัง TR20-3 ควบคุม V_{143} เนื่องจากสาย F2031 เป็นสายของสารละลายและมาจากแหล่งเก็บดังนั้นจึงสามารถปรับอัตราการไหลตามต้องการได้ (Guideline 5) และสาย F1441 เป็นสายของ Na_2CO_3 ซึ่งเป็นของแข็งจะไม่สามารถนำมาใช้ในการควบคุมได้ และในกรณี Block 15 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 แบบเพื่อควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก TS14-4 (V_{144}) โดยใช้ตัวแปร F2032 และ F1442 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ

	F2032	F1442	F1426	F1430	F2035	F1429	F1428	F1420	F1438	F1404	F1407	F2038	F2025
V144	15	15											
M454	x	16											
V148		17	17										
CN			18	18									
V147						19	19						
X144			x	x	x			20					
V142									21	21			
M23					x		x				22	22	
V146					x		x				x	23	

ภาพที่ 86 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 14 (ต่อ)

การ ซึ่งจากการพิจารณาในลักษณะเดียวกันจะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปร F2032 ควบคุม ปริมาณของสารละลายในถัง TS14-4 (V_{144}) ในกรณี Block 17 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังพักสารละลายที่ 3 (TS14-8) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F1426 และ F1430 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F1430 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลาย TBP ควบคุมปริมาณสารละลายในถัง TS14-8 เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) ในกรณี Block 18 จะมีรูปแบบในการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในสายของสารละลายกรด HNO_3 (CN) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F2035 และ F1429 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F1429 ควบคุมความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในสารละลายกรด HNO_3 (CN) และใน Block 19 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังพักสารละลาย TS14-7 (V_{147}) กระบวนการ F1428 และ F1420 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F1420 ควบคุม V_{147} เนื่องจาก F1420 เป็นอัตราการไหลออกของสารละลายซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลได้ง่ายและให้ผลการควบคุมโดยตรงต่อปริมาณสารละลายในถังพัก (Guideline 5) ส่วนใน Block 21 จะมีรูปแบบในการควบคุม 2 รูปแบบเช่นกันเพื่อควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก TS14-2 (V_{142}) โดยใช้ F1404 และ F1407 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F1407 ควบคุม V_{142} (Guideline 5) และในกรณี Block 22 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบเช่นเดียวกันในการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกรด HNO_3 ในถังเตรียมสารละลาย HNO_3 2N (M23) ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ F2038 ซึ่งเป็นอัตราการไหลของสารละลายกรด HNO_3 65 % จาก TH20-1 เนื่องจากสายตั้ง

กล่าวถึงความเข้มข้นของกรด HNO_3 มากกว่าสายของ F2025 ทำให้สามารถปรับความเข้มข้นของสารละลายกรด HNO_3 ได้อย่างรวดเร็ว (Guideline 5, Guideline 7) และเนื่องจากตัวแปร F2025 จะถูกใช้ในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังเตรียมสารละลาย TS14-6 (V_{146}) สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50% จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด 128 รูปแบบการควบคุม เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้กรรมวิธีข้างต้น จะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสม ดังตารางที่ 16 และตารางที่ 17 ดังนี้

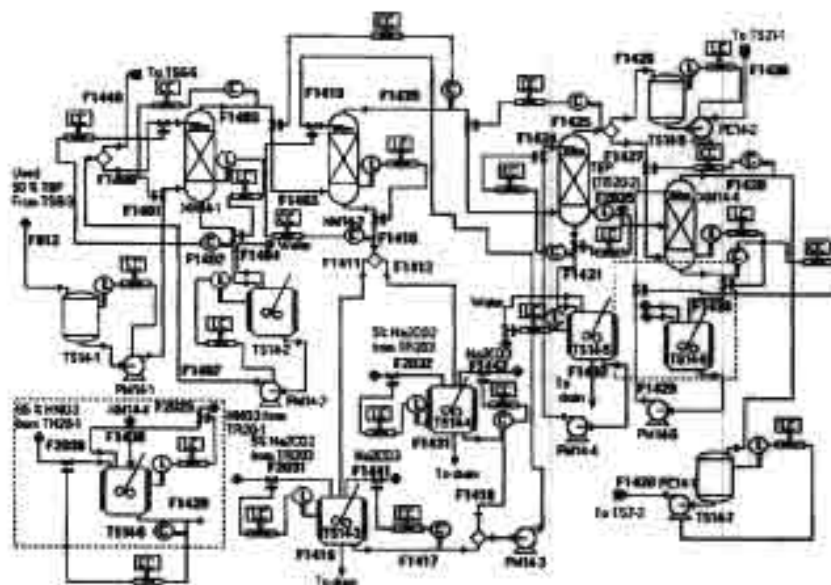
ตารางที่ 16 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50 %

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	CG	F1401
2	CL	F1408
3	CGT	F1403
4	CGS	F1419
5	CGO	F1439
6	CLW	F1424
7	CT	F1427
8	V141	F812
9	X143	F1421
10	V145	F1422
11	X141	F1402
12	X142	F1410
13	V143	F2031
14	M48	F1441
15	V144	F2032
16	M484	F1442
17	V148	F1430
18	CN	F1429

ตารางที่ 18 (ต่อ)

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
19	V147	F1420
20	X144	F1438
21	V142	F1407
22	M23	F2038
23	V146	F2025

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50% เมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการจะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 87 ซึ่งกระบวนการนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 12 หน่วยปฏิบัติการ และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมซึ่งประกอบด้วยการควบคุมระดับ (LC) 12 ลูป และการควบคุมความเข้มข้น (CC) 11 ลูป ซึ่งรวมทั้งหมด 23 ลูปการควบคุม

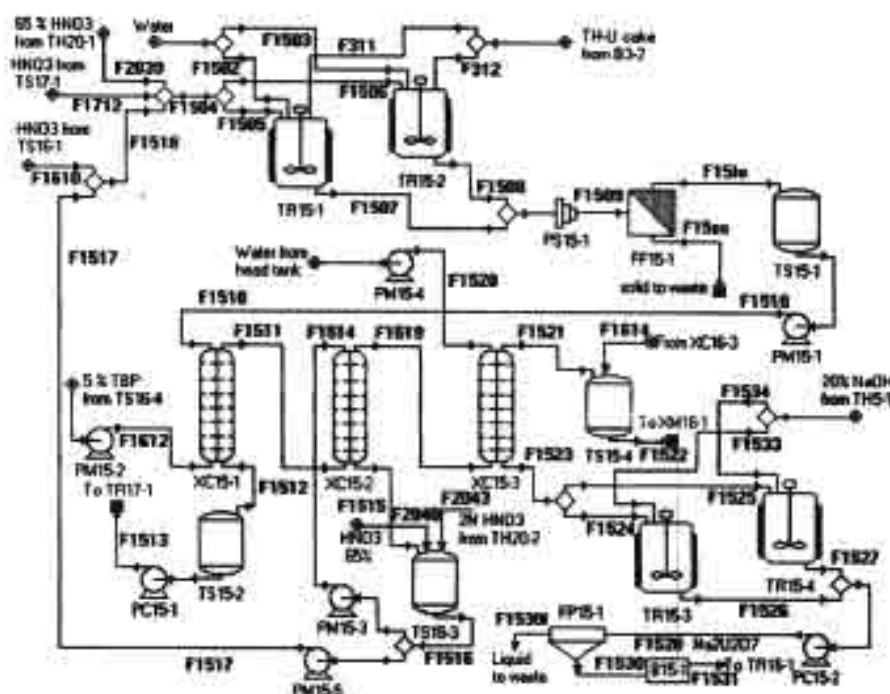


ภาพที่ 87 แสดงกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 50% เมื่อใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ

2.16 กระบวนการสกัดยูเรเนียม (หน่วยที่ 15)

2.16.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

รายละเอียดของกระบวนการสกัดยูเรเนียม สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 149



ภาพที่ 88 แสดงรายละเอียดกระบวนการสกัดยูเรเนียม

กระบวนการสกัดยูเรเนียมประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ดังนี้

- ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (TR15-1)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (TR15-2)
- เครื่องกรองสารละลายที่ 1 (FF15-1)
- ถังพักสารละลายที่ 1 (TS15-1)
- หอสกัดที่ 1 (XC15-1)
- ถังพักสารละลายที่ 2 (TS15-2)
- หอสกัดที่ 2 (XC15-2)
- ถังพักสารละลายที่ 3 (TS15-3)
- หอสกัดที่ 3 (XC15-3)
- ถังพักสารละลายที่ 4 (TS15-4)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (TR15-3)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 4 (TR15-4)
- เครื่องกรองตะกอนที่ 1 (FP15-1)
- ถังผสมที่ 1 (Mixer15-1)
- ถังพักตะกอนเปียก (B15-1)

กระบวนการสกัดยูเรเนียม เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกไอออนของยูเรเนียม จาก ไอออนของทอเรียมโดยการนำตะกอนของยูเรเนียมและทอเรียมจากหน่วยที่ 3 มาละลายด้วยน้ำ

และสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 65 % โดยมวลต่อปริมาตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปกรองเอาเฉพาะส่วนที่เป็นสารละลาย ส่วนของแข็งจะกำจัดทิ้งไป สารละลายที่ผ่านเครื่องกรองดังกล่าวจะถูกส่งมาสกัดเพื่อแยกสกัดไอออนของทอเรียมออกจากไอออนของยูเรเนียม โดยให้ไหลสวนทางกับสารละลาย TBP 5% ซึ่งไอออนของยูเรเนียมจะละลายไปอยู่ในชั้นของสารละลาย TBP ส่วนไอออนของทอเรียมจะยังคงอยู่ในของผสมซึ่งจะไหลออกมาทางด้านล่างหอ เพื่อส่งไปยังหน่วยกระบวนการที่ 17 ต่อไป สำหรับสารละลาย TBP ที่มียูเรเนียมละลายอยู่ จะถูกนำม้างด้วยสารละลายกรดไนตริกโดยการไหลสวนทางกัน หลังจากนั้นจะนำสารละลาย TBP ที่มียูเรเนียมละลายอยู่ดังกล่าว มาสกัดแยกไอออนของยูเรเนียมออกโดยให้ไหลสวนทางกับน้ำในหอสกัด ซึ่งจะทำให้ไอออนของยูเรเนียมถูกสกัดออกจากสารละลาย TBP และละลายอยู่ในชั้นน้ำ ส่วนสารละลาย TBP ที่ผ่านการสกัดยูเรเนียมออกแล้วจะถูกส่งไปยังหน่วยที่ 18 เพื่อทำการปรับสภาพต่อไป ไอออนของยูเรเนียมเมื่อถูกสกัดแยกออกจากสารละลาย TBP แล้วจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอนยูเรเนียมโดยให้ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 20 โดยมวลต่อปริมาตร เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีแล้วจะได้ตะกอนของ $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ ซึ่งตะกอนนี้สามารถตกตะกอนได้เองโดยธรรมชาติ โดยเติมสารช่วยตกตะกอนเล็กน้อย จากนั้นปล่อยชั้นของสารละลายทิ้งไป และนำชั้นของตะกอนหรือ Slurry ที่ได้ไปผ่านเครื่องกรองเพื่อกรองตะกอนดังกล่าวซึ่งเป็นตะกอนของ $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการที่ 16 ต่อไป

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	Pf1	F1512	F1510	F1511	F1514	F1520	F1519	Pp1	F1509	F1512	F1513	F1515	F1533	F1524	F1526
DY1	1														
MurL		2													
MURR			3												
MurT				4											
MurN					5										
MURW						6									
MUT3							7								
Dp1								8							
Ve1			x						9						
Vx1		x	x	x						10					
Ve2										x		11			
Vx2				x	x		x						12		
r153													13	13	
V153													13	13	13
r153													13	13	13

ภาพที่ 89 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 15

ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพข้างต้นจะพบว่าและในกรณี Block 13 และ Block 14 ซึ่งในแต่ละ Block จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้อย่างละ 4 รูปแบบการควบคุมโดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 3 ตัวแปรได้แก่อัตราการป้อนสารละลาย NaOH 20 % จากถังพัก TH5-1 (F1533, F1534) อัตราการไหลของน้ำที่มียูเรเนียมละลายอยู่

	F1534	F1525	F1527	F1528	F1531	F1521	F1523	F1514	F1522	F1505	F1502	F311	F1507
F154	14	14											
V154	14	14	14										
I154	14	14	14										
Vb51				15	15								
Vx3						16	16						
Va4						16		16	16				
F151										17	17	17	
V151										17	17	17	17
I151										17	17	17	17
	F1508	F1503	F312	F1506	F1712	F2038	F1518	F2040	F2043	F1516			
F152	18	18	18										
V152	18	18	18	18									
I152	18	18	18	18									
M231				19	19	19							
F504				19	19	19							
M232							20	20	20				
Va3							20	20	20				

ภาพที่ 90 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 15 (ต่อ)

เมื่อประยุกต์ใช้ Relative Order Matrix กับ Block 13 และ Block 14 จะได้ Relative Order Matrix ดังแสดงดังภาพที่ 91 ซึ่ง รูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมไม่สามารถใช้ Relative Order

BLOCK 13

F1533 F1524 F1526

F153	x		x
V153	x	x	x
I153	x	x	x

Configuration number 1.

F1533 F1524 F1526

F153	1		1
V153	1	1	1
I153	1	1	1

Configuration number 2.

F1533 F1526 F1524

F153	1		1
V153	1	1	1
I153	1	1	1

Configuration number 3.

F1524 F1533 F1526

F153	1		1
V153	1	1	1
I153	1	1	1

Configuration number 4.

F1524 F1526 F1533

F153	1		1
V153	1	1	1
I153	1	1	1

BLOCK 14

F1534 F1525 F1527

F154	x		x
V154	x	x	x
I154	x	x	x

Configuration number 1.

F1534 F1525 F1527

F154	1		1
V154	1	1	1
I154	1	1	1

Configuration number 2.

F1534 F1527 F1525

F154	1		1
V154	1	1	1
I154	1	1	1

Configuration number 3.

F1525 F1534 F1527

F154	1		1
V154	1	1	1
I154	1	1	1

Configuration number 4.

F1525 F1527 F1534

F154	1		1
V154	1	1	1
I154	1	1	1

ได้เนื่องจาก Relative Order Matrix ที่ได้จะให้ลักษณะ Relative Order ที่เหมือนกัน เมื่อพิจารณาและวิเคราะห์ตามหลักการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม จะทำการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมรูปแบบที่ 3 ของแต่ละ Block ซึ่งจะใช้อัตราการไหลออกของของผสมจากถังปฏิกรณ์ (F1526, F1527) เพื่อควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมี (t153, t154) เนื่องจากตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อตัวแปรที่ต้องการควบคุม (Guideline 5) ส่วนอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมี (f153, f154) จะควบคุมโดยใช้อัตราการไหลของน้ำจากหอสกัด XC15-3 (F1524, F1525) เป็นตัวกำหนดเพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนปริมาณของของผสมในถังผสมในแต่ละถัง (V153, V154) จะควบคุมโดยใช้อัตราการป้อนของสารละลาย NaOH 20% (F1533, F1534) ในกรณี Block 15 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณของเค้กเปียกที่ได้จากการกรอง (Vb51) โดยใช้ตัวแปร F1530 และ F1531 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ จากการวิเคราะห์จากหลักการข้างต้นจะพบว่ารูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยการใช้ตัวแปร F1531 ควบคุม Vb51 เนื่องจากให้ผลในการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) ในกรณี Block 16 จะมีตัวแปรปรับกระบวนการ 4 ตัวแปรในการควบคุมปริมาณสารละลายในหอสกัดที่ 3 (Vx3) และปริมาณสารละลายในถังพัก TS15-4 (Vs4) ซึ่งจะทำให้เกิดรูปแบบการควบคุมทั้งหมด 5 รูปแบบการควบคุมโดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F1521, F1523, F1614 และ F1522 ซึ่งในกรณีนี้จะต้องทำการตัดตัวแปรปรับกระบวนการบางตัวออกเพื่อเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม ซึ่งจากการสร้าง Relative Order Matrix ของ Block 6 จะได้ลักษณะ Relative Order Matrix ดังภาพที่ 90 ซึ่ง Relative Order Matrix ที่ได้พบว่ารูปแบบการควบคุมที่ 4 และ 5 จะให้ค่า Relative Order ที่ดีเหมือนกันเนื่องจากมีคุณสมบัติข้อ 1 และ 3 ซึ่งในกรณีนี้จะใช้หลักการพิจารณาเลือกตัวแปรเข้ามาช่วยในการพิจารณาด้วยซึ่งจากการใช้หลักการเลือกตัวแปรปรับกระบวนการจะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 4 โดยการใช้ F1521 ควบคุม Vx3 และใช้ F1614 ควบคุม Vs4 เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) ส่วนในกรณี Block 17 และ Block 18 จะต้องทำการกำจัดตัวแปรปรับกระบวนการ 1 ตัวแปรจากตัวแปรปรับกระบวนการ 4 ตัวแปรได้แก่อัตราการไหลของกรดไนตริก (F1505, F1506) อัตราการป้อนเค้กเปียกของแร่ทอเรียมและยูเรเนียม (F311, F312) อัตราการป้อนน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ (F1502, F1503) และอัตราการไหลออกของของผสมจากถังปฏิกรณ์ (F1507, F1508) เพื่อควบคุมปริมาณของผสมในถังปฏิกรณ์ (V151, V152) ระยะเวลาที่สารทำปฏิกิริยาเคมีในถังปฏิกรณ์ (t151, t152) และอัตราส่วนการป้อนสารตั้งต้น (f151, f152) เนื่องจากรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ของแต่ละ Block จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้จำนวน 18 รูปแบบการควบคุม ซึ่งรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมไม่สามารถใช้ Relative Order Matrix แสดงดังภาพที่ 153, 154, 155, 156, 157, 158 และ 158 ได้เนื่องจากให้ Relative Order Matrix ที่มีลักษณะเหมือนกันไม่สามารถนำมา

BLOCK 16			
	F1521	F1523	F1614 F1522
Vx3	x	x	
Vx4	x		x
Configuration number 1.			
	F1521	F1614	
Vx3	1		
Vx4	1	1	
Configuration number 2.			
	F1521	F1522	
Vx3	1		
Vx4	1	1	
Configuration number 3.			
	F1523	F1521	
Vx3	1	1	
Vx4		1	
Configuration number 4.			
	F1523	F1614	
Vx3	1		
Vx4		1	
Configuration number 5.			
	F1523	F1522	
Vx3	1		
Vx4		1	

ภาพที่ 92 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 16

พิจารณาเพื่อเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมได้ ดังนั้นเมื่อพิจารณาและวิเคราะห์ตามหลัก การเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม จะทำการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมรูปแบบที่ 2 ของแต่ละ Block ซึ่งจะใช้อัตราการไหลออกของของผสมจากถังปฏิกรณ์ (F1507, F1508) เพื่อควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมี (t151, t152) เนื่องจากตัวแปรปรับกระบวนการ ดังกล่าวจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อตัวแปรที่ต้องการควบคุม (Guideline 5) ส่วนอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมี (t151, t152) จะควบคุมโดยใช้อัตราการไหลของกรดไนตริก (F1505, F1506) เป็นตัวกำหนดเพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนปริมาณของของผสมในถังผสมในแต่ละถัง (V151, V152) จะควบคุมโดยใช้อัตราการป้อนของน้ำเพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยาเคมี (F1502, F1503) ในกรณี Block 19 จะมีรูปแบบในการควบคุมทั้งหมด 6 รูปแบบการควบคุมในการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริก (M231) และอัตราการไหลของสารละลายกรดไนตริกจากถังผสม (F504) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F1712, F2039 และ F1518 เมื่อสร้าง Relative Order Matrix ของ Block 19 จะได้ Relative Order Matrix ดังภาพที่ 156 จาก Relative Order Matrix ที่ได้ไม่สามารถนำมาใช้พิจารณาเลือกรูปแบบที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการควบคุมได้ ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้หลักการเลือกตัวแปร โดยรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมได้แก่

BLOCK 17

F1505 F1502 F311 F1507

F151	x	x	x
V151	x	x	x
I151	x	x	x

Configuration number 1.

F1505 F1502 F311

F151	1	1	1
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 2.

F1505 F1502 F1507

F151	1	1
V151	1	1
I151	1	1

Configuration number 3.

F1505 F311 F1502

F151	1	1
V151	1	1
I151	1	1

Configuration number 4.

F1505 F311 F1507

F151	1	1
V151	1	1
I151	1	1

Configuration number 5.

F1505 F1507 F1502

F151	1	1
V151	1	1
I151	1	1

Configuration number 6.

F1505 F1507 F311

F151	1	1
V151	1	1
I151	1	1

Configuration number 7.

F1502 F1505 F311

F151	1	1
V151	1	1
I151	1	1

Configuration number 8.

F1502 F1505 F1507

F151	1	1
V151	1	1
I151	1	1

Configuration number 9.

	F1502	F311	F1505
F151	1	1	1
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 10.

	F1502	F311	F1507
F151	1	1	
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 11.

	F1502	F1507	F1505
F151	1		1
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 12.

	F1502	F1507	F311
F151	1		1
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 13.

	F311	F1505	F1502
F151	1	1	1
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 14.

	F311	F1505	F1507
F151	1	1	
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 15.

	F311	F1502	F1505
F151	1	1	1
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 16.

	F311	F1502	F1507
F151	1	1	
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 17.

	F311	F1507	F1505
F151	1		1
V151	1	1	1
I151	1	1	1

Configuration number 18.

	F311	F1507	F1502
F151	1		1
V151	1	1	1
I151	1	1	1

ภาพที่ 94 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 17 (ต่อ)

BLOCK 18

F1506 F1503 F312 F1508

f152	x	x	x	
V152	x	x	x	x
t152	x	x	x	x

Configuration number 1.

F1506 F1503 F312

f152	1	1	1
V15	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 2.

F1506 F1503 F1508

f152	1	1	
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 3.

F1506 F312 F1503

f152	1	1	1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 4.

F1506 F312 F1508

f152	1	1	
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 5.

F1506 F1508 F1503

f152	1		1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 6.

F1506 F1508 F312

f152	1		1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 7.

F1503 F1506 F312

f152	1	1	1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 8.

F1503 F1506 F1508

f152	1	1	
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 9.

F1503 F312 F1506

f152	1	1	1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 10.

	F1503	F312	F1506
f152	1	1	
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 11.

	F1503	F1506	F312
f152	1		1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 12.

	F1503	F1506	F312
f152	1	1	
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 13.

	F312	F1506	F1503
f152	1	1	1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 14.

	F312	F1506	F1503
f152	1	1	
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 15.

	F312	F1503	F1506
f152	1	1	1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 16.

	F312	F1503	F1506
f152	1	1	
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 17.

	F312	F1506	F1503
f152	1		1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

Configuration number 18.

	F312	F1506	F1503
f152	1		1
V152	1	1	1
t152	1	1	1

ภาพที่ 96 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 18 (ต่อ)

BLOCK 19			
	F1712	F2039	F1518
M231	x	x	x
F504	x	x	x
Configuration number 1.			
	F1712	F2039	
M231	1	1	
F504	1	1	
Configuration number 2.			
	F1712	F1518	
M231	1	1	
F504	1	1	
Configuration number 3.			
	F2039	F1712	
M231	1	1	
F504	1	1	
Configuration number 4.			
	F2039	F1518	
M231	1	1	
F504	1	1	
Configuration number 5.			
	F1518	F1712	
M231	1	1	
F504	1	1	
Configuration number 6.			
	F1518	F2039	
M231	1	1	
F504	1	1	

ภาพที่ 97 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 19

รูปแบบการควบคุมที่ 4 โดยใช้ F2039 ควบคุม M231 และใช้ F518 ควบคุม F504 และในกรณี Block 20 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 6 รูปแบบแบบการควบคุมเช่นเดียวกับ Block 19 เมื่อประยุกต์ใช้ Relative Order Matrix กับ Block 20 จะได้ผลดังภาพที่ 96 ซึ่ง Relative Order Matrix ที่ได้ไม่สามารถนำมาใช้ในการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมได้เนื่องจากให้ผลของค่า Relative Order เหมือนกัน จากหลักการเลือกรูปแบบที่ต้องการควบคุม เลือกรูปแบบการควบคุมที่ 4 โดยใช้ตัวแปร F2043 ซึ่งเป็นอัตราไหลของสารละลายกรดไนตริกควบคุม M232 และใช้ F1516 ควบคุมปริมาณสารละลายที่อยู่ในถัง TS15-3 ซึ่งรูปแบบการควบคุมของกระบวนการนี้มีรูปแบบการควบคุมจำนวนมาก อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้น จะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังนี้

BLOCK 20			
	F2040	F2043	F516
M232	x	x	x
Vs3	x	x	x
Configuration number 1.			
	F2040	F2043	
M232	1	1	
Vs3	1	1	
Configuration number 2.			
	F2040	F1516	
M232	1	1	
Vs3	1	1	
Configuration number 3.			
	F2043	F2040	
M232	1	1	
Vs3	1	1	
Configuration number 4.			
	F2043	F1516	
M232	1	1	
Vs3	1	1	
Configuration number 5.			
	F1516	F2040	
M232	1	1	
Vs3	1	1	
Configuration number 6.			
	F1516	F2043	
M232	1	1	
Vs3	1	1	

ภาพที่ 98 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 20

ตารางที่ 17 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการสกัดยูเรเนียม

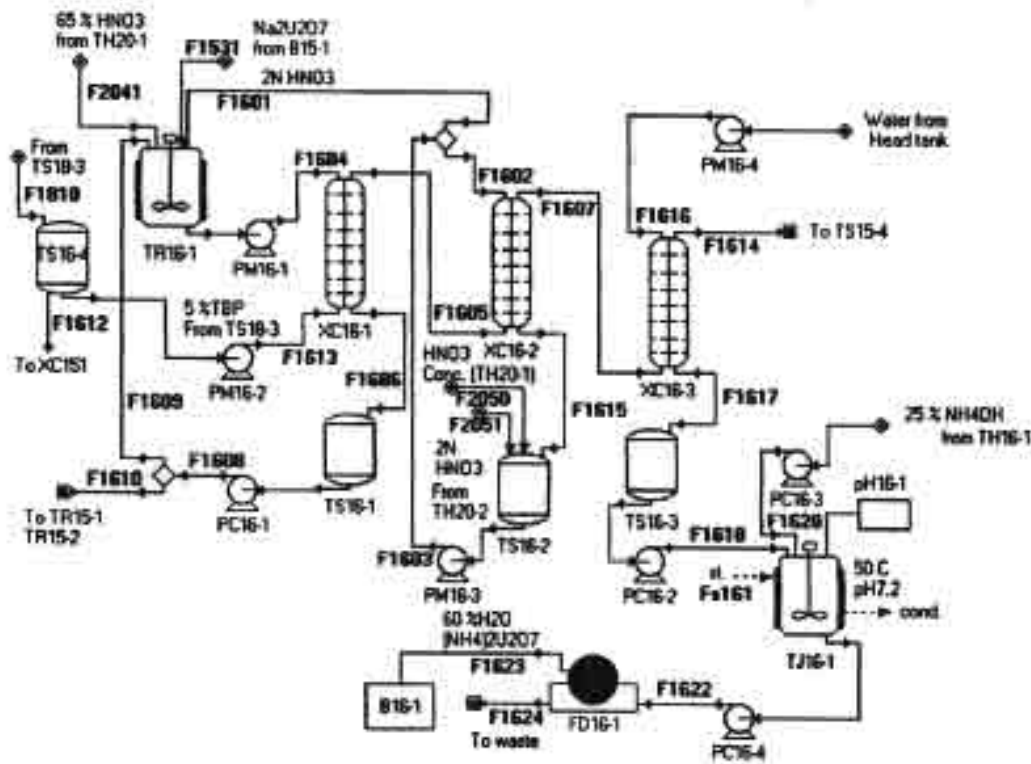
คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	Df1	Pf1
2	MUrL	F1612
3	MUrR	F1510
4	MUrT	F1511
5	MUrN	F1520
6	MUrW	F1519
7	MUT3	Pp1

ตารางที่ 17 (ต่อ)

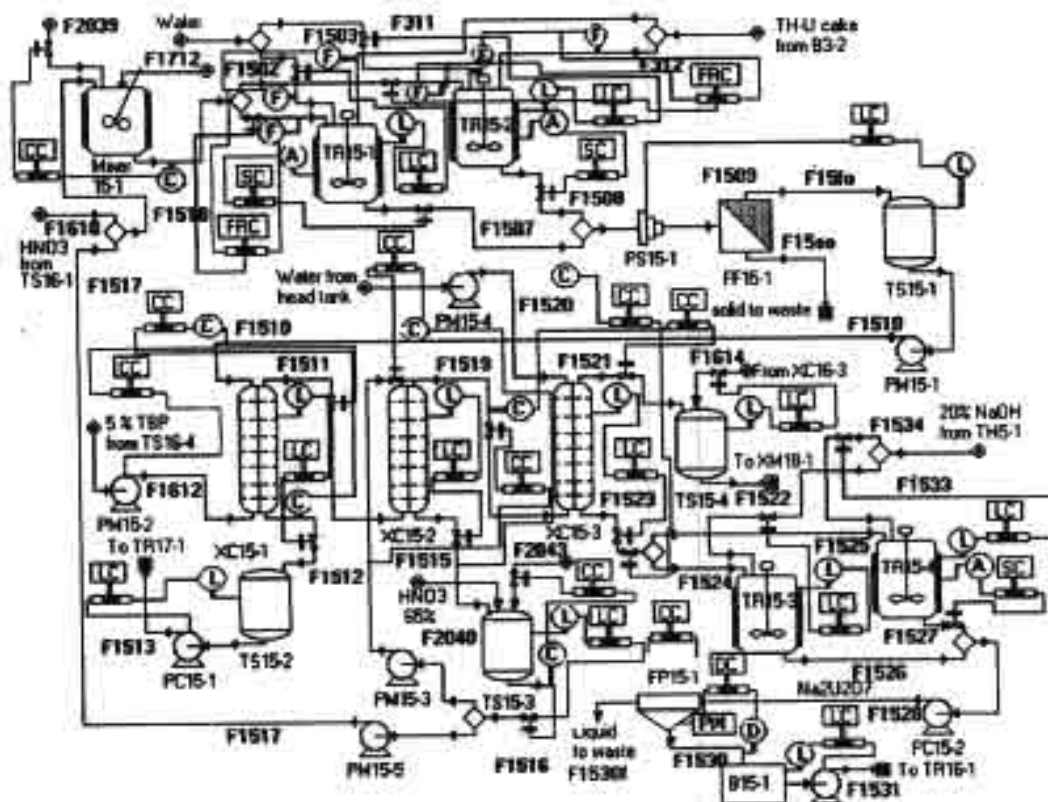
คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
8	Dp1	F1509
9	Vs1	F1512
10	Vx1	F1513
11	Vs2	F1515
12	Vx2	F1524
13	f153	F1533
14	V153	F1533
15	t153	F1525
16	f154	F1534
17	V154	F1534
18	t154	F1527
19	Vb51	F1531
20	Vx3	F1523
21	Vs4	F1614
22	f151	F1505
23	V151	F1502
24	t151	F1507
25	f152	F1506
26	V152	F1503
27	t152	F1508
28	M231	F2039
29	F504	F1518
30	M232	F2043
31	Vs3	F1516

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการสัปดาห์แรกเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 99 ซึ่งกระบวนการนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 15 หน่วยปฏิบัติการ และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมซึ่งประกอบด้วย การควบคุม

ระดับ (LC) 12 ลูบ การควบคุมความเข้มข้น (CC) 8 ลูบ การควบคุมความหนาแน่น 2 ลูบ
การควบคุมอัตราส่วนการป้อนสาร (FRC) 4 ลูบ การควบคุมเวลา (SC) 4 ลูบ การควบคุม
อัตราการไหล (FC) 1 ลูบ รวมทั้งหมด 31 ลูบควบคุม



ภาพที่ 99 แสดงหน่วยกระบวนการสกัดยูเรเนียมเมื่อเลือกใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ



ภาพที่ 100 แสดงรายละเอียดกระบวนการสกัดชาและผลิตเค้กเหลือง

2.17 กระบวนการสกัดชาและผลิตเค้กเหลือง (หน่วยที่ 16)

2.17.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

รายละเอียดของกระบวนการสกัดชาและผลิตเค้กเหลือง สามารถแสดงได้ดัง

ภาพที่ 100 ดังนี้

กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ดังปฏิกรณ์ที่ 1 (TR16-1)
- ดังปฏิกรณ์ที่ 2 (TJ16-1)
- หอสกัดที่ 1 (XC16-1)
- หอสกัดที่ 3 (XC16-3)
- ดังพักสารละลายที่ 4 (TS16-4)
- ดังพักสารละลายที่ 1 (TS16-1)
- ดังพักสารละลายที่ 2 (TS16-2)
- หอสกัดที่ 2 (XC16-2)
- ดังพักสารละลายที่ 3 (TS16-3)
- เครื่องกรองที่ 1 (FD16-1)

กระบวนการสกัดซ้ำและผลิตเค้กเกลือเป็นกระบวนการที่ใช้ในการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ของแรมูเรเนียมอีกครั้งหนึ่ง โดยนำตะกอนไฮดรอกไซด์ในรูปของ $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$ ที่ได้จากหน่วยกระบวนการที่ 15 มาละลายด้วยกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 60 % จากหน่วยที่ 20 (TH20-1) จากนั้นจะนำสารละลายที่มียูเรเนียมละลายอยู่มาสกัดด้วยสารละลาย TBP 5 % โดยการไหลสวนทางกันในเครื่องสกัดแยกของเหลวด้วยของเหลว สารละลายที่ถูกแยกสกัดยูเรเนียมซึ่งจะออกมาทางด้านล่างของหอส่วนหนึ่งจะถูกบีอนกลับไปยังถังละลายตะกอนและอีกส่วนหนึ่งจะนำไปใช้ในหน่วยที่ 15 สำหรับสารละลาย TBP ที่มียูเรเนียมซึ่งจะออกมาทางด้านบนของหอจะถูกส่งมาไปล้างด้วยกรดไนตริกเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนออก จากนั้นนำสารละลาย TBP ที่มีแรมูเรเนียมละลายอยู่มาสกัดแยกยูเรเนียมโดยให้ไหลสวนทางกับน้ำซึ่งจะทำให้แรมูเรเนียมละลายอยู่ส่วนสารละลาย TBP ที่ไม่มียูเรเนียมปนจะถูกส่งไปยังหน่วยที่ 15 เพื่อส่งไปรวมกับสารละลาย TBP ที่เหลือ และส่งไปปรับสภาพที่หน่วยที่ 18 ส่วนสารละลายที่ออกมาทางด้านล่างของเครื่องสกัดซึ่งมีแรมูเรเนียม จะถูกส่งมายังถังตกตะกอนเค้กเกลือโดยให้ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 25 โดยมวลต่อปริมาตร ซึ่งจะได้ตะกอน $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และ pH เท่ากับ 7.2 สารละลายและตะกอนที่ได้จะนำไปกรองแยกเค้กออกและจะนำเค้กที่ได้ไปอบแห้ง ส่วนสารละลายที่เหลือนำไปนำบัตต่อไป

2.17.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการสกัดซ้ำและผลิตเค้กเกลือสามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนาซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังแสดงใน เนื่องจากในกระบวนการนี้มีหน่วยอุปกรณ์ทั้งหมด 10 หน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้ได้ CEM ทั้งหมด 10 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์ข้างต้น จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนการทำ "Non-local path" ของระบบดังกล่าวจะไม่พบ "Non-local path" เกิดขึ้น หลังจากการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM ของทั้งหมดเพื่อสร้างเป็น Plant Wide CEM จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 34 ตัวแปรเหลือเพียง 25 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ในขั้นตอนการทำ "System pairing" จะได้รายละเอียดและรูปแบบดังภาพที่ 101 และ 102 ดังนี้

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F1613	F1604	F1605	F1602	F1616	F1607	P161	F1610	F1617	F1618	F1620	F1622	F1606	F1608
MUL	1													
MUR		2												
MUR			3											
MUR				4										
MUR					5									
MUR						6								
D161							7							
Vs4	x							8						
Vs3				x	x				9					
Vs3								x		10				
h1										x		11		
Vj1										x	x		12	
h1										x	x		12	
Vx1	x	x	x											13
Vs1													x	14

ภาพที่ 101 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 16

	F1615	F161	F2041	F1609	F1601	F2050	F2051	F1603
Vs2	15							
Tj1		16						
I161			17	17	17			
Vr1			17	17	17			
I161			17	17	17			
M23				x		18	18	18
Vs2				x		18	18	18

ภาพที่ 102 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 16 (ต่อ)

BLOCK 17

	F2041	F1609	F1601
I161	x	x	x
Vr1	x	x	x
I161	x	x	x

Configuration number 1.

	F2041	F1609	F1601
I161	1	1	1
Vr1	1	1	1
I161	1	1	1

Configuration number 2.

	F2041	F1601	F1609
I161	1	1	1
Vr1	1	1	1
I161	1	1	1

Configuration number 3.

	F1609	F2041	F1601
I161	1	1	1
Vr1	1	1	1
I161	1	1	1

Configuration number 4.

	F1609	F1601	F2041
I161	1	1	1
Vr1	1	1	1
I161	1	1	1

Configuration number 5.

	F1601	F2041	F1609
I161	1	1	1
Vr1	1	1	1
I161	1	1	1

ภาพที่ 103 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 17 และ Block 18

Configuration number 8.			
	F1601	F1600	F2041
F161	1	1	1
V1	1	1	1
I161	1	1	1

BLOCK 18			
	F2050	F2051	F1603
M23	x	x	x
Vs2	x	x	x

Configuration number 1.		
	F2050	F2051
M23	1	1
Vs2	1	1

Configuration number 2.		
	F2050	F1603
M23	1	1
Vs2	1	1

Configuration number 3.		
	F2051	F2050
M23	1	1
Vs2	1	1

Configuration number 4.		
	F2051	F1603
M23	1	1
Vs2	1	1

Configuration number 5.		
	F1603	F2050
M23	1	1
Vs2	1	1

Configuration number 6.		
	F1603	F2051
M23	1	1
Vs2	1	1

ภาพที่ 104 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 17 และ Block 18 (ต่อ)

ในขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพที่ 101 และ 102 ได้กำจัดตัวแปรปรับกระบวนการ F1614, F1531, F1612 ออกเนื่องจากตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวได้ถูกใช้ในการควบคุมกระบวนการของหน่วยอุปกรณ์อื่น ๆ และในกรณีนี้จะกำจัดตัวแปรที่ต้องควบคุม F1623 เนื่องจากพบว่าตัวแปร F1623 ซึ่งเป็นอัตราการผลิตเค้กเป็นหน่วยสุดท้ายของกระบวนการซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์และไม่เกี่ยวข้องในกระบวนการอื่น ๆ จึงพิจารณาให้เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญน้อย ซึ่งผลที่ได้จากการทำ "System pairing" จะพบว่าใน Block 12 จะมีความบกพร่องเชิงโครงสร้างเนื่องจากมีตัวแปรที่ต้องการควบคุมมากกว่าตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกที่จะควบคุมระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (y1) เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ (Guideline 4) และทำการกำจัดตัวแปร Vj1 ในกรณี Block 17 จะมีรูปแบบการควบคุม

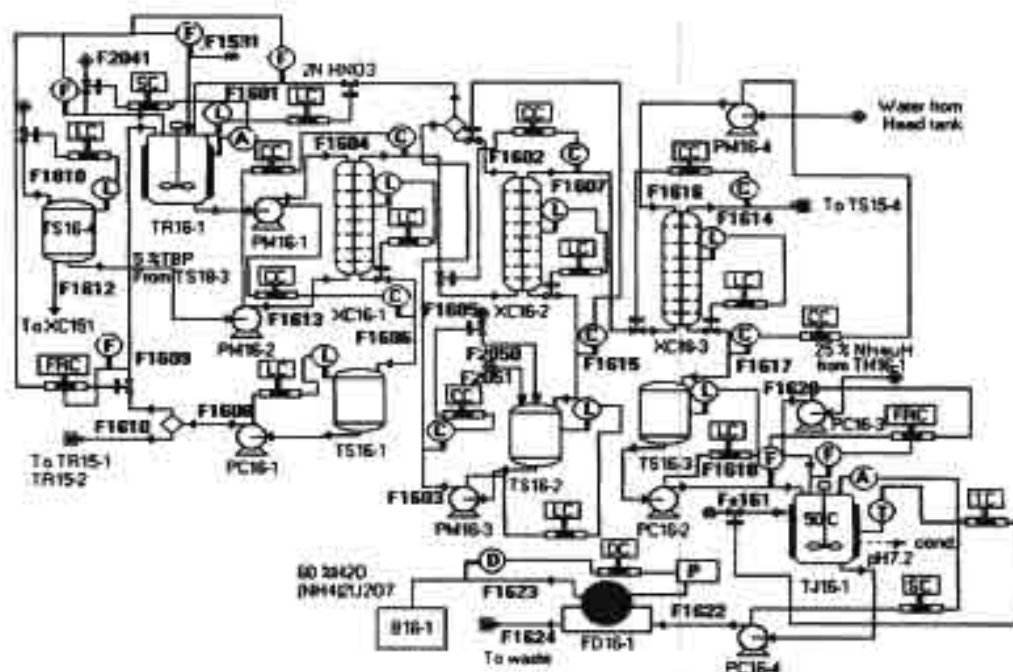
ที่เป็นไปได้ 6 รูปแบบการควบคุมโดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 3 ตัวแปรได้แก่อัตราการป้อนกรดไนตริก 65 % จากถังพัก TH20-1 (F2041) อัตราการป้อนสารละลายกรดไนตริกเพื่อช่วยในการทำปฏิกิริยาเคมีจากถังพัก TS16-2 (F1601) และอัตราการป้อนของแก๊สของยูเรเนียมจากถังพักแก๊สเปียก B15-1 (F1531) และอัตราการไหลออกของของผสมซึ่งเป็นสารประกอบไนเตรตจากถังปฏิกรณ์ TR16-1 (F1604) เพื่อควบคุมปริมาณของผสมในถังปฏิกรณ์ (V_{r1}) ระยะเวลาที่สารทำปฏิกิริยาเคมีในถังปฏิกรณ์ (t161) และอัตราส่วนการป้อนสารตั้งต้น (f161) เมื่อสร้าง Relative Order Matrix ของ Block 17 จะได้รูปแบบของ Relative Order Matrix แสดงดังภาพที่ 103 และ 104 ซึ่งจาก Relative Order Matrix ที่ได้พบว่ารูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมไม่สามารถใช้ Relative Order Matrix ในการเลือกได้เนื่องจาก Relative Order Matrix ของแต่ละรูปแบบการควบคุมมีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาและวิเคราะห์ตามหลักการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม จะทำการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมรูปแบบที่ 4 ซึ่งจะใช้ F2041 เพื่อควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมี (t161) ส่วนอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมี (f161) จะควบคุมโดย F1609 เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนปริมาณของของผสมในถังผสม (V_{r61}) จะควบคุมโดยใช้อัตราการป้อนของสารละลาย HNO_3 จาก TS16-2 (F1601) ในกรณี Block 18 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 6 รูปแบบในการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายกรดไนตริกให้ได้ความเข้มข้นตามต้องการโดยใช้ตัวแปร F2050, F2051 และ F1609 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งเมื่อสร้าง Relative Order Matrix ของ Block 18 ดังกล่าวจะได้ Relative Order Matrix ดังภาพที่ 165 ซึ่งในกรณีไม่สามารถใช้ Relative Order Matrix ในพิจารณาเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมได้เนื่องจากให้ค่า Relative Order เท่ากัน จากการวิเคราะห์จากหลักการข้างต้นจะพบว่ารูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยการใช้ตัวแปร F2050 ควบคุม M23 เนื่องจากสายของ HNO_3 ดังกล่าวเป็นสายที่มีความเข้มข้นของปริมาณ HNO_3 สูงซึ่งจะมีผลทำให้ส่งผลต่อความเข้มข้นของของผสมได้อย่างรวดเร็ว (Guideline 7) และใช้ตัวแปร F1603 ซึ่งเป็นสายออกจากถังพักสารละลายควบคุม Vs_2 เนื่องจากให้ผลในการควบคุมได้โดยตรงและรวดเร็วและสามารถปรับอัตราการไหลได้ง่าย (Guideline 5, 7) สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการสกัดซ้ำและผลิตแก๊สเหลือจะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด 36 รูปแบบการควบคุมอย่างไรก็ดีเมื่อใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้น จะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องควบคุมที่เหมาะสมดังนี้

ตารางที่ 18 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการสกัดซ้ำและผลิตเค้กเหลือง

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	MUrL	F1613
2	MUrR	F1604
3	MUrT	F1605
4	MUrN	F1602
5	MUrW	F1616
6	MUT3	F1607
7	D161	P161
8	Vs4	P1810
9	Vx3	F1617
10	Vs3	F1618
11	η1	F1620
12	η1	F1622
13	Vx1	F1606
14	Vs1	F1608
15	Vx2	F1615
16	Tj1	Fs61
17	f161	F1609
18	Vr1	F1601
19	t161	F2041
20	M23	F2050
21	Vs2	F1603

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการสกัดซ้ำและผลิตเค้กเหลืองเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 105 ซึ่งกระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 10 หน่วยปฏิบัติการ และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมซึ่งประกอบด้วยการควบคุมระดับ (LC) 8 ลูป การควบคุมความเข้มข้น (CC) 7 ลูป การควบคุมความ

หนาแน่น 1 ลูบ การควบคุมอัตราส่วนการป้อนสาร (FRC) 2 ลูบ การควบคุมเวลา (SC) 2 ลูบ การควบคุมอุณหภูมิ (TC) 1 ลูบ ซึ่งรวมกันแล้วจะมีจำนวนลูบทั้งหมด 21 ลูบการควบคุม

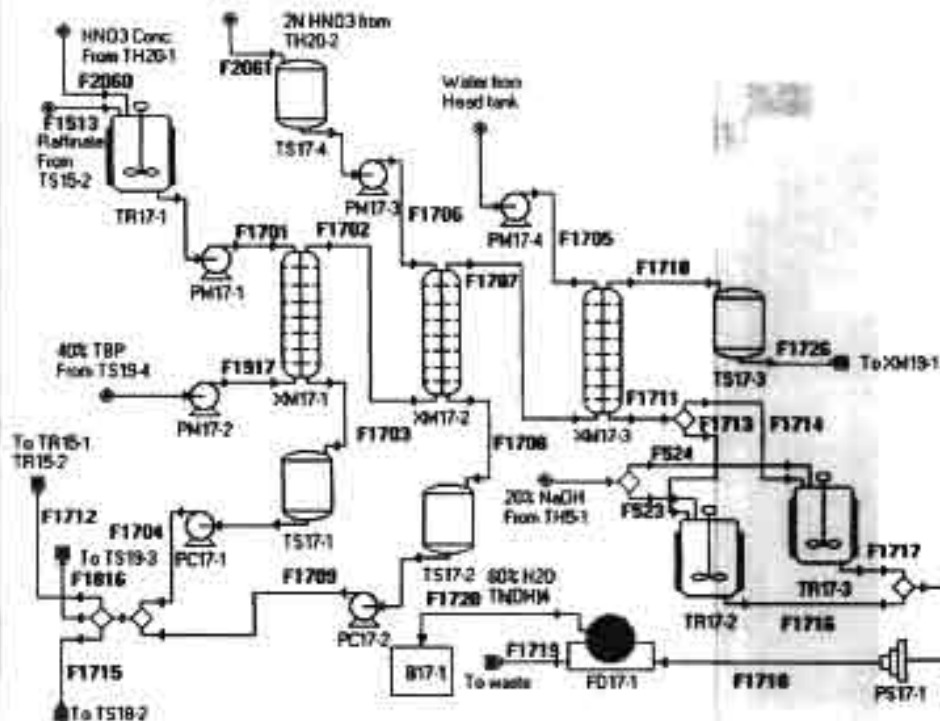


ภาพที่ 105 แสดงรายละเอียดกระบวนการสกัดน้ำและผลิตเค้กเหลือง เมื่อใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ

2.18 กระบวนการสกัดทอเรียม (หน่วยที่ 17)

2.18.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

กระบวนการสกัดทอเรียมสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 106 ดังนี้



ภาพที่ 106 แสดงรายละเอียดกระบวนการสกัดทอเรียม

กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (TR17-1)
- ถังพักสารละลายที่ 1 (TS17-1)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 2 (TR17-2)
- ถังพักสารละลายที่ 2 (TS17-2)
- ถังปฏิกรณ์ที่ 3 (TR17-3)
- ถังพักสารละลายที่ 3 (TS17-3)
- หอสกัดที่ 1 (XC17-1)
- ถังพักสารละลายที่ 4 (TS17-4)
- หอสกัดที่ 3 (XC17-3)
- หอสกัดที่ 2 (XC17-2)
- เครื่องกรองที่ 1 (FD17-1)

กระบวนการสกัดทอเรียบ เป็นกระบวนการที่ใช้ในการตกตะกอนทอเรียบซึ่งอยู่ในรูปสารละลายจากหน่วยสกัดแยกยูเรเนียมซึ่งเป็นหน่วยที่ 15 ให้อยู่ในรูปของตะกอนไฮดรอกไซด์โดยทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลาย NaOH 20 % เริ่มจากการนำสารละลายที่มี Th ละลายอยู่จากถังเก็บหน่วยที่ 15 มาทำปฏิกิริยาเคมีกับ 65 % HNO_3 ในถังปฏิกรณ์โดยมีการปรับสภาพสารละลายเพื่อให้มีสภาพเป็นกรด จากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้มาสกัดไอออนของ Th ด้วยสารละลาย TBP โดยใช้ Mixer Settler ซึ่งจะทำให้ไอออนของ Th ในสารละลายถูกสกัดออกด้วย 40 % TBP ซึ่งสายของสารละลาย TBP ที่มี Th ละลายอยู่จะออกทางด้านบนทอ ส่วนสารละลายด้านล่างที่ไม่ถูกสกัดด้วยสารละลาย TBP จะถูกส่งต่อไปยังหน่วยที่ 15, 18 และหน่วยที่ 19 ต่อไป จากนั้นนำสารละลาย TBP ที่มีทอเรียบละลายอยู่มาล้างด้วยกรดไนตริก จากนั้นทำการสกัดไอออนของ Th ที่อยู่ในสารละลาย TBP ด้วยน้ำในทอสกัดโดยการให้ไหลสวนทาง ซึ่งจะทำให้ทอเรียบละลายเข้าไปอยู่ในชั้นน้ำ ส่วนสารละลาย TBP ที่ถูกสกัดแล้วจะไหลออกไปยังถังพักเพื่อรอการปรับสภาพต่อไป จากนั้นนำสารละลายชั้นน้ำที่ได้ไปตกตะกอนยังถังตกตะกอน Th โดยให้ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารละลาย NaOH 20 % ซึ่งจะทำให้เกิดตะกอนของ $\text{Th}(\text{OH})_4$ โดยสารละลายที่ได้จะมีฤทธิ์เป็นด่าง จากนั้นนำสารละลายดังกล่าวไปผ่านเครื่องกรองตะกอนเพื่อกรองเอาเฉพาะส่วนที่เป็นตะกอน จากนั้นนำไปอบแห้งจะได้ตะกอนของ $\text{Th}(\text{OH})_4$ ออกมา

2.17.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการสกัดซ้ำและผลิตเค้กเหลืองสามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนาซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ เนื่องจากในกระบวนการนี้มีหน่วยอุปกรณ์ทั้งหมด 11 หน่วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม ซึ่งจะทำให้ได้ CEM ทั้งหมด 11 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์ข้างต้น จากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนการทำ "Non-local path" ของระบบดังกล่าวจะไม่พบ "Non-local path" เกิดขึ้น หลังจากการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM ของทั้งหมดเพื่อสร้างเป็น Plant Wide CEM จะทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 31 ตัวแปรเหลือเพียง 24 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ในขั้นตอนการทำ "System pairing" จะได้รายละเอียดและรูปแบบดังภาพที่ 107 และ 108 ดังนี้

ในขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพที่ 168 และภาพที่ 169 ด้านล่าง ได้กำจัดตัวแปรปรับกระบวนการ F1513 ออกเนื่องจากตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวได้ถูกใช้ในการควบคุมกระบวนการของหน่วยอุปกรณ์อื่น ๆ ผลที่ได้จากการทำ "System pairing" จะพบว่าใน Block 9 จะมีความบกพร่องเชิงโครงสร้างเนื่องจากมีตัวแปรที่ต้องการควบคุมมากกว่าตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้เลือกที่จะควบคุมความเข้มข้นของกรดไนตริก (M23) ในถังปฏิกรณ์ เพื่อเปลี่ยนตะกอนของทอเรียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายในเตรทให้หมดก่อนจะนำไปสกัด เพื่อลดการสูญเสียไอออนของทอเรียมในกระบวนการ (Guideline 4) และทำการกำจัดตัวแปร Vr1 ในกรณี Block 15 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 3 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังพักสารละลาย TS17-3 (V_{s3}) และปริมาณสารละลายที่อยู่ในหอสกัดสารละลาย XM17-3 (V_{x3}) โดยใช้ตัวแปร F1710, F1711 และ F1726 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ จากการสร้าง Relative Order Matrix ของ Block 15 จะได้รูปแบบดังภาพที่ 170 ซึ่งพบว่ารูปแบบการควบคุมที่ 3 เป็นรูปแบบการควบคุมที่ดีที่สุด แต่ในที่นี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ F1710 ควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก TS17-3 เนื่องจากจะต้องรักษาตัวแปรปรับกระบวนการ F1726 ไว้ใช้เป็นตัวแปรปรับกระบวนการของหน่วยกระบวนการที่ 19 และเนื่องจากตัวแปร F1710 จะให้ผลในการควบคุมโดยตรงต่อปริมาณสารละลายในถังพัก TS17-3 ด้วย (Guideline 5) และใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F1711 ซึ่งเป็นสายของน้ำที่มีไอออนของ

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F1917	F1701	F1702	F1706	F1705	F1707	F1718	P171	F2080	F2081	F1703	F1704	F1708
MThL	1												
MThR		2											
MThT			3										
MThN				4									
MThW					5								
MThO						6							
F720							7						
D171								8					
M23		x							9				
Vr1		x							9				
Vs4				x						10			
Vx1	x	x	x								11		
Vs1											x	12	
Vx2			x	x		x							13

ภาพที่ 107 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 17

ทอเรียมละลายอยู่ควบคุมปริมาณของสารละลายในหอสกัด (Vx3) เพื่อป้องกันการดันของสารละลายในหอสกัด เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวจะให้ผลในการควบคุมได้โดยตรง (Guideline 5) ในกรณี Block 16 และ Block 17 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 4 รูปแบบการควบคุมโดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ 3 ตัวแปรได้แก่อัตราการป้อนสารละลาย NaOH 20 % จากถังพัก TH5-1 (F523, F524) อัตราการไหลของชั้นน้ำที่มีไอออนของทอเรียมละลายอยู่จากหอสกัด XM17-3 (F1713, F1714) และอัตราการไหลออกของของผสมซึ่งเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ของทอเรียมจากถังปฏิกรณ์ TR17-2 และ TR17-3 (F1716, F1717) เพื่อควบคุมปริมาณของผสมในถังปฏิกรณ์ (Vr₂, Vr₃) ระยะเวลาที่สารทำปฏิกิริยาเคมีในถังปฏิกรณ์ (tr₂, tr₃) และอัตราส่วนการป้อนสารตั้งต้น (fr₂, fr₃) เนื่องจากรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมไม่สามารถใช้

	F1709	F1710	F1726	F1711	F523	F1713	F1716	F524	F1714	F1717
Vs2	14									
Vs3		15	15							
Vx3		15		15						
f2					16	16				
Vx2					16	16	16			
f2					16	16	16			
f3								17	17	
Vx3								17	17	17
f3								17	17	17

ภาพที่ 108 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 17

BLOCK 15

F1710 F1726 F1711

Vs3 x x

Vx3 x x

Configuration number 1.

F1710 F1711

Vs3 1

Vx3 1 1

Configuration number 2.

F1726 F1710

Vs3 1 1

Vx3 1 1

Configuration number 3.

F1726 F1711

Vs3 1

Vx3 1 1

BLOCK 16

F523 F1713 F1716

f2 x x

Vx2 x x x

f2 x x x

ภาพที่ 109 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 15, Block 16 และ Block 17

Configuration number 1.

F523 F1713 F1716

fr2	1	1	
vr2	1	1	1
ir2	1	1	1

Configuration number 2.

F523 F1716 F1713

fr2	1		1
vr2	1	1	1
ir2	1	1	1

Configuration number 3.

F1713 F523 F1716

fr2	1	1	
vr2	1	1	1
ir2	1	1	1

Configuration number 4.

F1713 F1716 F523

fr2	1		1
vr2	1	1	1
ir2	1	1	1

BLOCK 17

F524 F1714 F1717

fr3	x	x	
vr3	x	x	x
ir3	x	x	x

Configuration number 1.

F524 F1714 F1717

fr3	1	1	
vr3	1	1	1
ir3	1	1	1

Configuration number 2.

F524 F1717 F1714

fr3	1		1
vr3	1	1	1
ir3	1	1	1

Configuration number 3.

F1714 F524 F1717

fr3	1	1	
vr3	1	1	1
ir3	1	1	1

Configuration number 4.

F1714 F1717 F524

fr3	1		1
vr3	1	1	1
ir3	1	1	1

ภาพที่ 110 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 15, Block 16 และ Block 17 (ต่อ)

Relative Order Matrix ซึ่งแสดงดังภาพที่ 109 และ 110 เนื่องจากให้ Relative Order Matrix ที่เหมือนกัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาและวิเคราะห์ตามหลักการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม จะทำการเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมรูปแบบที่ 3 ทั้ง Block 16 และ 17 โดยใช้ (F1716, F1717) เพื่อควบคุมระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมีในถังปฏิกรณ์ TR17-2, TR17-3 (r2, r3) ส่วนอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่เข้าทำปฏิกิริยาเคมี (r2, r3) จะควบคุมโดยใช้ตัวแปร F1713 และ F1714 เพื่อให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนปริมาณของของผสมในถังผสม (Vr₂, Vr₃) จะควบคุมโดยใช้อัตราการป้อนสารละลาย NaOH 20% จาก TH5-1 (F523, F524) สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการสกัดหยาบจะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด 49 รูปแบบการควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กรรมวิธีวิเคราะห์ข้างต้น จะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องควบคุมที่เหมาะสมดังตารางที่ 19

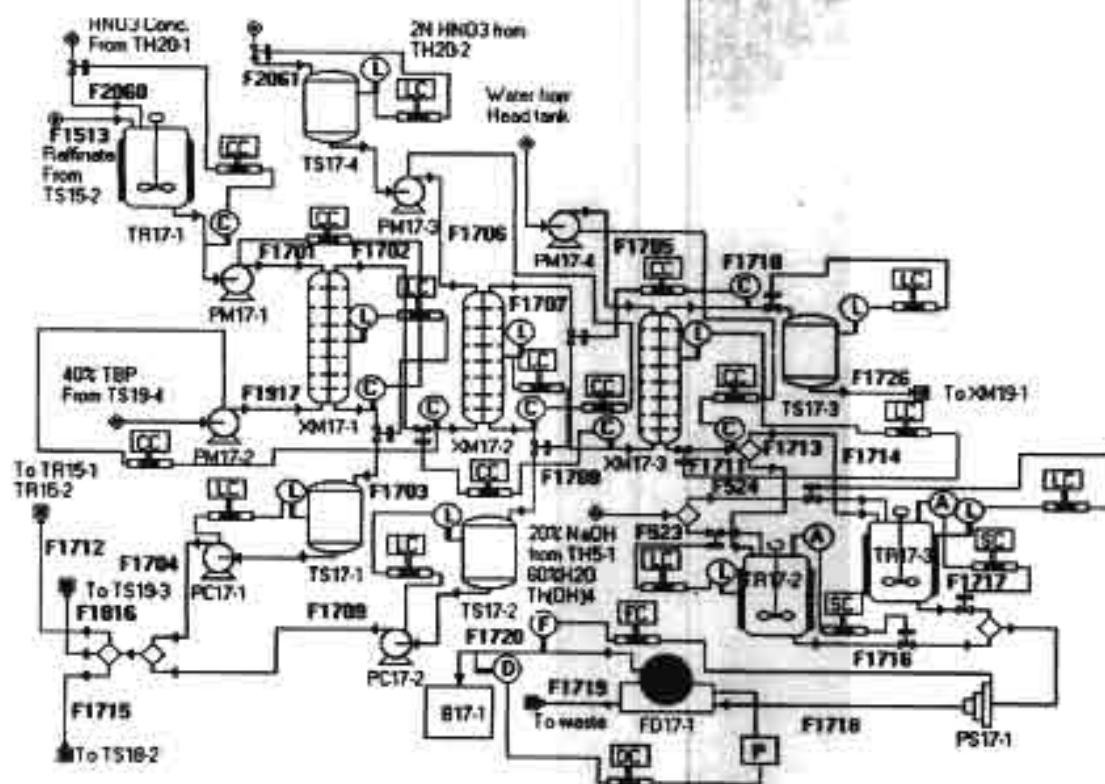
ตารางที่ 19 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการสกัดหยาบ

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	MThL	F1917
2	MThR	F1701
3	MThT	F1702
4	MThN	F1706
5	MThW	F1705
6	MThO	F1707
7	F1720	F1718
8	D171	P171
9	M23	F2060
10	Vs4	F2061
11	Vx1	F1703
12	Vs1	F1704
13	Vx2	F1708
14	Vs2	F1709
15	Vs3	F1710
16	Vx3	F1711

ตารางที่ 19 (ต่อ)

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
17	fr2	F1713
18	Vr2	F523
19	tr2	F1716
20	fr3	F1714
21	Vr3	F524
22	tr3	F1717

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการสกัดหอเรียนเมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 172 ซึ่งกระบวนการนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 11 หน่วยปฏิบัติการ และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมซึ่งประกอบด้วย การควบคุมระดับ (LC) 9 ลูป การควบคุมความเข้มข้น (CC) 7 ลูป การควบคุมความหนาแน่น 1 ลูป การควบคุมอัตราส่วนการป้อนสาร (FRC) 2 ลูป การควบคุมเวลา (SC) 2 ลูป การควบคุมอัตราการไหล (FC) 1 ลูป รวมทั้งหมด 22 ลูปควบคุม



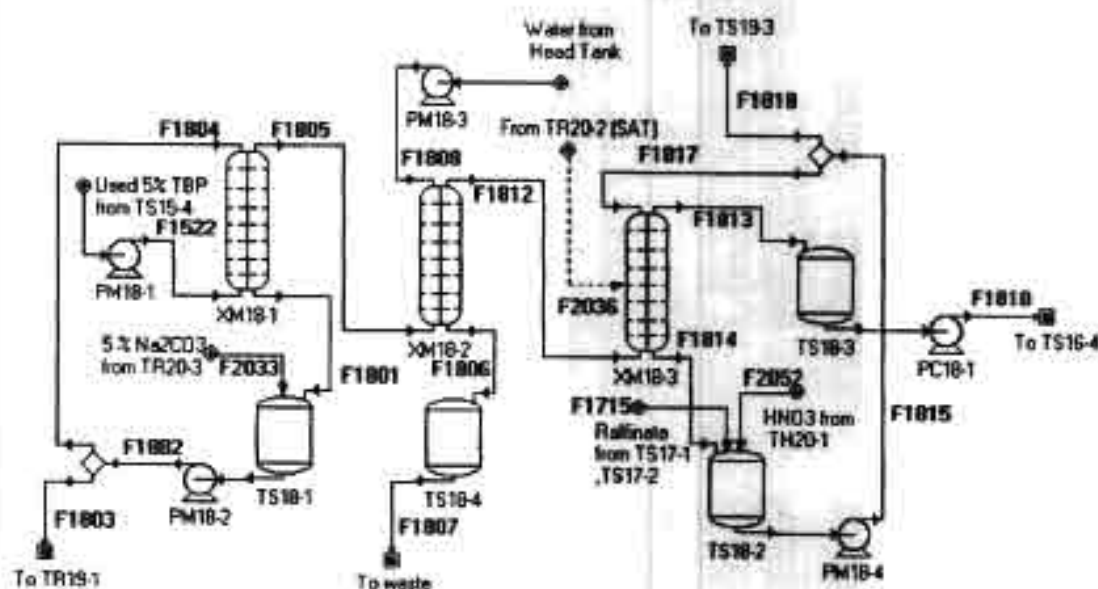
ภาพที่ 111 แสดงกระบวนการสกัดหยาบเมื่อใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ

2.19 กระบวนการปรับสภาพ TBP 5 % (หน่วยที่ 18)

2.19.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

รายละเอียดของกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 5% สามารถแสดงได้ดัง

ภาพที่ 112 ดังนี้



ภาพที่ 112 แสดงรายละเอียดกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 5%

กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- หอสกัดที่ 1 (XM18-1)
- หอสกัดที่ 2 (XM18-2)
- หอสกัดที่ 3 (XM18-3)
- หอพักสารละลายที่ 1 (TS18-1)
- หอพักสารละลายที่ 2 (TS18-2)
- หอพักสารละลายที่ 3 (TS18-3)
- หอพักสารละลายที่ 4 (TS18-4)

กระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 5% เป็นกระบวนการคืนสภาพสารละลาย TBP เพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการอีกครั้งโดยการนำสารละลาย TBP 5% ที่ใช้แล้วจากหน่วยที่ 15 มารวมกับสารละลาย TBP จากหน่วยที่ 16 และนำสารละลายที่ได้ดังกล่าวไปปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ที่มีความเข้มข้น 5 % โดยมวลต่อปริมาตร โดยการล้างในลักษณะให้ไหลสวนทางกับสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต เมื่อสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตไหลผ่าน TBP เรียบร้อยแล้วจะออกทางด้านล่างของหอ สารละลาย

ส่วนนี้ ส่วนหนึ่งจะถูกมือนกลับไปใช้งานใหม่ในหน่วยที่ 18 และหน่วยที่ 19 ส่วนสารละลาย TBP ที่ถูกปรับสภาพแล้วจะไหลออกทางด้านบนของเครื่อง และถูกส่งไปยังเครื่องล้างสารละลาย TBP ด้วยน้ำ โดยให้น้ำไหลสวนทางกับสารละลาย TBP น้ำที่ใช้แล้วจะนำไปบำบัดต่อไป สารละลาย TBP ที่ปรับสภาพแล้วจะส่งไปล้างอีกครั้งหนึ่งด้วยกรดไนตริกโดยให้มีการไหลสวนทางเช่นเดียวกัน สารละลาย TBP ที่ปรับสภาพแล้วจะออกทางด้านบนของหอและกรดไนตริกที่ถูกใช้แล้วจะถูกนำไปใช้ในหน่วยที่ 19 และสารละลาย TBP ที่ปรับสภาพแล้วจะนำไปใช้ในหน่วยที่ 16 ต่อไป

2.19.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 5% สามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์ โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนาเช่นเดียวกับหน่วยกระบวนการอื่น ๆ ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังแสดงใน ซึ่งในหน่วยกระบวนการนี้จะสามารถสร้าง CEM ได้ทั้งหมด 7 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนการทำ "Non-local path" ของระบบดังกล่าวจะไม่พบ "Non-local path" เกิดขึ้น หลังจากเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM เป็น Plant Wide CEM จะมีผลทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 24 ตัวแปรลดลงเหลือ 18 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ต่อไป

ในขั้นตอนการทำ "System pairing" กับ Plant Wide CEM สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังภาพที่ 113 และ 114 ดังนี้

	F1522	F1804	F1805	F1808	F1812	F1801	F1806	F1807	F2036	F1817	F1813	F1810	F1814
CG	1												
CL		2											
CGW			3										
CLW				4									
CGO					5								
Vx1	x	x	x			6							
Vx2			x	x	x		7						
Vx4							x	8					
CLN									9	9			
Vx3											10	10	
Vx3					x				x	x		x	11

ภาพที่ 113 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 18

	F2036	F1802	F2052	F1715	F1815
Vx1	12	12			
Vx2		13	13	13	
M23	x	x	x	14	

ภาพที่ 114 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 18 (ต่อ)

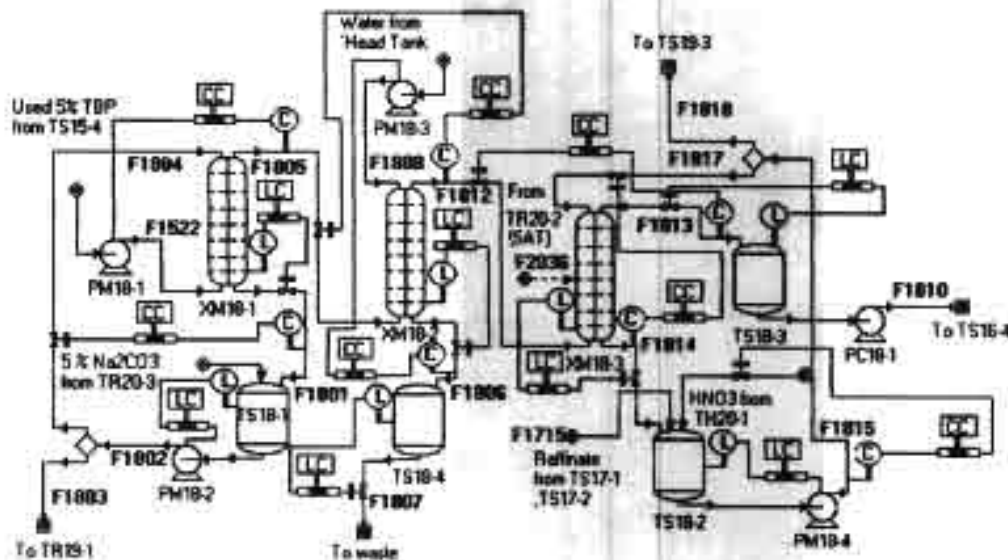
ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพข้างต้น จะพบว่าใน Block 9 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้เกิดขึ้น 2 แบบในการควบคุมความเข้มข้นของสิ่งเจือปนในสายของสารละลาย TBP (CLN) โดยใช้ตัวแปร F2036 และ F1817 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมรูปแบบที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F1817 ซึ่งเป็นอัตราการไหลของสารละลายกรดไนตริกจากถังพัก TS18-2 เนื่องจากสาย F1817 เป็นสายของสารละลายและมาจากแหล่งเก็บดังนั้นจึงสามารถปรับอัตราการไหลตามต้องการได้ และในกรณี Block 10 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 แบบเพื่อควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก TS18-3 (Vs₃) โดยใช้ตัวแปร F1813 และ F1810 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งจากการพิจารณาในลักษณะเดียวกันจะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปร F1813 ควบคุม

ปริมาณของสารละลายในถัง TS18-3 (Vs3) เนื่องจากตัวแปร F1810 จะถูกใช้ในการควบคุมหน่วยดังกล่าว TS16-4 ในกรณี Block 12 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังดังกล่าวที่ 1 (TS18-1) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F2033 และ F1802 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F1802 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลาย Na_2CO_3 ควบคุมปริมาณสารละลายในถัง TS18-1 (Vs1) เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) ในกรณี Block 13 จะมีรูปแบบในการควบคุมที่เป็นไปได้ 3 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังดังกล่าวที่ 2 (Vs2) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F2052, F1715 และ F1815 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 3 โดยใช้ตัวแปร F1815 ควบคุมปริมาณสารละลายในถังดังกล่าวที่ 2 (Vs2) เนื่องจาก F1815 จะให้ผลโดยตรงต่อระดับปริมาณสารละลาย (Guideline 5) สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 5% จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด 24 รูปแบบการควบคุม เมื่อทำการวิเคราะห์ โดยใช้กรรมวิธีข้างต้นจะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 5 %

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	CG	F1522
2	CL	F1804
3	CGW	F1805
4	CLW	F1808
5	CGO	F1812
6	Vx1	F1801
7	Vx2	F1806
8	Vs4	F1807
9	CLN	F1817
10	Vs3	F1813
11	Vx3	F1814
12	Vs1	F1802
13	Vs2	F1815
14	M23	F2052

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 5% เมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 181 ซึ่งกระบวนการนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 7 หน่วยปฏิบัติการ และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมซึ่งประกอบด้วยการควบคุมระดับ (LC) 7 ลูป และการควบคุมความเข้มข้น (CC) 7 ลูป รวมทั้งหมด 14 ลูปควบคุม



ภาพที่ 115 แสดงกระบวนการปรับสภาพ TBP 5% เมื่อใช้รูปแบบการควบคุมกระบวนการ

2.20.2.9 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 40% สามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์โดยใช้โปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนาเช่นเดียวกับหน่วยกระบวนการอื่น ๆ ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังแสดงใน ซึ่งในหน่วยกระบวนการนี้จะสามารถสร้าง CEM ได้ทั้งหมด 10 CEM ตามจำนวนอุปกรณ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนการทำ "Non-local path" ของระบบดังกล่าวจะไม่พบ "Non-local path" เกิดขึ้น หลังจากเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM เป็น Plant's CEM จะมีผลทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 30 ตัวแปรลดลงเหลือ 24 ตัวแปร เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ต่อไป

ในขั้นตอนการทำการ "System pairing" ได้ทำการตัดตัวแปรปรับกระบวนการ F1917 ออกจาก Plant Wide CEM เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวถูกใช้ในการควบคุมในเครื่องสกัด

แยก XM17-1 หลังจากตัดตัวแปรดังกล่าวได้ผลจากการทำ "System pairing" แสดงรายละเอียดได้ดังภาพที่ 116 และ 117 ดังนี้

Cause-and-Effect matrix after partitioning in to diagonal form

	F1728	F1904	F1905	F1906	F1915	F1916	Fmk	F1901	F1908	F1907	F1909
CGT	1										
CLS		2									
CGT2			3								
CLW				4							
CLHN					5						
V ₆₄						6					
V ₆₃							7				
V ₆₁	x	x	x					8			
V ₆₅									9	9	
V ₆₂			x	x					9		9

ภาพที่ 116 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 19

	F1911	F2037	F1913	F1914	F1910	F1912	F034	F902	F525	F905	F803	F918
CGTB	10	10										
V ₆₃	10	10	10									
V ₆₂				10	10							
V ₆₅						11	11					
V ₆₁		x					12	12				
M23									13	13	13	13
V ₆₁									13	13	13	13

ภาพที่ 117 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 19 (ต่อ)

ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพข้างต้น จะพบว่าใน Block 9 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้เกิดขึ้น 3 แบบในการควบคุมตัวแปร V_{s6} และ V_{x2} โดยใช้ตัวแปร F1906, F1907 และ F1909 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการเมื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎี Relative Order Matrix กับ Block 9, Block 10 และ Block 13 สามารถสร้าง Relative Order Matrix ได้ดังภาพที่ 118, 119 และ 120 ดังนี้

BLOCK 9

F1906 F1907 F1909

Vs6 x x

Vx2 x x

Configuration number 1.

F1906 F1909

Vs6 1

Vx2 1 1

Configuration number 2.

F1907 F1906

Vs6 1 1

Vx2 1

Configuration number 3.

F1907 F1909

Vs6 1

Vx2 1

BLOCK 10

F1911 F2037 F1913 F1914

CGTB x x

Vs3 x x x

Vs2 x x

Configuration number 1.

F1911 F2037 F1913

CGTB 1 1

Vs3 1 1 1

Vs2 1

Configuration number 2.

F1911 F2037 F1914

CGTB 1 1

Vs3 1 1

Vs2 1

Configuration number 3.

F1911 F1913 F1914

CGTB 1

Vs3 1 1

Vs2 1 1

Configuration number 4.

F2037 F1911 F1913

CGTB 1 1

Vs3 1 1 1

Vs2 1

Configuration number 5.

F2037 F1911 F1914

CGTB 1 1

Vx3 1 1

Vs2 1

Configuration number 6.

F2037 F1913 F1914

CGTB 1

Vx3 1 1

Vs2 1 1

BLOCK 13

F525 F1903 F1903 F1918

M23 x x x x

Vr1 x x x x

Configuration number 1.

F525 F1903

M23 1 1

Vr1 1 1

Configuration number 2.

F525 F1903

M23 1 1

Vr1 1 1

Configuration number 3.

F525 F1918

M23 1 1

Vr1 1 1

Configuration number 4.

F1903 F525

M23 1 1

Vr1 1 1

Configuration number 5.

F1903 F1903

M23 1 1

Vr1 1 1

Configuration number 6.

F1903 F1918

M23 1 1

Vr1 1 1

Configuration number 7.

F1903 F525

M23 1 1

Vr1 1 1

Configuration number 8.

F1903 F1903

M23 1 1

Vr1 1 1

Configuration number 9.

ภาพที่ 119 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 9, Block 10 และ Block 13 (ต่อ)

	F1903	F1918
M23	1	1
Vr1	1	1
Configuration number 10.		
	F1918	F525
M23	1	1
Vr1	1	1
Configuration number 11.		
	F1918	F1903
M23	1	1
Vr1	1	1
Configuration number 12.		
	F1918	F1903
M23	1	1
Vr1	1	1

ภาพที่ 120 แสดง Relative Order Matrix ของ Block 9, Block 10 และ Block 13 (ต่อ)

ในกรณี Block 9 จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมรูปแบบที่ 3 เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นไปตามข้อที่ 1 และ 3 ของ Relative Order Matrix โดยใช้ตัวแปร F1907 ซึ่งเป็นอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการล้างสารละลาย TBP จากถังพัก TS19-6 และใช้ตัวแปร F1909 ควบคุมปริมาณของสารละลายในหอล้าง XM19-2 (V_{x2}) และในกรณี Block 10 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 6 รูปแบบเพื่อควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก TS19-2 (V_{s2}) ปริมาณของสารละลายในหอสกัด XM19-3 (V_{x3}) และความเข้มข้นของไอออนของสิ่งเจือปนในสายของสารละลาย TBP (CGTB) โดยใช้ตัวแปร F1911, F2037, F1913 และ F1914 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ ซึ่งในกรณีนี้ไม่สามารถเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ Relative Order Matrix ได้ เนื่องจาก Block 10 ให้ Relative Order Matrix ที่มีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งจากการพิจารณาโดยใช้หลักการเลือกตัวแปรกระบวนการต่าง ๆ ใช้ตัวแปร F1911 ควบคุมความเข้มข้นหรือความบริสุทธิ์ของสารละลาย TBP (CGTB) เนื่องจากสามารถปรับอัตราการไหลเพื่อทำให้เกิดระยะเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีขึ้น (Guideline 5) นอกจากนี้จะใช้ F1913 ควบคุมปริมาณสารละลายที่อยู่ในหอสกัด (V_{x3}) และใช้ตัวแปร F1914 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลายควบคุมปริมาณของสารละลายในถัง TS19-2 (V_{s2}) เนื่องจากตัวแปร F1913 และ F1914 จะให้ผลในการควบคุมตัวแปรได้โดยตรง ในกรณี Block 11 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังพักสารละลายที่ 5 (TS19-5) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F1910 และ F1912 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F1912 ซึ่งเป็นอัตราการไหลออกของสารละลาย TBP ที่ผ่านการล้างด้วยน้ำแล้วควบคุมปริมาณสารละลายในถัง TS19-5 (V_{s5}) เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) ในกรณี Block 12 จะมีรูปแบบในการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังพัก TS19-1 (V_{s1}) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F2034 และ F1902 ซึ่งในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F1902 ควบคุมปริมาณสาร

ละลายในถังพัก TS19-1(Vs₁) เนื่องจาก F1902 เป็นสายออกของสารละลายจากถัง สามารถปรับได้รวดเร็วและให้ผลต่อระดับของสารละลายโดยตรง (Guideline 5) และในกรณี Block 13 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด 12 รูปแบบในการควบคุมความเข้มข้นของกรดไนตริก (M23) ในสารละลายและปริมาณสารละลายที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ TR19-1 (Vr1) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F525, F1903, F1803 และ F1918 ตามลำดับ จากการพิจารณาในลักษณะเดียวกันกับ Block อื่น ๆ จะไม่สามารถเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมโดยใช้ Relative Order Matrix ได้เนื่องจาก Relative Order Matrix ที่ได้จะมีลักษณะเหมือนกัน จากการใช้หลักการเลือกตัวแปรกระบวนการที่เหมาะสมจะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 3 โดยใช้ตัวแปร F525 ควบคุม M23 ซึ่งเป็นความเข้มข้นของกรดไนตริกในสารละลาย เนื่องจาก ตัวแปรปรับกระบวนการ F525 เป็นสายของสารละลาย NaOH 20% ซึ่งจะมีผลทำให้ทำปฏิกิริยาเคมี ภายในของผสมกับกรดไนตริกที่อาจคิดมาเกิดได้ดีและให้ผลรวดเร็วต่อความเข้มข้นของ HNO₃ ในสารละลาย (Guideline 5) และใช้ตัวแปร F1918 ซึ่งเป็นสายออกควบคุมปริมาณของสารละลาย (Vr₁) เนื่องจากให้ผลการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) สำหรับรูปแบบการควบคุมของกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 40% จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ทั้งหมด 864 รูปแบบการควบคุม เมื่อทำการวิเคราะห์ โดยใช้กรรมวิธีข้างต้นจะได้รูปแบบการจัดระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังตารางที่ 21

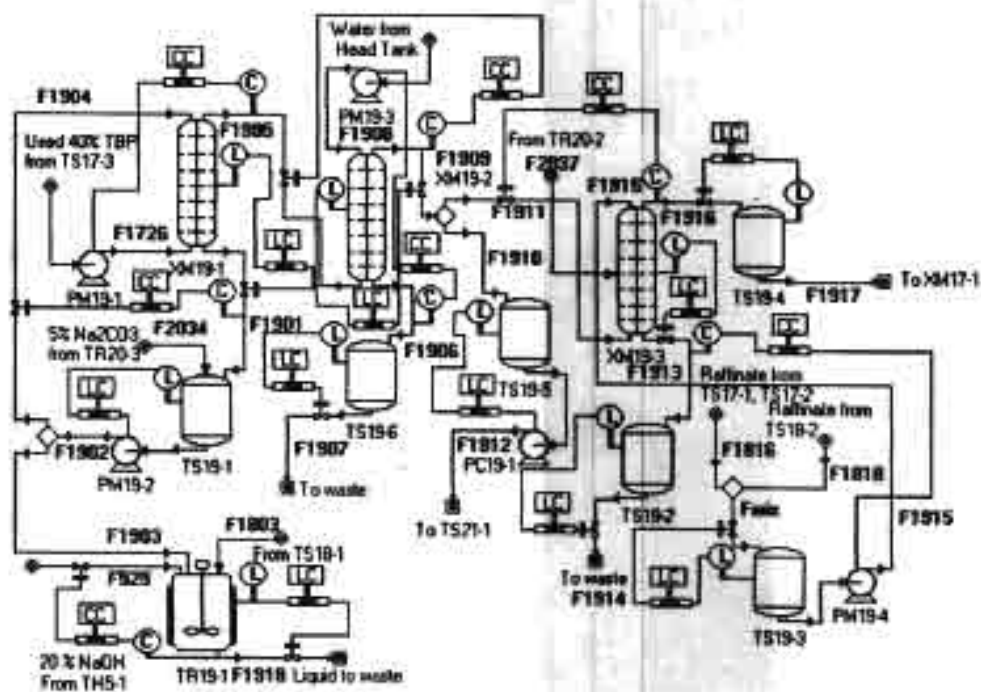
ตารางที่ 21 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 40 %

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	CGT	F1726
2	CLS	F1904
3	CGT2	F1905
4	CLW	F1908
5	CLHN	F1915
6	Vs4	F1916
7	Vs3	Fmix
8	Vx1	F1901

ตารางที่ 21 (ต่อ)

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
9	Vs6	F1907
10	Vx2	F1909
11	CGTB	F1911
12	Vx3	F1913
13	Vs2	F1914
14	Vs5	F1912
15	Vs1	F1902
16	M23	F525
17	Vr1	F1918

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 40% เมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 121 ซึ่งกระบวนการนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 10 หน่วยปฏิบัติการ และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้างพบว่าได้รูปแบบการควบคุมซึ่งประกอบด้วยการควบคุมระดับ (LC) 10 ลูป และการควบคุมความเข้มข้น (CC) 7 ลูป รวมทั้งหมด 17 ลูปควบคุม



ภาพที่ 121 แสดงกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 40% เมื่อใช้รูปแบบควบคุมกระบวนการ

2.22 หน่วยคืบสภาพ TBP (หน่วยที่ 21)

ไปยังถังล้างสารละลาย TBP จากสารละลายชั้นกลางที่มาจากถังปรับสภาพ TBP นั้นจะมี Kerosene และสารละลายกรดผสมอยู่จึงต้องนำมาล้างให้หมดครตกด้วยน้ำ ซึ่งสารละลายที่ผ่านการล้างด้วยน้ำแล้วจะมี Kerosene ผสมอยู่ด้วย จึงต้องนำมาผ่านกรรมวิธีการกลั่นแยกที่ 110 องศาเซลเซียส และความดัน 110 มิลลิเมตรปรอท ซึ่งในที่สุดจะได้ TBP ออกมา และส่งไปยังหน่วยสถานีเคมีภัณฑ์เพื่อนำไปใช้งานต่อไป

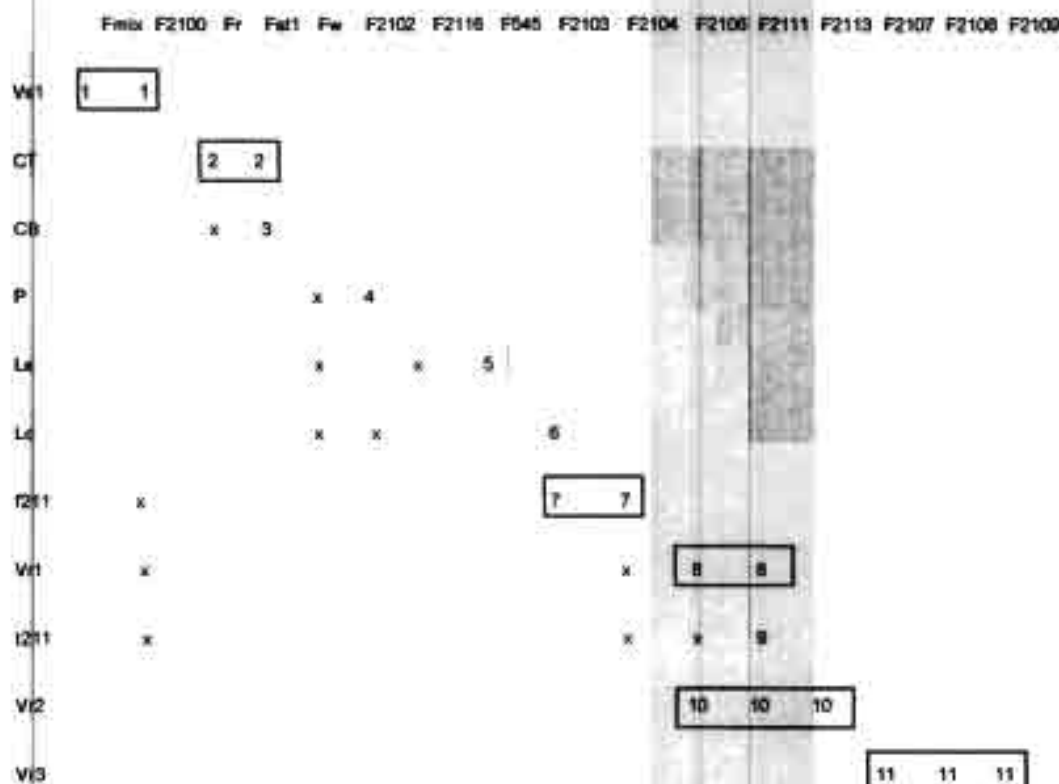
2.22.2.3 รายละเอียดของผลที่ได้จากโปรแกรมและการวิเคราะห์

หน่วยกระบวนการคืนสภาพ TBP สามารถสร้าง CEM ของแต่ละหน่วยอุปกรณ์เช่นเดียวกับกระบวนการอื่น ๆ ในกรณีนี้จะได้ CEM จำนวน 5 CEM เนื่องจากมีจำนวนอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม 5 หน่วยอุปกรณ์ ซึ่งจากการวิเคราะห์ Generic Rank ของแต่ละ CEM ไม่พบความบกพร่องเชิงโครงสร้างของ Generic Rank สำหรับขั้นตอนวิเคราะห์ "Non-local path" ของระบบดังกล่าวจะไม่พบ "Non-local path" เกิดขึ้น หลังจากการเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "Assembling" เพื่อรวม CEM เป็น Plant Wide CEM จะมีผลทำให้จำนวนตัวแปรปรับกระบวนการลดลงจาก 20 เหลือเพียง 19 ตัวแปรเพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการทำ "System pairing" ต่อไป

ในขั้นตอนการทำ "System pairing" กับ Plant Wide CEM จะพบว่าเมื่อใช้กรรมวิธี "Diagonal partitioning" จะทำให้เกิด Block ที่มีตัวแปรปรับกระบวนการมากกว่าตัวแปรที่ต้องการควบคุม และเป็น Block ที่มีขนาดใหญ่ทำให้เกิดรูปแบบการควบคุมจำนวนมากมาย ด้วยเหตุนี้จึงใช้กรรมวิธี "Reverse-partitioning" เพื่อกำจัดตัวแปรปรับกระบวนการและลดขนาดของ Block ให้มีขนาดเล็กลงรวมทั้งเป็นการลดรูปแบบการควบคุมให้น้อยลงด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการทำ "System pairing" สามารถแสดงรายละเอียดได้ดังภาพที่ 191 ดังนี้

ผลที่ได้จากขั้นตอนการทำ "System pairing" ดังภาพที่ 123 จะพบว่าใน Block 1 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุม Vs₁ ซึ่งเป็นระดับของสารละลายในถังพักสารละลาย TS21-1 โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ Fmix และ F2100 ในกรณีนี้จะเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 2 โดยใช้ตัวแปร F2100 ซึ่งเป็นสายออกของสารละลายจากถังผสมเนื่องตัวแปรปรับกระบวนการดังกล่าวสามารถปรับได้ง่ายและให้ผลกระทบโดยตรงต่อปริมาณสารละลาย (Guideline 5) ในกรณี Block 2 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบในการควบคุมความเข้มข้นของสารละลายผลิตภัณฑ์ยอทธอ (CT) โดยใช้ตัวแปร Fr และ Fst1 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ จากการพิจารณาโดยใช้หลักการดังกล่าวแล้วจะพบว่า Fr ซึ่งเป็นสายป้อนกลับของสารละลายจาก Accumulator จะให้ผลในการควบคุม CT โดยตรง

(Guideline 5) มากกว่า Fst1 ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ Fr ควบคุม CT ในกรณี Block 7 จะมีรูปแบบการควบคุม 2 รูปแบบเช่นเดียวกันในการควบคุมอัตราส่วนการป้อนสารละลายเพื่อเข้าทำปฏิกิริยาเคมี (f211) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F545 และ F2103 เนื่องจากในกรณีนี้จะเลือกใช้รูปแบบการควบคุมที่ 1 โดยใช้ตัวแปร F545 เนื่องจากสาย



ภาพที่ 122 แสดงผลที่ได้จากการทำ "System pairing" ของหน่วยกระบวนการที่ 21

F545 เป็นสายของสารละลาย H_2SO_4 ซึ่งจะใช้ในการทำปฏิกิริยาเคมี (Reactants) ควบคุม f211 เนื่องจากจะให้ผลการควบคุมโดยตรง และสายของน้ำ (F2103) ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องในการทำปฏิกิริยาเคมีดังกล่าว ในกรณี Block 8 จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 2 รูปแบบเช่นเดียวกันในการควบคุมปริมาณสารละลายที่อยู่ในถังปฏิกรณ์ TR21-1 (Vr_1) โดยใช้ตัวแปร F2103 และ F2104 เนื่องจาก F2104 เป็นสายออกของสารละลายจากถังปฏิกรณ์ TR21-1 ดังนั้นตัวแปร F2104 จะให้ผลในการควบคุมปริมาณสารละลาย (Vr_1) ได้เร็วและให้ผลในการควบคุมโดยตรง (Guideline 5) ในกรณี Block 10 จะมีรูปแบบในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังปฏิกรณ์ TR21-2 (Vr_2) โดยใช้ตัวแปรปรับกระบวนการ F2113, F2106 และ F2111 3 รูปแบบการควบคุม ในกรณี Block 11 จะมีรูปแบบการควบคุม 3 รูปแบบเช่นเดียวกันในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังปฏิกรณ์ TR21-3 (Vr_3) โดยใช้ตัวแปร F2107, F2108 และ F2109 เป็นตัวแปรปรับกระบวนการ จากการพิจารณาในลักษณะเดียวกันจะพบว่ารูปแบบการควบคุมที่

3 ของทั้ง 2 Block จะให้รูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมโดยการใช้ F2113 ควบคุม Vr_2 และใช้ F2109 ควบคุม Vr_3 เนื่องจากตัวแปรปรับกระบวนการทั้ง 2 ตัวแปรให้ผลในการควบคุมปริมาณสารละลายในถังปฏิกรณ์ TR21-2 และ TR21-3 ได้โดยตรงและรวดเร็ว (Guideline 5, 7) สำหรับรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ของกระบวนการคั่นสภาพสารละลาย TBP จะมีรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้ 140 รูปแบบการควบคุม เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้กรรมวิธีข้างต้นจะได้รูปแบบการจับคู่ระหว่างตัวแปรปรับกระบวนการกับตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่เหมาะสมดังตารางที่ 22 ดังนี้

ตารางที่ 22 แสดงรายละเอียดรูปแบบการควบคุมที่เลือกของกระบวนการคั่นสภาพสารละลาย TBP

คู่ของตัวแปรที่	ชนิดของตัวแปรและการจับคู่	
	ตัวแปรที่ต้องการควบคุม	ตัวแปรปรับกระบวนการ
1	2100	
2	CT	Fr
3	CB	Fst1
4	P	Fw
5	La	F2102
6	Lc	F2116
7	f211	F545
8	Vr1	F210
9	t211	F2104
10	Vr2	F2113
11	Vr3	F2109

สำหรับรูปแบบการควบคุมกระบวนการคั่นสภาพสารละลาย TBP เมื่อเลือกรูปแบบการควบคุมข้างต้นในการควบคุมกระบวนการ จะได้รูปแบบการควบคุมกระบวนการดังภาพที่ 123 ซึ่งกระบวนการนี้ประกอบด้วยหน่วยปฏิบัติการย่อยทั้งหมด 5 หน่วยปฏิบัติการ และจากการวิเคราะห์และคัดเลือกเชิงโครงสร้าง พบว่าได้รูปแบบการควบคุมซึ่งประกอบด้วย การควบคุมระดับ (LC) 6 ลูป และการควบคุมความเข้มข้น (CC) 2 ลูป การควบคุมความดัน (PC) 1 ลูป การควบคุมเวลา (SC) 1 ลูป และการควบคุมอัตราส่วนการป้อนสาร (FC) 1 ลูป รวมทั้งหมด 11 ลูปควบคุม

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมของโรงงานแปรรูปสเปกโตรไมนาไซด์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของโรงงาน โดยอาศัยกรรมวิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการควบคุมได้เชิงโครงสร้าง และโปรแกรมต้นแบบที่ปรับปรุงและพัฒนาจากต้นแบบโปรแกรมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการยูนิกซ์ให้สามารถทำงานได้บนระบบปฏิบัติการ 32 บิตของเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลโดยใช้โปรแกรมภาษาวิชวลซีพลัสพลัสในการพัฒนาเพื่อคัดแปลงโค้ดต้นแบบให้มีลักษณะเป็นโมดูลเชื่อมโยงกัน และได้พัฒนาส่วนติดต่อกับผู้ใช้เพื่อให้สะดวกในการใช้งานและนำเสนอ การทำงานของโปรแกรมเพื่อออกแบบระบบควบคุมจะแบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนหลัก คือการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหน่วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ในแต่ละกระบวนการผลิตและสร้างเมตริกซ์สเตตสเปซของแต่ละหน่วยอุปกรณ์นั้น ๆ รวมทั้งจัดเก็บเป็นฐานข้อมูลแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรกระบวนการ การสร้างสร้างเมตริกซ์เหตุ-ผล การวิเคราะห์การใช้ตัวแปรร่วมกันระหว่างหน่วยอุปกรณ์ การปรับแต่งเมตริกซ์เหตุ-ผล การรวมกันของเมตริกซ์เพื่อสร้างเมตริกซ์ของทั้งกระบวนการ การแบ่งเมตริกซ์กระบวนการเป็นเมตริกซ์ย่อย การจับคู่ระหว่างตัวแปรกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมอย่างมีระบบ และการใช้กรรมวิธีวิเคราะห์เลือกรูปแบบการจับคู่ที่เหมาะสม และนำไปสร้างเป็นรูปแบบของวงควบคุมในแต่ละกระบวนการ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติของกระบวนการจริงต่อไป

โปรแกรมที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นดังกล่าวได้พัฒนาโปรแกรมออกเป็นโมดูลในลักษณะของกราฟฟิคโดยแต่ละโมดูลจะพัฒนาจากกรรมวิธีต่าง ๆ และจะทำงานในแต่ละกรรมวิธีซึ่งเป็นขั้นตอนในการออกแบบระบบควบคุม ทั้ง 8 ขั้นตอนดังที่กล่าวมาแล้ว โดยแต่ละขั้นตอนของการออกแบบระบบควบคุมสามารถใช้แต่ละโมดูลที่พัฒนาขึ้นทำงานอย่างอิสระเฉพาะโมดูลนั้น และสามารถทำงานติดต่อกันทุกโมดูลเพื่อให้ออกแบบระบบควบคุมได้โดยใช้หน้าตาที่ออกแบบเพื่อติดต่อกับผู้ใช้ได้ นอกจากนี้ในส่วนของการเลือกกลุ่มตัวแปรที่เหมาะสมของตัวแปรกระบวนการและตัวแปรที่ต้องการควบคุมในบางขั้นตอน จะมีการติดต่อบริหารข้อมูลกับผู้ใช้โดยใช้หน้าตาที่พัฒนาขึ้นรับข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในการเลือกกลุ่มตัวแปรที่เหมาะสมต่อไป

โปรแกรมดังกล่าวได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องกับต้นแบบโปรแกรมต้นแบบเดิมที่ทำงานบนระบบปฏิบัติการยูนิกซ์โดยใช้ข้อมูลของกระบวนการ Expanded Williams-Otto เพื่อสร้างระบบควบคุม ซึ่งผลที่ได้จากการใช้โปรแกรมที่ปรับปรุงและพัฒนาดังกล่าวให้ผลสอดคล้องกับผลที่ได้จากโปรแกรมต้นแบบและจากการใช้โปรแกรมที่ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นออกแบบระบบควบคุมของโรงงานโมนาไซด์ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. กระบวนการที่ออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติมีจำนวนทั้งสิ้น 19 หน่วย กระบวนการผลิต จาก 22 หน่วยกระบวนการผลิต โดยจัดหน่วยกระบวนการที่ 5, 11 และ 20 เนื่องจากเป็นสถานที่ใช้ในการเตรียมและพักสารเคมีภัณฑ์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการกระบวนการ

2. กระบวนการที่ออกแบบระบบควบคุมมีจำนวนอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการสร้างระบบควบคุมดังรายละเอียดในตารางที่ 23

ตารางที่ 23 แสดงจำนวนอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุมของแต่ละหน่วยกระบวนการ ผลิต

หน่วยกระบวนการผลิต	จำนวนหน่วยอุปกรณ์ในการออกแบบระบบควบคุม
หน่วยบดแร่และคัดแร่แบบเปียก (หน่วยที่ 1-1)	10
หน่วยย่อยแร่ (หน่วยที่ 1)	4
หน่วยทำละลาย (หน่วยที่ 2)	5
หน่วยตกตะกอนเบื้องต้น (หน่วยที่ 3)	13
หน่วยผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟต (หน่วยที่ 4)	13
หน่วยผลิตซีเรียม (หน่วยที่ 6)	22
หน่วยสกัดแยกแอร์เอร์ทเป็นกลุ่ม (หน่วยที่ 7)	13
หน่วยสกัดแวนาเดียมและพราซิโอดีเนียม (หน่วย 8)	7
หน่วยสกัดแยกนีโอดีเนียมและแอร์เอร์ทกลุ่มหนัก (หน่วยที่ 9)	6
หน่วยแยกแอร์เอร์ทด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออน (หน่วยที่ 10)	23
หน่วยคืนสภาพสารละลายและตกตะกอนแอร์เอร์ทสำหรับระบบแลกเปลี่ยนไอออน (หน่วยที่ 12)	7
หน่วยตกตะกอนแอร์เอร์ท (หน่วยที่ 13)	13
หน่วยปรับสภาพ 50 % TBP (หน่วยที่ 14)	12
หน่วยสกัดยูเรเนียม (หน่วยที่ 15)	15
หน่วยสกัดซัลเฟอร์และผลิตแก๊สเหลือง (หน่วยที่ 16)	10
หน่วยสกัดทอเรียม (หน่วยที่ 17)	11
หน่วยทำละลาย (หน่วยที่ 18)	7
หน่วยตกตะกอนเบื้องต้น (หน่วยที่ 19)	10
หน่วยผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟต (หน่วยที่ 21)	5

3. จำนวนรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้จากการใช้โปรแกรมดังกล่าวออกแบบระบบควบคุมจะได้จำนวนรูปแบบการควบคุมทั้งหมดดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 แสดงจำนวนรูปแบบการควบคุมที่เกี่ยวข้องในการออกแบบควบคุมของแต่ละหน่วยกระบวนการผลิต

หน่วยกระบวนการผลิต	จำนวนรูปแบบการควบคุมที่เป็นไปได้
1 หน่วยบดแร่และคัดแร่แบบเปียก (หน่วยที่ 1-1)	2
2 หน่วยย่อยแร่ (หน่วยที่ 1)	192
3 หน่วยทำละลาย (หน่วยที่ 2)	648
4 หน่วยตกตะกอนเบื้องต้น (หน่วยที่ 3)	200
5 หน่วยผลิตไตรโซเดียมฟอสเฟต (หน่วยที่ 4)	120
6 หน่วยผลิตซีเรียม (หน่วยที่ 6)	>1000
7 หน่วยสกัดแยกแอร์เิร์ทเป็นกลุ่ม (หน่วยที่ 7)	>1000
8 หน่วยสกัดแลนทานัมและพราซีโอดีนียม (หน่วย 8)	12
9 หน่วยสกัดแยกนีโอดีเนียมและแอร์เิร์ทกลุ่มหนัก (หน่วยที่ 9)	6
10 หน่วยแยกแอร์เิร์ทด้วยระบบแลกเปลี่ยนไอออน (หน่วยที่ 10)	>1000
11 หน่วยคืนสภาพสารละลายและตกตะกอนแอร์เิร์ทสำหรับระบบแลกเปลี่ยนไอออน (หน่วยที่ 12)	84
12 หน่วยตกตะกอนแอร์เิร์ท (หน่วยที่ 13)	8
13 หน่วยปรับสภาพ 50 % TBP (หน่วยที่ 14)	128
14 หน่วยสกัดยูเรเนียม (หน่วยที่ 15)	18
15 หน่วยสกัดซ้ำและผลิตเค้กเหลือง (หน่วยที่ 16)	36
16 หน่วยสกัดทอเรียม (หน่วยที่ 17)	49
17 หน่วยปรับสภาพ 5 % TBP (หน่วยที่ 18)	24
18 หน่วยปรับสภาพ 40 % TBP (หน่วยที่ 19)	864
19 หน่วยคืนสภาพ TBP (หน่วยที่ 21)	140

4. การออกแบบระบบควบคุมดังกล่าวอาศัยทฤษฎีความสามารถในการควบคุมได้เชิงโครงสร้างของตัวแปรออก และการจับคู่ระหว่างตัวแปรกระบวนการกับตัวแปรที่ต้องการควบคุมจะเป็นรูปแบบสายเข้าเดียวและสายออกเดียว (SISO)

5. เนื่องจากในทุกกระบวนการจะมีบาง Block ซึ่งมีรูปแบบในการควบคุมมากกว่า 1 รูปแบบการควบคุมจึงมีการพิจารณาเพื่อเลือกรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสม โดยอาศัยหลักและกรรมวิธีการเลือกตัวแปรปรับกระบวนการ และตัวแปรที่ต้องการควบคุมดังกล่าวข้างต้น ซึ่งจะทำให้สามารถเลือกรูปแบบที่เหมาะสมได้ นอกจากนี้จะมีการพิจารณาตัวแปรปรับกระบวนการบางตัวให้มีผลกระทบในลักษณะอ่อนหรือมองในลักษณะเป็นตัวแปรรบกวนโดยใช้กรรมวิธีที่ 4 ซึ่งจะมีผลทำให้รูปแบบการควบคุมของ Block นั้น ๆ ลดจำนวนลงได้

6. จากรูปแบบการควบคุมที่เหมาะสมที่นำไปใช้ในการสร้างวงควบคุมของแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการต่าง ๆ ซึ่งสามารถจำแนกชนิดได้ดังตารางที่ 25

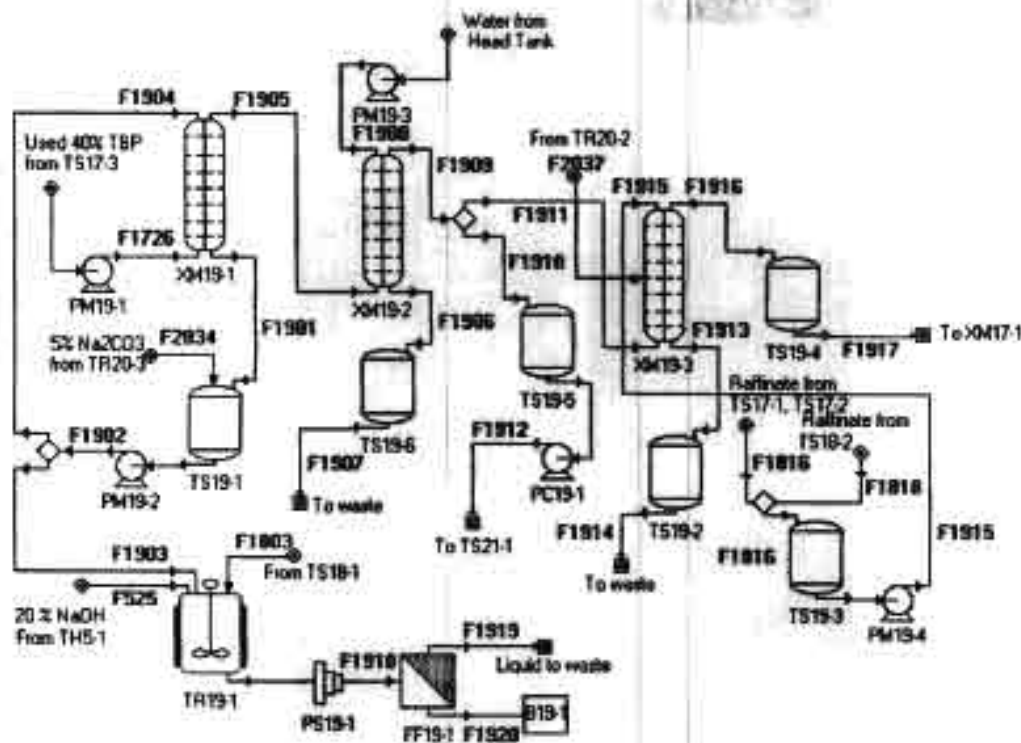
ตารางที่ 25 ชนิดของวงควบคุมที่ได้จากการสร้างระบบควบคุมของโรงงานแปรรูปภาพแร่โมนาไซด์

รูปแบบวงควบคุมที่ออกแบบ	จำนวนวงควบคุม
1. วงควบคุมความเข้มข้น (CC)	86
2. วงควบคุมความดัน (PC)	7
3. วงควบคุมอัตราการไหล (FC)	10
4. วงควบคุมความหนาแน่น (DC)	30
5. วงควบคุมอุณหภูมิ (TC)	13
6. วงควบคุมสัดส่วนการป้อนสารตั้งต้น (FRC)	27
7. วงควบคุมระยะเวลา (SC)	31
8. วงควบคุมระดับสารละลาย (LC)	160

2.20 กระบวนการปรับสภาพ TBP 40 % (หน่วยที่ 19)

2.20.1 รายละเอียดของกระบวนการและขั้นตอนการผลิตของกระบวนการ

รายละเอียดของกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 40% สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 124 ดังนี้



ภาพที่ 124 แสดงรายละเอียดกระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 40%

กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วยอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| - หอสกัดที่ 1 (XM19-1) | - ถังพักสารละลายที่ 1 (TS19-1) |
| - หอสกัดที่ 2 (XM19-2) | - ถังพักสารละลายที่ 2 (TS19-2) |
| - หอสกัดที่ 3 (XM19-3) | - ถังพักสารละลายที่ 3 (TS19-3) |
| - หอพักสารละลายที่ 4 (TS19-4) | - ถังพักสารละลายที่ 4 (TS19-4) |
| - ถังพักสารละลายที่ 5 (TS19-5) | - ถังพักสารละลายที่ 5 (TS19-5) |
| - ถังพักสารละลายที่ 6 (TS19-6) | - ถังปฏิกรณ์ที่ 1 (TR19-1) |

กระบวนการปรับสภาพสารละลาย TBP 40% เป็นกระบวนการคืนสภาพสารละลาย TBP เพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการอีกครั้งโดยการนำสารละลาย TBP 40% ที่ใช้แล้วจากถังพักที่ TS17-3 มาล้างด้วยสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตเข้มข้น 5 % โดยมวลต่อปริมาตรจากหน่วยที่ 20 สารละลายโซเดียมคาร์บอเนตที่ใช้แล้วจะถูกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ป้อนกลับไปในเครื่องปรับสภาพและอีกส่วนหนึ่งถูกส่งไปยัง ดังปฏิกรณ์ TR19-1 สารละลาย TBP ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วจะนำเข้าสู่เครื่องล้างด้วยน้ำ XM19-2 โดยการไหลสวนทางกับสารละลาย TBP เช่นเดียวกัน ส่วนหนึ่งของสารละลาย TBP จะถูกส่งไปคืนสภาพในหน่วยที่ 21 และอีกส่วนหนึ่งนำไปปรับสภาพอีกครั้งด้วยกรดไนตริกที่เครื่องปรับสภาพ XM19-3 โดยสารละลายกรด ไนตริกที่ใช้จะนำมาจากหน่วยที่ 17 และ 18 ส่วนสารละลายที่ปรับสภาพแล้วจะถูกนำไปใช้ในหน่วยที่ 17 ต่อไป

Output ที่ได้

1. การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 10, 26-28 ตุลาคม 2543 เรื่องต้นแบบโปรแกรมการสร้าง CAUSE-AND-EFFECT MATRIX ของโรงงานแปรรูปภาพแร่โมนาไซต์ โดย นายธงชัย ศรีนพคุณ, หน้า 216-224
2. การประยุกต์ใช้ทฤษฎีกราฟ โดย นายชวลิต เจริญถาวรจิต และนายสมวุฒิ คุรุทกุล โครงการปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
3. กิตติลักษณ์ ถนอมบุญชัย และ ทัชพงษ์ จันทร์ลี. 2540. การศึกษากระบวนการแปรรูปภาพแร่โมนาไซต์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Aspen Plus. โครงการปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 188 หน้า
4. ธงชัย ศรีนพคุณ 2539 Structural Modelling การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 จัดโดย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.เกษตรศาสตร์ 24-25 ตุลาคม 2539, หน้า D6.1-6.8
5. ธงชัย ศรีนพคุณ และสมวุฒิ คุรุทกุล. 2540. การวิเคราะห์กระบวนการควบคุมด้วยทฤษฎีกราฟ. การประชุมใหญ่วิชาการทางวิศวกรรมประจำปี 2540. จัดโดยวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. 20-23 พฤศจิกายน 2540. หน้า 783-800.
6. ธงชัย ศรีนพคุณ และสมวุฒิ คุรุทกุล. 2541. การประยุกต์ทฤษฎีกราฟในระบบควบคุม, วิศวกรรมสาร มข. เม.ย-มิ.ย.2541 ปีที่ 25 ฉบับที่ 2 หน้า 46-57
7. มีกฝน มนัสรังสี และ นายพิษมงคล สุวรรณแสง. 2542. การสร้างต้นแบบโปรแกรมเพื่อการออกแบบโครงสร้างระบบควบคุม. โครงการปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 82 หน้า
8. วิทยานิพนธ์เรื่อง ต้นแบบการสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติ สำหรับโรงงานแปรรูปภาพแร่โมนาไซต์ โดย นายอำนาจ นาค้าง, ปี พ.ศ. 2544, 363 หน้า
9. อุทัยวรรณ อินทร์เจริญ. 2543. การทำตุลมวลเพื่อการจำลองกระบวนการโรงงานแปรรูปภาพแร่โมนาไซต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

10. Submit Paper "Validation of Prototype Software for Process Control, Design and Evaluation based on a Structural Model I : An Introduction" By T. Srinophakun, P.A. Lant, A. Namkhang.
11. Numkang A. and T. Srinophakun. 2543 "Prototype Program Synthesis Cause and Effect Matrix of Pilot Scale Monazite Processing Plant" การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมี และเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 10 26-28 ตุลาคม BITEC กรุงเทพฯ หน้า 216-224.
12. Srinophakun, T and P.A. Lant. 1996. A Prototype Package for Control, Design and Evaluation Based on a Structural Model. 24th Australian and New Zealand Chemical Engineering Conference and Exhibition. 30 September-2 October 1996. The Wentworth Hotel Sydney Australia. P 133-138.

ภาคผนวก

Validation of Prototype Software for Process Control, Design and Evaluation based on a Structural Model I: An Introduction

T. Srinophakhun^{1*} and P.A. Lant², and A. Namkhang¹

1. Department of Chemical Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand.
2. Department of Chemical Engineering, The University of Queensland, Queensland, 4072, Australia.

***the author to whom all correspondence should be addressed.**

Tel: (662) 579 2083

Fax: (662) 579 2083

E-mail: fengtcs@nontri.ku.ac.th

Abstract

This paper presents a prototype software system developed to help process control engineers and process design engineers evaluate plant design alternatives to achieve more controllable processes. Being based on structural models; the process model can be represented by structural form of information allows an early design stage or a process improvement by exploring the qualitative information. Output structural controllability analysis is introduced and used as the core criterion to ensure that all plant-design control objectives are controllable, called a 'controlled plant'. The analysis of controllability is undertaken via the accessibility and relationship between control objectives and manipulated variables. By using graphical techniques, not only is all the accessibility of process variables addressed, but also the extent of relationship. The framework of the package contains modules to:

- acquire the structural matrix model for each unit operation,
- interactively select control objectives and manipulated variables for each unit,
- integrate the units into a complete plant, to analyze for controllability,
- report the multi-loop control pairing between the manipulated variables and control objectives, and
- evaluate the alternative control configurations.

The package utilizes both mathematical and heuristic algorithms interactively and has a library of dynamic models for some common unit operations. Furthermore, this package includes a flexible interface to commercial flowsheet packages and also a built-in expert system to help the designer in the decision-making stage. The package is demonstrated by case studies.

Keywords: Cause-and-Effect relation, Controllability, Graph theory, Process design, Relative order, Structural evaluation, Structural model.

1. Introduction

In large-scale processing industries, co-operation between the process control engineer and the process design engineer is essential. This co-operation is needed in the early phase of process design when the choice of process structure is still opened.

It is far more cost effective to consider this at an early stage. Most studies of analysis and synthesis problems in dynamic systems use numerical system models, numerical analysis and design algorithms. The use of numerical methods may, however, be tedious, unreliable and even impossible especially in large scale systems especially at early stage. For many real-world problems these limitations lead to different conclusions about the controllability of the system in an early stage of design. To overcome these limitations, qualitative structural analysis has been developed by many researchers and applied to a structural model of the system. This model, expressed in the form of structural matrices, is slightly closer to physical phenomena since it requires only information about whether or not a variable is involved in a particular equation of the system. This concept has been introduced for the synthesis of control systems by many researchers. The structural controllability criteria seek to expose the systems in which uncontrollability is caused not by numerical faults but by inherent structural characteristics.

As mentioned above, process design often relies on creativity and the decision-making phase will always require some expert knowledge. This knowledge should specifically lead to a set of variables in the control system. An expert system programming style can promisingly address this situation.

The notion of the controllability of a process structure must play a key role if we wish to integrate effectively the design of a process and its control system as alluded to earlier. Nevertheless, direct application of numerical or algebraic tests to assess the controllability of a plant suffers from several drawbacks:

1. The plant may appear to be uncontrollable due to an unfortunate choice of the parameter describing the system;
2. The problem of numerical rank determination is not trivial; and
3. The combined effort of derivation of a numerical model for the plant and of determining its controllability for various control structures could be prohibitively expensive in practice.

These difficulties can be avoided by considering only the invariant structural properties of the system. The structural approach can be the representation of the synthesis of control system (structural) design. Moreover, the evaluation of

configurations can also be achieved by implementing this approach as the searching tool.

2. Structural Controllability

The numerical controllability analysis depends on the selection (which is fortuitous) of the parameter values of the system. Even for well-behaved physical systems the condition for complete controllability may fail at isolated points. Consequently, it seems to be more satisfactory to regard the entries of A , B as indeterminate with the invariant structural properties corresponding to a dynamic system. Only some entries which are often precisely zero have exact numerical values.

In the context of "structural controllability" and of related "structural investigations", takes into account only the "structure" of the matrices. This means, instead of numerically given matrices the corresponding structural matrices of the same dimensions, are considered. The concepts of "structure" and "structural controllability" for linear control systems were defined by purely graphical considerations.

3. Output Structural Controllability

After the context of structural controllability had been introduced, much research was conducted mainly to gain a benefit of controllability analysis with qualitative information. Therefore, the controllability analysis and design procedure can be done simultaneously especially in the early stage. However, these approaches have a drawback in that they consider the states of the process rather than the output for testing the structural controllability. To overcome this limitation, the output structural controllability¹ is introduced as a core criteria in the design of all control configurations.

Definition 1 (Output structural controllability; [2])

A system is output structurally controllable if there exists independent accessibility from system inputs to all system outputs.□

From the viewpoint of structural model system, there are 3 kinds of defection in the model which will affect the controllability. They are

- The contraction of output and input (Type I)

- Lack of access to output from input (Type II)
- Access to output from other output (Type III).

Here, the concept of generating the structural model without effect from those defections is of interest. This model will guarantee the controllability of system. The relationship between input and output can imply as the 'cause' and 'effect' and represent by the graphical technique.

Definition 2 (Cause-and-Effect Digraph)

Cause-and-Effect relationships between different variables of a system can be represented by a digraph called the Cause-and-Effect digraph of the process flowsheet, where nodes in the digraph are the process variables and the directed edges show the relationships between variables. □

The digraph technique is utilized to search for all possible paths from manipulated variables to objective variables before the analysis of defective structural type II and type III. Defective structural type I is determined by considering each subsystem and nominated objective variable for deletion. The major key is to check the dimension of the subsystem after deleting the nominated objective variable in order to keep their value in some specific condition. In the process of iterations, members of excess manipulated variables and excess objective variables are selected. Finally, the set of Cause-and-Effect relationships is established in terms of the Cause-and-Effect matrix. The general idea of the algorithm is shown in Fig. 1.

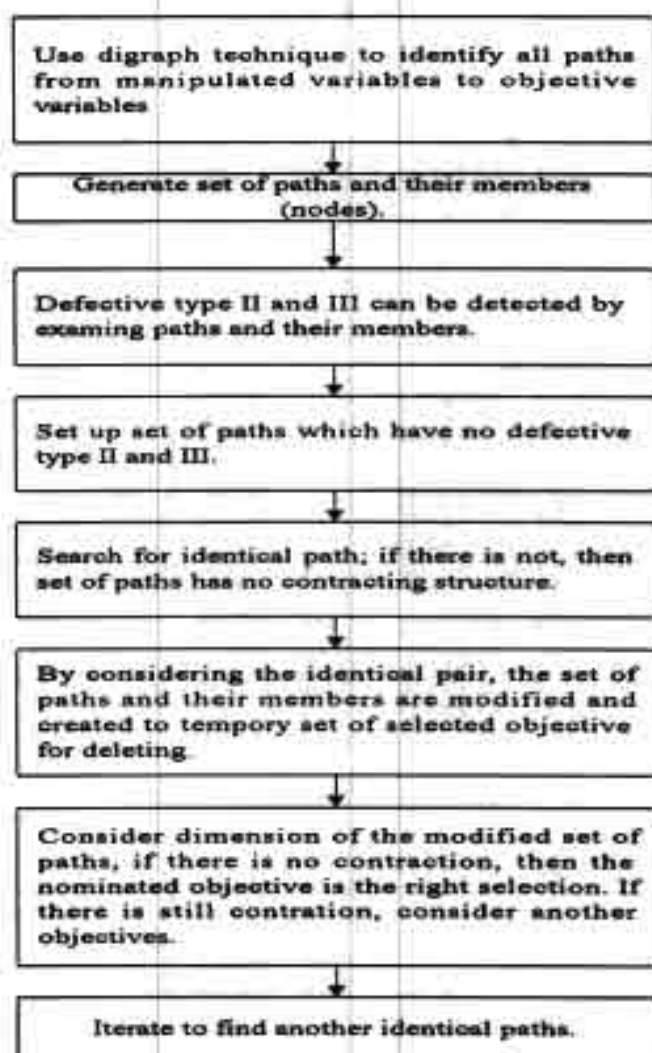


Figure 1 Flow chart of an algorithm for setting up the Cause-and-Effect Matrix

From the design point of view, all possible ways to reduce the number of essential process variables involved in the design procedure is preferable. For example, it is a better idea to link one extra manipulated variable to such an un-pair objective variable than establish new manipulated variable. Some of an individual Cause-and-Effect Matrix might possibly merge into one by simply linking between their process variables. Johnston *et al.* [5-6] first introduced an algorithm 'Non-local Path Consideration' (see in Fig.2.) in the context of the regulatory control system which can set up the path or cause-and-effect relationship between different units (Cause-and-Effect Matrices) and cause a combination of those units.

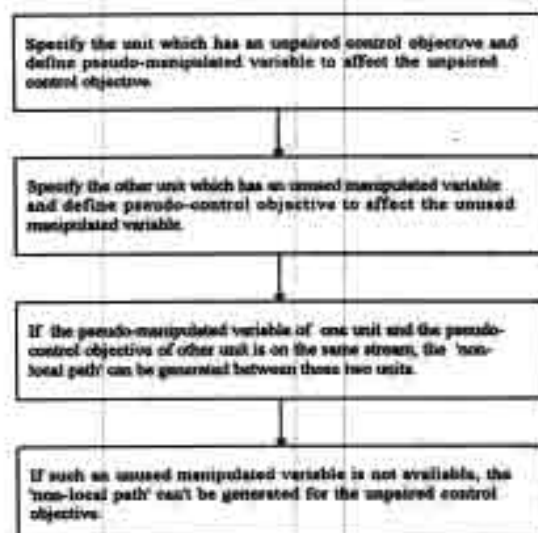


Figure 2 Non-local path analysis diagram

Usually the pairing of manipulated variables and control objectives are made within the same process unit, which is called "local" control. However, in some cases, for an individual process unit, the number of desired control objectives is greater than the number of available manipulated variables. It may still be possible to satisfy those control objectives, however, by linking the unpaired control objectives with the unused manipulated variables associated with other units. This is called "non-local" control or inter-unit pairing. However, in some cases the control objectives in one unit (in Cause-and-Effect Matrix) can manipulate the control objective(s) in another unit. It is preferable and possible to combine those Cause-and-Effect Matrices, thereby reducing the degrees of freedom of the decoupling effect. In the structural representation of a state-space system, the two-valued system description was introduced whereby the non-zero (denoted by 'x') represents some cause-and-effect relationship between two process variables, while zero sets no cause-and-effect relationship. This leads to an assumption that all non-zero relations are manipulations. However, the syntheses of large-scale chemical process becomes strongly coupled and the relationships for their process inputs and outputs are far more complicated than simply manipulations. This will produce a huge number of possible pairings of process inputs and outputs in multiple SISO control consideration. In fact, some of the cause-and-effect relationships

may appear to be disturbances rather than manipulations. If these relations (denoted by 'w') are introduced into the analysis of structural controllability and the synthesis of conventional control schemes are treated as zero, then the alternative pairing will be reduced [4]. The first modified structural matrix is a matrix having fixed zeros in certain locations and two types of arbitrary entries (denoted by 'x' and 'w' respectively) in the remaining locations instead of numeric values. An 'x' or 'w' placed at the junction of a row and a column indicates that the column variable affects the row variable in some sense of manipulation or disturbance. From this modification, the Cause-and-Effect relationships between the process inputs and the process outputs on the Cause-and-Effect Matrix can be further subdivided into manipulations ('x') and disturbances ('w'). The algorithm is shown in Fig.3.

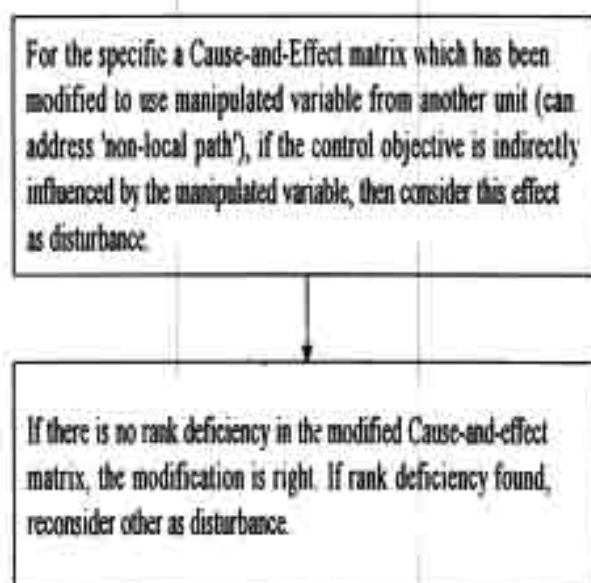


Figure 3 Diagram for modification of 'strong' or 'weak' relation, the 'weak' relation can be implemented as a disturbance.

The order of the matrix may again be reduced by simply merging the identical stream in plant layout. This Cause-and-Effect Matrix then is partitioned into the diagonal block form in order to determine the generic rank directly. The algorithms and programs are provided in the set of prototype which have ability to handle both square and non-square matrix. The algorithms are shown as below in Fig.4 and Fig.5.

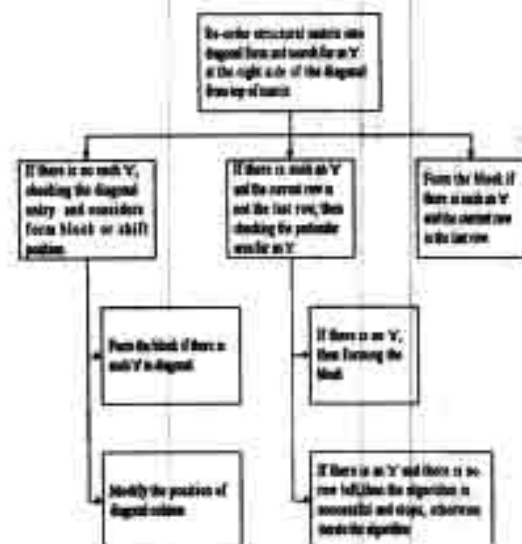


Figure 4 Diagram of Re-Order Algorithm

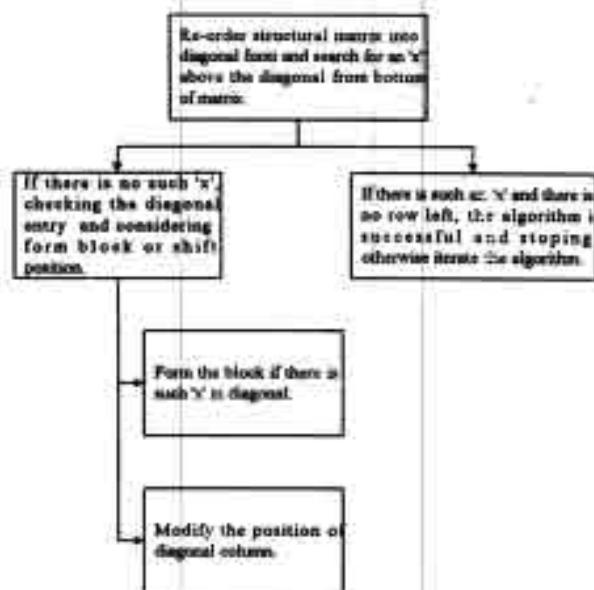


Figure 5 Diagram of Re-order supplement Algorithm

By utilizing the diagonal partition Algorithm, the Cause-and-Effect Matrix can be analyzed in each diagonal block. The benefit of this procedure is that the deficiency structural matrix of such a block can be investigated. Consequently, all possible pairing can be generated in the block by the following algorithm; a systematic pairing, which is shown in Fig. 6. The Algorithm of systematic pairing is used in some case studies. All of this procedure is done by interpreting and interacting with the prototype.

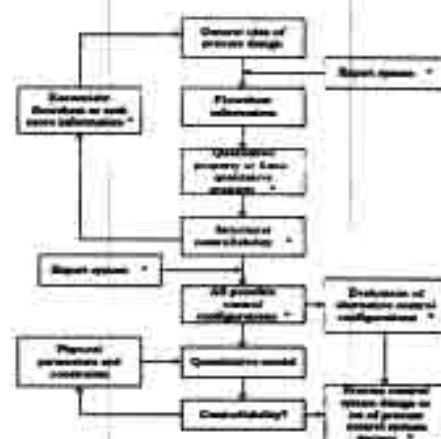


Figure 6 Systematic diagram of the synthesis of process design

An expert system is said to represent a group of computer programs, along with knowledge, information and databases, which act together to address problems that might otherwise be solved by human consultants. The heuristic procedures promise to help the designer in the early stages of process design. These procedures derive from qualitative information and are classified as 'deep knowledge'. However, they often contain sufficient information for determining and implementing optimal process conditions. Therefore, designing of a regulatory control system to keep process conditions near the optimal value is possible via an implementation of the information. The process variables are simply classified into 2 groups; input and output. The output variables are ones that ordinarily are associated with exit streams of a process or conditions inside a process vessel. Controlled variables are the subset of the output variables which are selected to be controlled in order to satisfy the plant's and control's objectives. The inputs are physical variables that affect the process outputs. Some of process inputs are specified as manipulated variables. To accomplish the designing of the control system, every state variables (the outputs) should be controlled by all available manipulated variables. This is seldom possible. Therefore, some state variables should be selected in order to regulate the system. This can be inferred as the lower-bound in process design that will satisfy the controllable condition. Hence, the heuristic procedure (as follow) may prompt some good and reasonable set of process variables. The procedure sometimes cannot be completed on a once-through pass and usually several iterations are required. When controlled variables and manipulated variables have been determined, the basic regulatory control scheme can be constructed. A selection of process variables will now be dealt within a more systematic procedure. This procedure was first presented by Newell and Lee [3].

These guidelines are hierarchical in nature. They must be treated as guidelines in a period of decision-making. A self-regulatory variable is a state variable which, after a step change in one of the input variables, will achieve a new steady state value. An integrator is an example of a non-self regulatory process variable. In fact even the self-regulatory variable can itself adjust to a new steady state, the limits or constraints of certain equipment must be taken into account. These conditions include minimum and maximum flow rates in pumps and compressors, and minimum and maximum

allowable pressures and temperature in vessels. Process constraints also play a vital role in this consideration. The constraints include quality specifications and material handling limits. Again, although the state variables have regulating behavior, if the particular processes have strong interactions or have a large number of interactions, those variables must also be controlled. Obvious examples are any fluctuations in temperature which would affect the reaction rate and the fluctuation steam pressures which would affect all steam users which they supply. The last guideline involves the satisfaction of the market. Controlling variables directly or strongly related to product quality will ensure the achievement of the process designing. The application of these guidelines is intuitive and depends upon designer experience.

Once the desired number of controlled variables has been chosen from the state variables, it is necessary to select at least the same number of manipulated variables to keep the process under control. The guidelines are also introduced in Newell and Lee.

To understand the philosophy of these guidelines, examples of each will be described. For example, consider a vaporiser which comprises an inflow and outflow stream, vapour flow and heating source (see Fig.7 and Fig.8). The mass balance on the liquid in the vaporiser is a function of the amount of liquid vaporised, inflow and outflow of liquid. Therefore, both inflow and outflow are directly available to manipulate the liquid level (guideline 5), whereas the amount of liquid vaporised which also is influenced from the energy balance equations is the so-called indirect manipulation. The sensitivity or large effect (guideline 6) between potential manipulated variables and state variables (desired controlled variables) is easily demonstrated by looking at the control of level in a reflux drum. If a distillation column operates at a steady state reflux ratio of five, it will be easier to control the level in the reflux drum by using the reflux flow rather than the distillate flow rate, since the reflux flow rate is five times larger. It is desirable that a manipulated variable affects the corresponding controlled variable as quickly as possible (guideline 7). Also, any time delays or time constants that are associated with the manipulated variable should be small relative to the dominant process time constant. To demonstrate this guideline, an amount of liquid accumulating at the bottom of a packed tower is desired to be regulated via the inflow and outflow. Changes in the inflow first moves slowly through

the packing, changing the accumulation of liquid on the packing before altering the level in the base of the tower. This is clearly slower than the outflow which has a quicker response to the level of the bottom of the tower. It is well understood that the treatment of such a process variable should avoid the interaction to another where possible (guideline 8). In practice the extent of interactions with other balances or state equations should be minimised. Again, consider the vaporiser phenomenon. If the amount vaporised is employed to regulate the accumulation of liquid in the vessel, the individual component hold-ups will be affected. This is because of the different vapour-liquid equilibrium of each components. Thus the use of the amount vaporised as a manipulated variable interacts with other state variables. Using guideline 9 alone to consider the controlling of the level in the reflux drum, it is preferable to manipulate the distillate flowrate, as manipulating the reflux flowrate may recycle disturbances back to the process. This may be in conflict with another guideline (guideline 5). The relative importance of each condition must be considered and the best compromise selected as the manipulated variable.

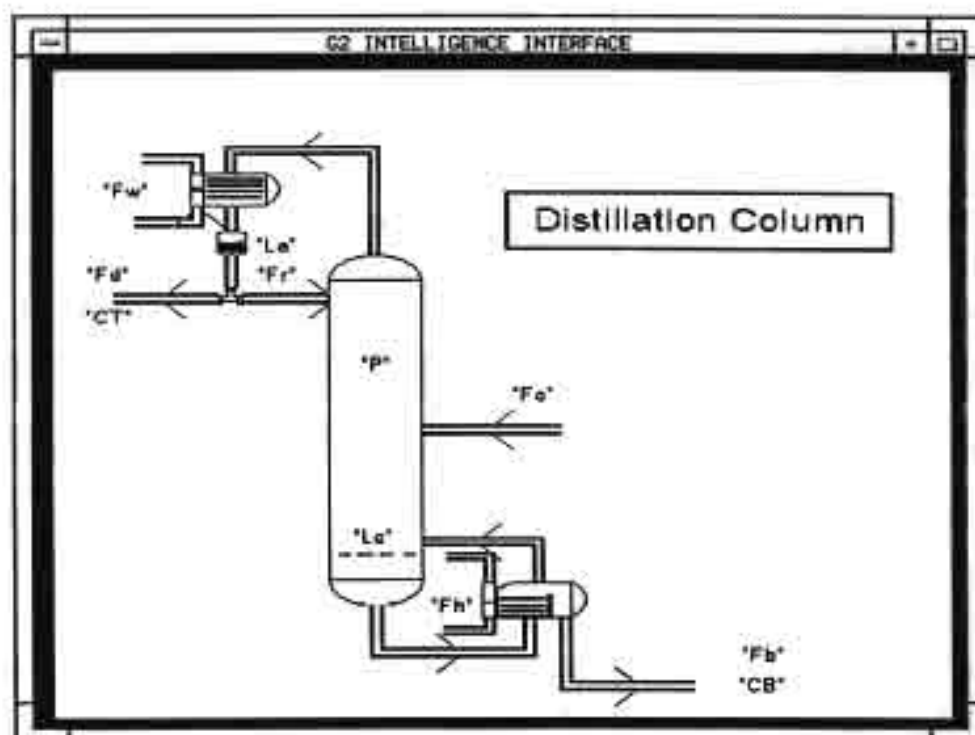


Figure 7 Distillation column

Cause-and-Effect matrix					
distillation column					
	Fd	Fb	Fr	Fh	Fu
CT			x	x	
CB			x	x	
P				x	x
La	x		x		x
Lc		x	x	x	
All possible excess manipulated variables.					
All possible excess manipulated variables.					

Figure 8 Cause-and-Effect matrix

These guidelines act as a knowledge-base system counterpart. It is designed to embed into the prototype and to support the decision-making procedure. In the early part of design, the knowledge-base is able to guide and classify process variables (control variables and manipulated variables) to build structural matrices. After generating the Cause-and-Effect Matrix, the result also gives an information of the excess manipulated variables from over-design in structural matrix and the excess objective variables from inaccessibility. The knowledge-base system can act like an assistance to consider those kind of excess variables. Some of them may be deleted to maintain the control possibility. 'Non-local path analysis' and 'system pairing procedure' need sometimes the decision-making procedure. Thus, the embedded knowledge-based system is employed.

4. Evaluation of control configuration

The graph-theoretical representation of a process lends itself naturally to the notion of a structural interaction; i.e. a structural coupling the sense of structural interdependencies between the process variables. The basic idea is that by choosing a manipulated input that is physically 'close' to a controlled variable (or has a direct

effect on it) then a good chance of obtaining favorable static and dynamic characteristics for the particular input/output pair is possible. The concept of relative order and the relation to structure model [1] will apply to the evaluation of control configurations.

Theorem 1:

Consider a (non)linear system and its corresponding digraph. Let l_{ij} denote the lengths of shortest paths omitted connecting u_i and y_j . Also, let r_{ij} be the relative orders between u_i and y_j . Then, $r_{ij} = l_{ij} - 1$. $\square$

For the matrix system which has the relative order as the element, the differences between off diagonal and diagonal relative orders provide a measure of the overall structural coupling in the system. The larger these differences, the weaker is the structural coupling in the system. In general, a ranking of the outputs according to their importance may then be helpful in order to identify the most favorable control configurations. These conclusions allow the development of heuristic guidelines for the structural evaluation of alternative control configurations.

Algorithm 1 : (rule base for the evaluation of structural matrix; Srinophakhun, 1996)

Rule 1: Since the major diagonal of the output structural matrix represents an input/output controlling pair, the lower the relative order in each major diagonal, the more direct the effect on the pair.

Rule 2: Since the off-diagonal of the output structural matrix represents a structural coupling of an input/output pair, the higher relative order in each off-diagonal in each column, the less favorable the pairing configuration.

Rule 3: Since the off-diagonal of the output structural matrix of which the value of relative order is ∞ represents an input/output no-effect pair, the bigger the amount of such an element of matrix, the less is the coupling effect of the configuration. $\square$

Example 1 (A forced circulation evaporator, [3])

The evaporation system consists of a heat exchanger unit and a vapor disengagement vessel with pumped recirculation of liquid. Vapor is condensed in the overhead exchanger. Various control configurations can be investigated for such a

system. Of primary control importance are the product concentration (C_2), the evaporator level (L_2) and the system pressure (P_2). The system has a number of manipulated variables which include the steam pressure (P_{100}), the product flowrate (F_2) and the cooling water flowrate (F_{200}). Figure 9 shows a detail of this system with the process variables.

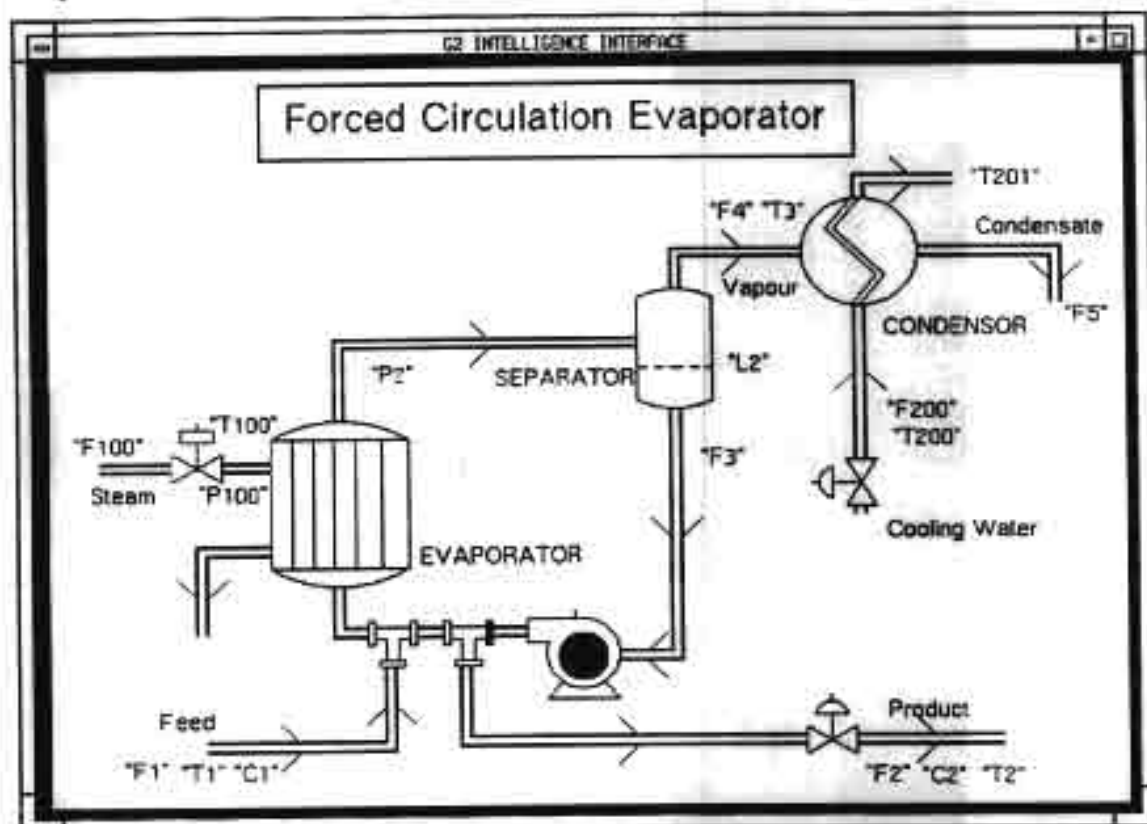


Figure 9 Forced circulation evaporator

The governing equations based on a mass balance analysis are

$$\begin{aligned}\dot{L}_2 &= f(C_2, P_2, F_2, P_{100}), \\ \dot{C}_2 &= f(C_2, F_2), \\ \dot{P}_2 &= f(C_2, P_2, P_{100}, F_{200}).\end{aligned}\tag{1}$$

The Cause-and-Effect matrix is Fig. 10. There are two configurations to control the set of objectives after applying the system pairing procedure (in Fig. 11). In order to

evaluate these two configurations, the relative order is superimposed into those matrices by applying theorem 1. All possible paths from manipulated inputs to objective outputs are shown in Figure 12. Therefore, the result from the path searching procedure can be interpreted into the cause-and-effect matrix in Figure 13.

Configuration 1 has better structural characteristics, since the diagonal entries contain the lowest value of relative order (value '1') which is the interpretation of rule 1 of algorithm 1. This analysis so far has established that relative order is a fundamental structural concept, which quantifies the notions of "direct effect" and "physical closeness", express fundamental structural limitations for control quality and allows the evaluation of structural coupling between input and output variables in a process.

Cause-and-Effect Matrix			
Forced Circulation Evaporator			
	F2	P100	F200
L2	x	x	x
C2	x		
P2	x	x	x
All possible excess manipulated variables.			
All possible excess manipulated variables.			

Figure 10 Cause-and-Effect matrix of the forced circulation evaporator

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc} & F_2 & P_{100} & F_{200} \\ C_2 & \begin{bmatrix} x & & \end{bmatrix} \\ L_2 & \begin{bmatrix} x & x & x \end{bmatrix} \\ P_2 & \begin{bmatrix} x & x & x \end{bmatrix} \end{array} \\
 \text{Configuration 1}
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc} F_2 & F_{200} & P_{100} \\ C_2 & \begin{bmatrix} x & & \end{bmatrix} \\ L_2 & \begin{bmatrix} x & x & x \end{bmatrix} \\ P_2 & \begin{bmatrix} x & x & x \end{bmatrix} \end{array} \\
 \text{Configuration 2}
 \end{array}$$

Figure 11 Two control configurations of the forced circulation evaporator

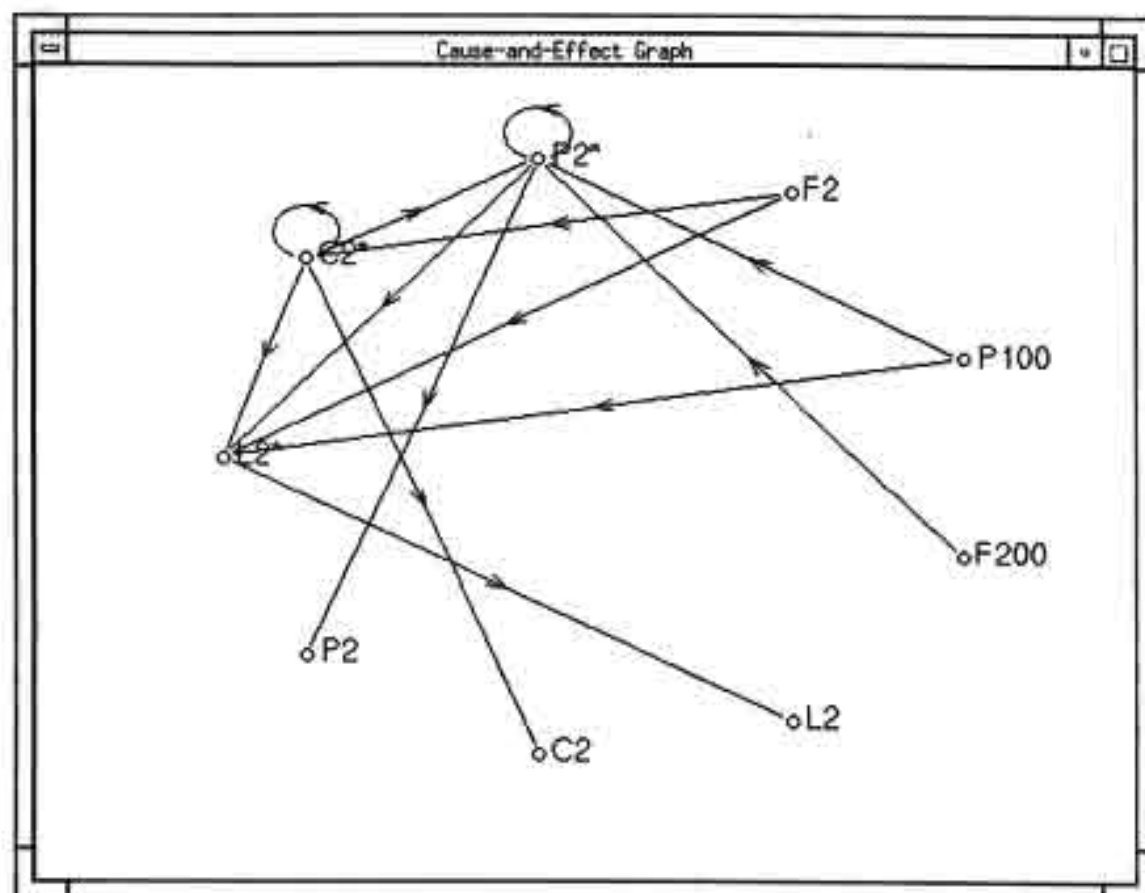


Figure 12 Cause-and-Effect graph of forced circulation evaporator

$$\begin{array}{cc}
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc}
 & F_2 & P_{100} & F_{200} \\
 C_2 & \begin{bmatrix} 1 & \infty & \infty \end{bmatrix} \\
 L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \\
 P_2 & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array} \\
 \text{Configuration 1}
 \end{array}
 &
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{ccc}
 & F_2 & F_{200} & P_{100} \\
 C_2 & \begin{bmatrix} 1 & \infty & \infty \end{bmatrix} \\
 L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \\
 P_2 & \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}
 \end{array} \\
 \text{Configuration 2}
 \end{array}
 \end{array}$$

Figure 13 Two control configurations with a detail of relative order

5. The prototype

The prototype is built up with several programs mostly coding in C computer language. It also employs the MATLABTM as the computational part for searching the

paths of digraph. The interfacial part between the prototype and the G2®, a graphical, object-oriented environment for building and developing on intelligent real-time system, is also coded. The general aim of each program is to represent each algorithm in this contribution. These programs can either work separately by themselves or work together in the prototype. It runs on Hewlett Packard® Workstation 750 under the HP-UX 9.0 operating system and Silicon Graphics® POWER CHALLENGE™ under the IRIX 6.1 operating system. To comply with the code, each of programs must stay in the specified directories. The graphical-user-interface, MOTIF® version 1.2, must be installed in the standard directory of Hewlett Packard® machine in order to comply correctly. This prototype is also developed on personal computer platform based on Window NT, Window 95 and Window 98 operating system. The development based on Visual C++ program. Graphic-user-interface is generated in some part of the prototype for convenience. The wet grinding unit in pilot scale monazite processing plant is demonstrated using this contribution package.

6. Case study

6.1 Introduction

The output structural controllability is the backbone of the structural control analysis of Lin (1991). All possible paths from manipulated variables to control objectives through state variables are generated by using a digraph technique. A new Algorithm is generated and tested. Hence, this new Algorithm can play a vital role in structural control analysis. The aim of this chapter is to generate a structural approach for the synthesis of regulatory control systems for complete plants by using an output structural controllability criterion, some heuristic guidelines, a novel Algorithm for non-local control, an assembling method, a partitioning of a structural matrix and a systematic pairing. A prototype program is generated, which comprises these heuristic and Algorithms. The proposed method is applied to a traditional test plant, the expanded Williams-Otto plant.

Example 6.1

The process studied is the original Williams-Otto Plant modified to include an extra distillation column (Column 2), a second reactor (Reactor 2) and another decanter (Decanter 2). Six organic species are involved (A, B, C, E, G and P) and the plant produces 20,000 tonnes per annum of a 98% P product. Three exothermic reactions



are carried out in the cooled stirred tank Reactor 1 to produce the desired product P from pure A and B raw materials. The by-products C and E have fuel value. Reactor 1 operates at 350 K with the hot reactor product being cooled to 311 K in Heat Exchanger 1 with cooling water to inhibit the reaction. At this temperature, the reactor product is separated into two phases in Decanter 1, the heavy phase (F4) with 50% w/w B and 50% w/w G containing all the G in the reactor product, and the light phase (F3) which is fed to Reactor 2 and gives further reaction at 360 K by the heating steam. The hot Reactor 2 product provides the heating medium for the reboiler of Column 2. This stream is further cooled to 311 K before passing to Decanter 2, where the heavy G material plus entrained B is separated out as a lower layer. The upper layer of Decanter 2 is passed through Column 1, the top product of which is 98% w/w P with 60% recovery of P. The bottom product from Column 1 is in part discarded, the remainder being recycled to Reactor 2. The heavy material from both decanters is combined and fed to Column 2, the top product being 98% w/w B with a recovery of 95% B. The top product is combined with pure B feed before passing to Reactor 1. The hot bottom product of Column 2 is cooled in Heat Exchanger 3 with the distillate, then discarded.

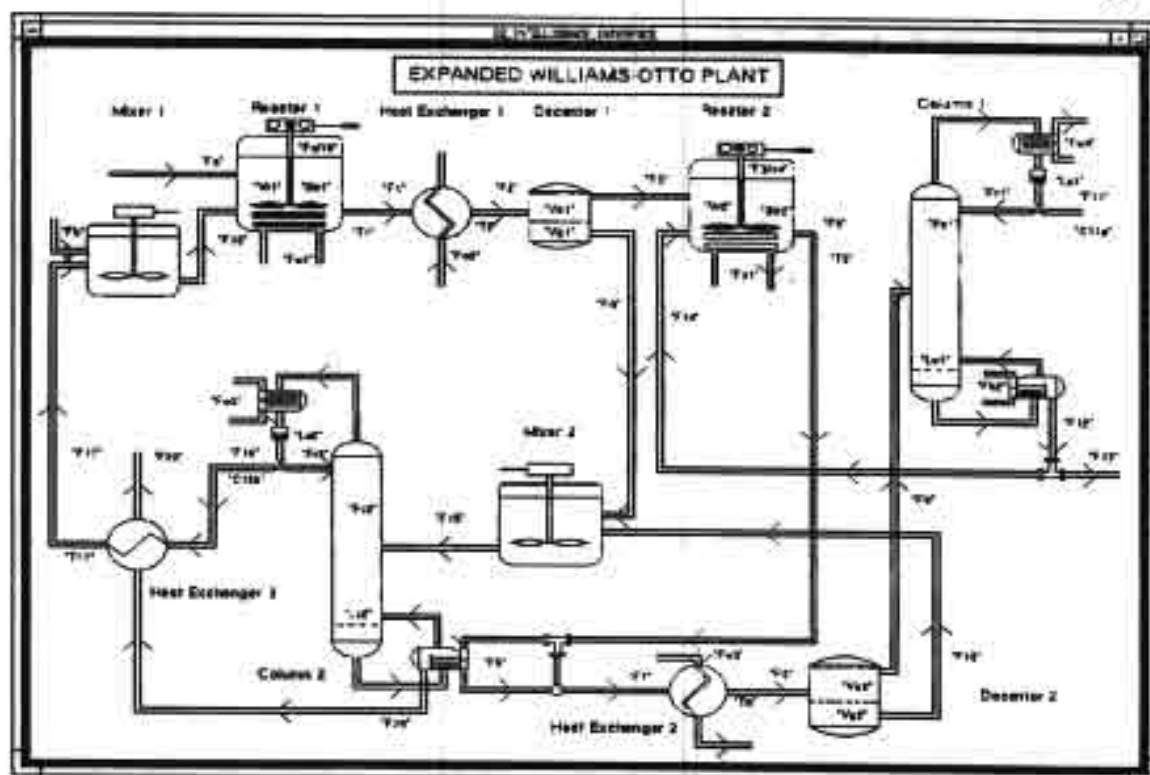


Figure 14 Expanded Williams-Otto plant

Figure 14 shows the process flowsheet and, by using the unit operation library, the Cause-and-Effect Matrix of each unit operation is set up. There are 11 units. From the regulatory requirements and the consideration of Johnston *et al.* (1985), Lin (1991) gave a summary of the selection of control objectives and possible manipulated variables to set up each Cause-and-Effect Matrix. The matrices are modified from the unit operation library and are shown in Figure 15

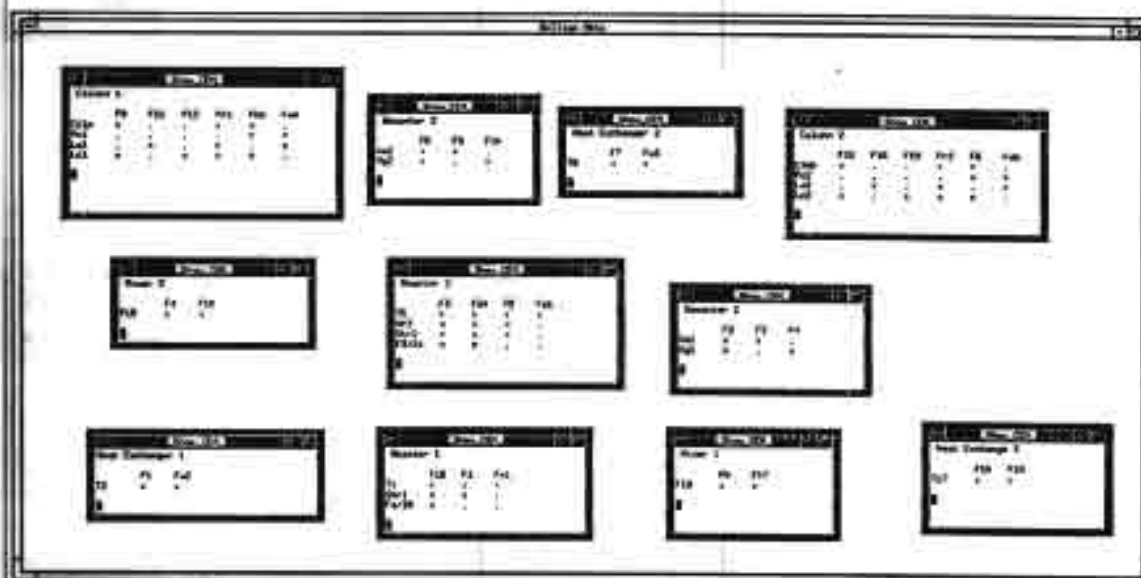


Figure 15 The Cause-and-Effect Matrices of the expanded Williams-Otto plant

From the design point of view, all possible ways to reduce the number of essential process variables involved in the design procedure is preferable. For example, it is a better idea to link one extra manipulated variable to such an un-pair objective variable than establish new manipulated variable. Some of an individual Cause-and-Effect Matrix might possibly merge into one by simply linking between their process variables. Johnston *et al.* (1985) first introduced an Algorithm 'Non-local Path Consideration' in the context of the regulatory control system which can set up the path or cause-and-effect relationship between different units (Cause-and-Effect Matrices) and cause a combination of those units.

Example 6.2 (Consider the expanded Williams-Otto plant in example 6.1)

By utilizing the prototype in further analysis of the expanded William-Otto Plant, the program shows that F15 which is an objective of Mixer 2 is also a possible manipulated variable for Column 2 (Figure 16). These two Cause-and-Effect Matrices can be combined to one Cause-and-Effect Matrix. Normally, a two-product distillation column is a 5x5 system of five inputs that can be manipulated, and five controlled variables. Three of these controlled variables (condenser, reboiler holdups and

pressure) have to be controlled to maintain stable operation. It has two degrees of freedom for the control of top and bottom composition. The Column 2 in this plant is designed to be a one point composition control with all available manipulated inputs. Therefore, F15, the feed flowrate in Column 2, is actually not available as a manipulated variable. That is, with the non-local path Algorithm the real manipulated variable needs to be set up from some other units. The Mixer 2 which connects to the Column 2 has the control objectives F15 and is able to form a non-local control path.

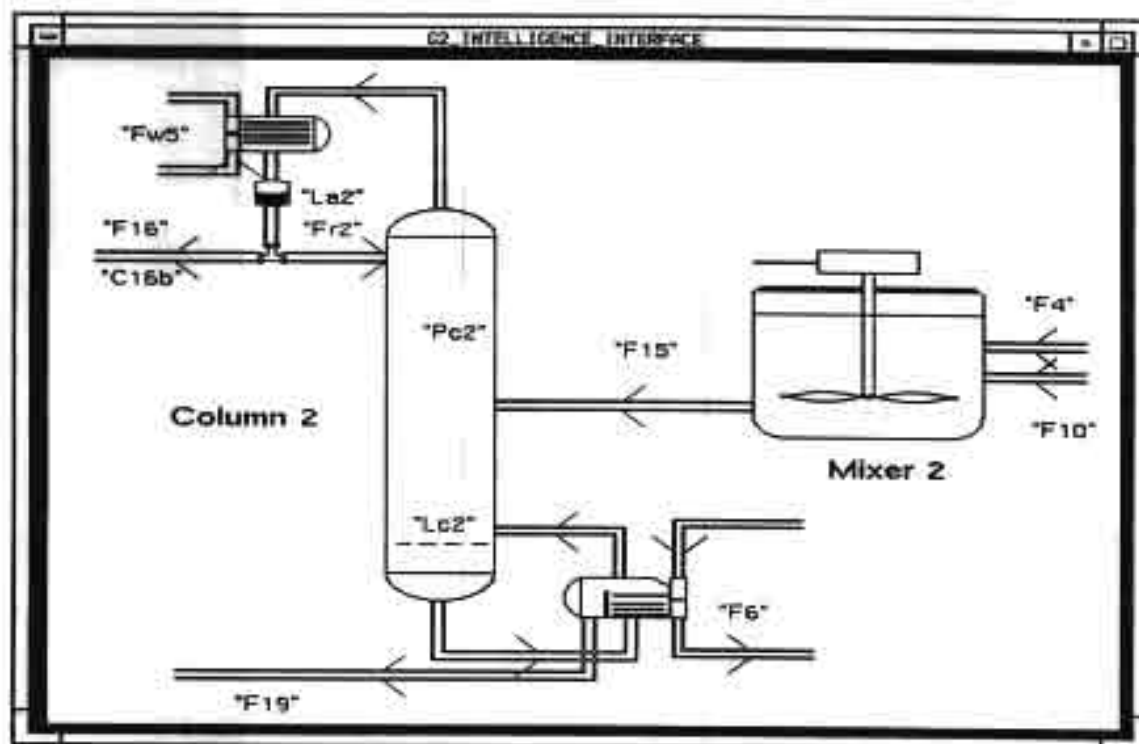


Figure 16 Section of Column 2 and Mixer 2

The combined Cause-and-Effect Matrix is

Show CEM							
Column 2 + Mixer 2							
	F4	F10	F16	F19	Fr2	F6	Fu5
C16b	x	w	.	.	x	x	.
Pc2	.	.	.	.	.	x	x
La2	.	.	x	.	x	.	x
Lc2	x	w	.	x	x	x	.

Figure 17 Combined Cause-and-Effect Matrix of Column 2 and Mixer 2

The other non-local path is formed from Reactor 1 and Mixer 1 (Figure 18) which F18 in Reactor 1 is assumed to be unavailable as a manipulated variable and also found in Mixer 1.

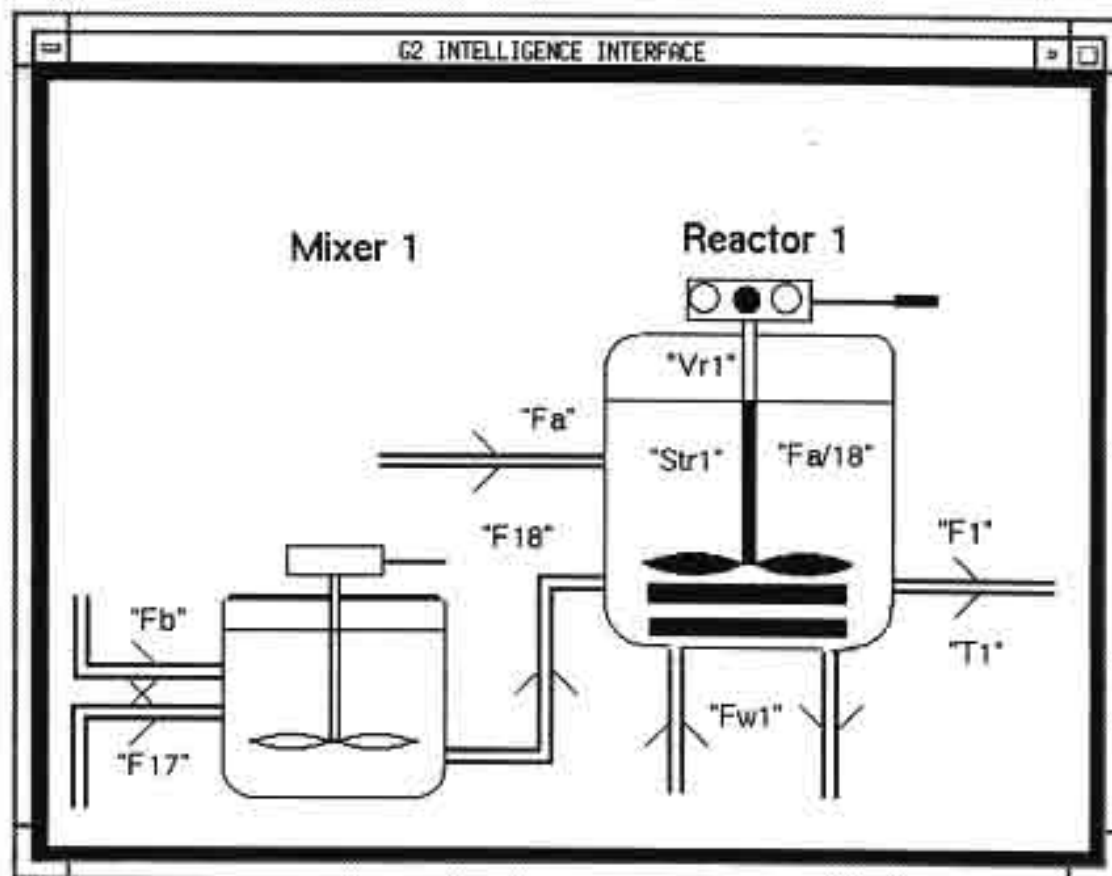


Figure 18 Section of Mixer 1 and Reactor 1

The combined Cause-and-Effect Matrix is

Show CEM					
Reactor 1 + Mixer 1					
	Fb	F17	F1	Fw1	
T1	x	w	x	x	
Str1	x	w	x	.	
Fa/18	x	w	.	.	

Figure 19 Combined Cause-and-Effect Matrix of Mixer 1 and Reactor 1

Remarks

1. During the design stage in some Cause-and-Effect Matrices, some pseudo-manipulated variables are established for the excess objective variables. This may be impossible. One solution is possible to form a non-local path of any other units with unpair (available) manipulated variable(s).
2. In the same manner, a pseudo-control objective can be used to define any control objectives which are clearly not the critical points in the regulatory control system. Hence, the pseudo-control objective will leave its manipulated variable(s) available for any other Cause-and-Effect Matrix and can combine to a considerable extent.

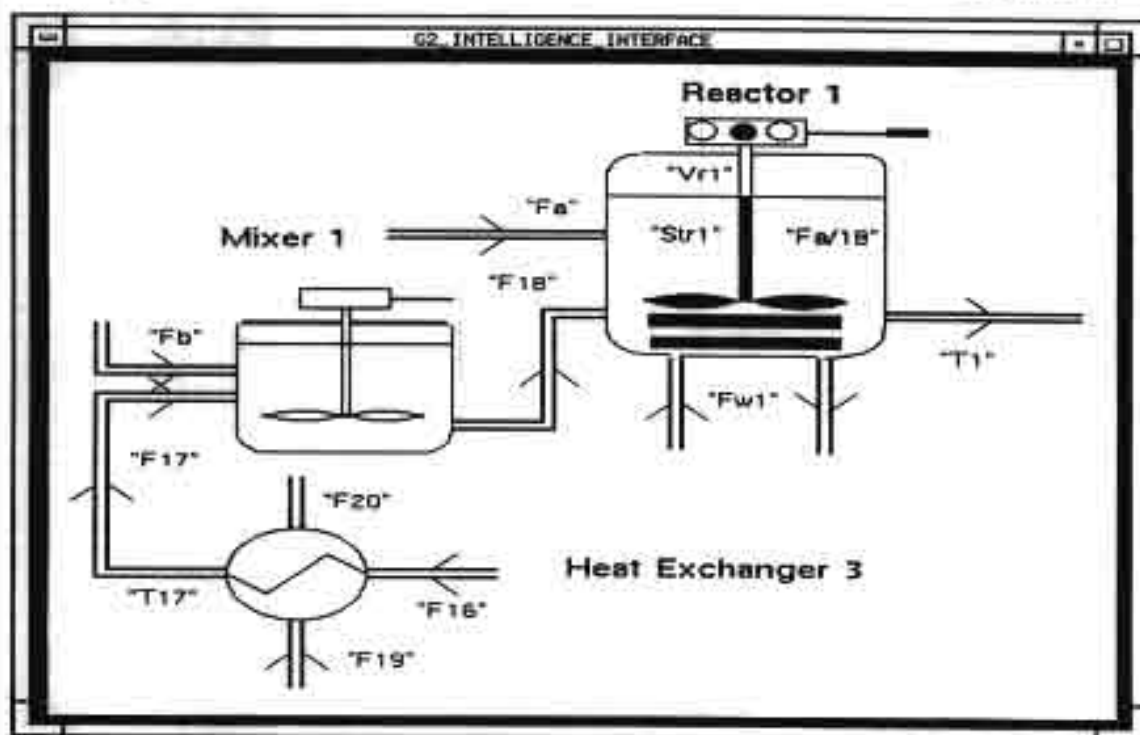


Figure 20 Section of Mixer 1, Reactor 1 and Heat Exchanger 3

T17 in Heat Exchanger 3 can be considered as a non-critical control objective, so it can be treated as a pseudo-control objective. This means the Cause-and-Effect Matrix of Heat Exchanger 3 can be merged into other Cause-and-Effect Matrices if a non-local path from T17 can be formed (Figure 21). The non-local path Algorithm was utilized and the searching found that a non-local path

$$F16 \text{ and } F19 \Rightarrow T17 \Rightarrow T1$$

can be formed. Hence, the combined Cause-and-Effect Matrix of Reactor 1, Mixer 1 and Heat Exchanger 3 can possibly be set up.

Show CEM					
Reactor 1 + Mixer 1 + Heat Exchanger 3					
	Fb	F1	Fw1	F16	F19
T1	x	x	x	x	x
Str1	x	x	.	w	.
Fa/18	x	.	.	w	.

Figure 21 Combined Cause-and-Effect Matrix of Mixer 1, Reactor 1 and Heat Exchanger 3

Conclusion

The novel non-local path consideration is introduced and verified in this problem. Three non-local paths are set up. The number of Cause-and-Effect Matrices reduces to 8. The new Cause-and-Effect Matrices show the contraction structure which needs to be reconsidered to achieve the aim of structural controllability. The contraction structure from setting up paths is:

$$F4, F16 \Rightarrow F15 \Rightarrow C16b \text{ or } Lc2,$$

$$Fb, F17 \Rightarrow F18 \Rightarrow T1 \text{ or } Str1 \text{ or } Fa/18.$$

Example 6.3 (Consider the expanded Williams-Otto plants in example 6.1)

The non-local path from combining Column 2 and Mixer 2 causes the contraction structure (2 objectives can access from 2 manipulations via 1 state variable; $F4, F16 \Rightarrow F15 \Rightarrow C16b \text{ or } Lc2$). A choice between F4 or F10 as manipulated variable will remove this contraction structure. The F4 is selected while F10 is treated

as disturbance ('w' in structural matrix Cause-and-Effect Matrix). The combined Cause-and-Effect Matrix of Column 2 and Mixer 2 is shown in Figure 22.

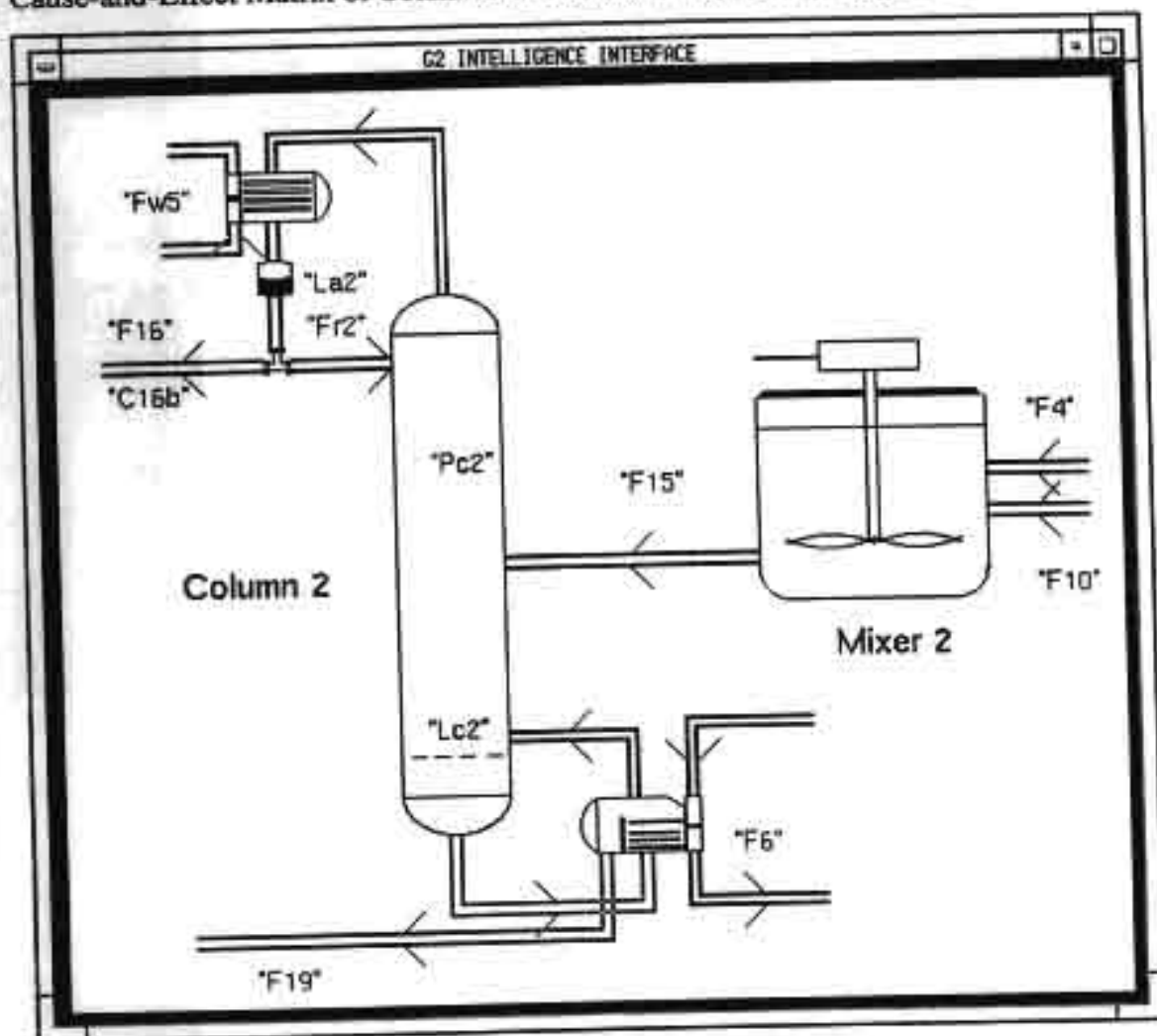


Figure 22 Combined Cause-and-Effect Matrix of Column 2 and Mixer 2 after modification

F17 is treated as disturbance to avoid contraction structure and the combined Cause-and-Effect Matrix of Reactor 1 and Mixer 1 is shown in Figure 23.

Cause-and-Effect Matrix				
Reactor 1 + Mixer 1				
	Fb	F17	F1	Fu1
T1	x	w	x	x
Str1	x	w	x	
Fa/18	x	w		

Figure 23 Combined Cause-and-Effect Matrix of Reactor 1 and Mixer 1 after modification

Finally, the combined Cause-and-Effect Matrix of Reactor 1, Mixer 1 and Heat Exchanger 3 is that in which F16 is equal to F17 and the Generic rank is 3, a full generic rank. Lin (1991) stated in detail that of this combination T17 of Heat Exchanger 3 is a non-critical objective, so F16 and F19 are available to form a non-local path, especially to the downstream unit. Therefore, the non-local path $F16, F19 \Rightarrow T15 \Rightarrow T1$ is formed. In addition, because both F17 and F16 are the same stream, F16 in the combined Cause-and-Effect Matrix will give an effect to the objectives in the same manner (except for T1).

Cause-and-Effect Matrix					
Reactor 1 + Mixer 1 + Heat Exchanger 3					
	Fb	F1	Fu1	F16	F19
T1	x	x	x	x	x
Str1	x	x		w	
Fa/18	x			w	

Figure 24 Combined Cause-and-Effect Matrix of Reactor 1, Mixer 1 and Heat Exchanger 3 after modification

This procedure is run automatically by the prototype program. The program needs an interaction with the designer at some step. After the analysis, the Cause-and-Effect Matrix of every unit reduces into 8 as shown below (Figure 25).

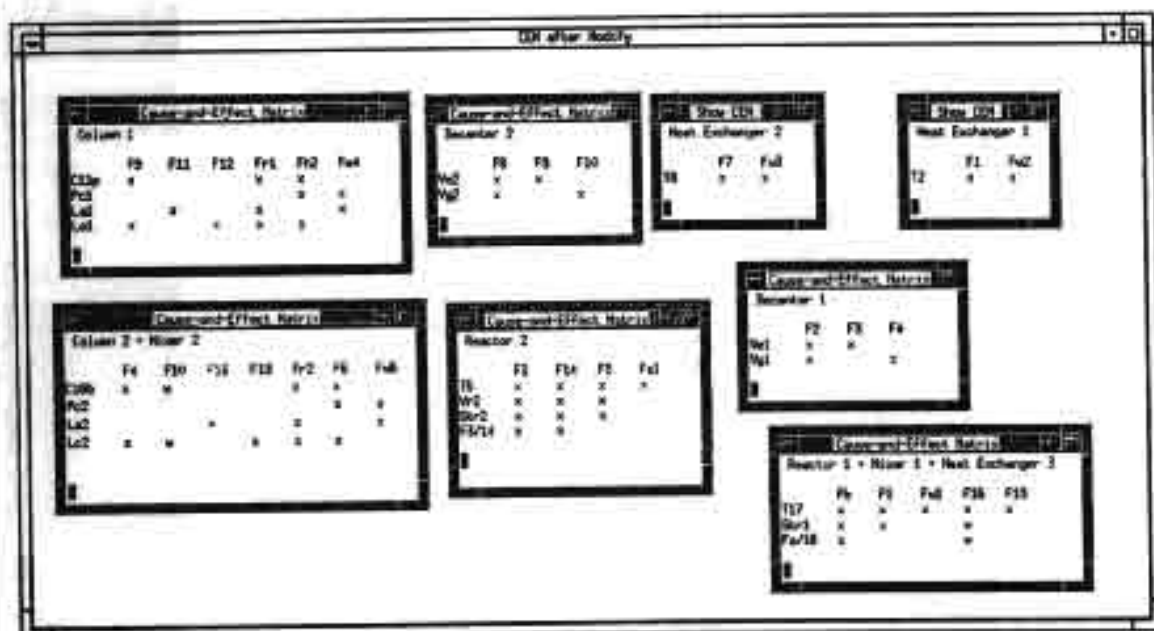


Figure 25 Cause-and-Effect Matrices after 'non-local path' analysis

Example 6.4

All process units and combined units of expanded Williams-Otto Plant are assembled (Figure 26). The Algorithm shows that either F1 or F2 can be selected in the combining procedure. Also one of F5, F7, F8 and F16 or F17. F1, F5 and F16 is selected and the relevant columns have to be merged.

The Plant's Cause-and-Effect Matrix contains 22 possible manipulated variables and 21 control objectives as shown in Figure 31. Pairings between elements from rows and column which relate by 'x' relation can be directly made on this Cause-and-Effect Matrix. If the Cause-and-Effect Matrix can be partitioned to smaller blocks in a diagonal form, the system pairing can be easily made on each block separately. In the next section, some Algorithms are introduced which may partition a structural matrix into the block diagonal form, so that the generic rank of the matrix can be directly identified.

Example 6.5 *(Conclusion after applying diagonal form into the Cause-and-Effect Matrix)*

The Cause-and-Effect Matrix can be re-ordered and diagonally partitioned into lower order diagonal blocks. In block 7, rank deficiency is found, and one control objective needs to be deleted. The less critical control objectives, Vr2 may be deleted while Str2 has to be left. Block 12 and block 13 have more columns than rows, so the diagonally reversed partition method may be applied to them for further partitioning.

Example 6.7 *(Conclusion after applying reverse diagonal form)*

The diagonally reversed partition is applied to block 12 and block 13 and the lower order diagonal can be obtained. There are two excess manipulated variables, which are revealed by blocks 12 and 16 (Figure 28). One of Fh2 and Fw4 and one of F6 and Fw5 are considered for deletion to remove the redundancy. In this analysis, Lin (1991) deleted Fh2 and F6, re-ordered the Cause-and-Effect Matrix and diagonally blocked the final Cause-and-Effect Matrix. The result is a triangular form with unique multiple SISO pairings. However, in block 12 and block 13, an alternative configuration of the pairing can be obtained by a systematic pairing Algorithm.

The Algorithm of systematic pairing is used in block 12 and block 13. The configuration in Figure 32 is one of all possible control configurations. All of this procedure is done by interpreting and interacting with the prototype.

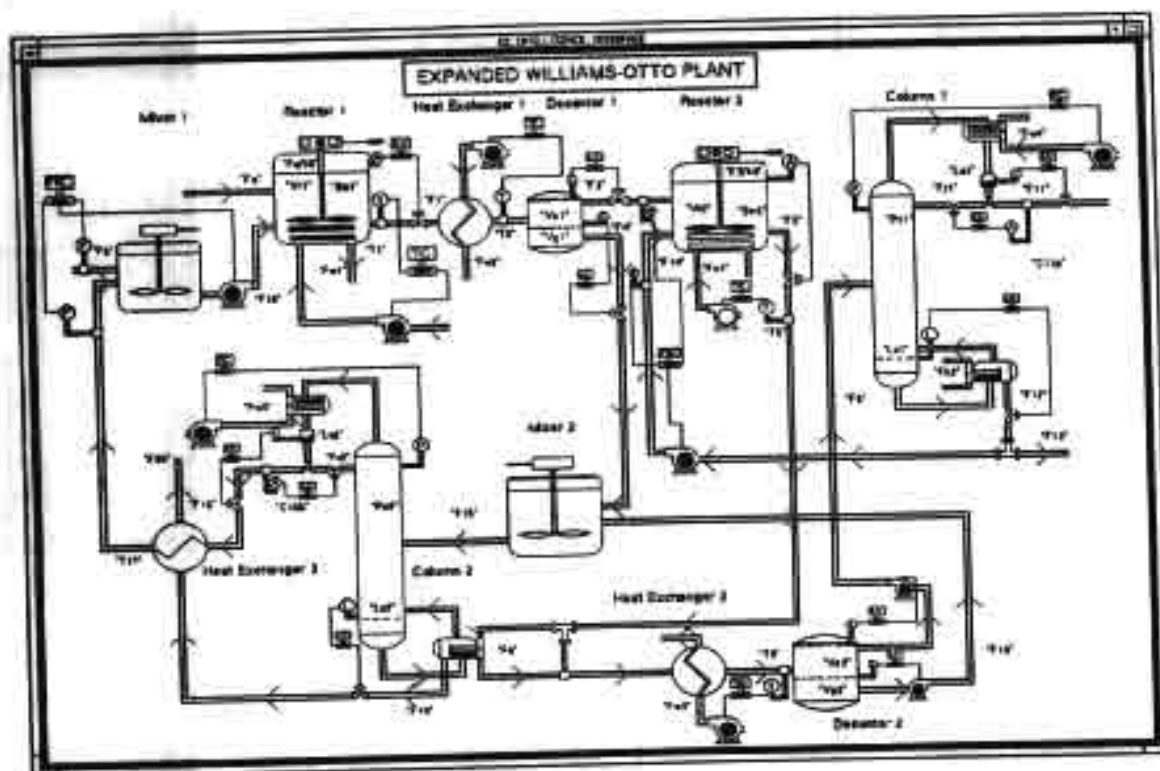


Figure 32 The expanded Williams-Otto plant with selected control configuration

7. Conclusion

When using structural approaches to synthesize control structures, the designer can alter a process flowsheet to meet the lower bound of structural controllability. Therefore, the system with structural uncontrollability can be treated without penalty before expecting the process control design system to be controllable. This structural controllability viewpoint is clearly an advantageous technique because the designer can improve the process controllability in some way by utilizing only structural information. The evaluation of all possible control configurations is approached by addressing the relative order between a pairing of manipulation and object. This relative order is detected directly from the searching of the Cause-and-Effect graph.

References

- [1] P. Daoutidis and C. Kravaris. Structural Evaluation of Control Configurations for Multivariable Nonlinear Processes. *Chem. Engng. Sci.*, Vol. 47, No.5 (1992) 1091-1107.
- [2] X.G. Lin. Structural Techniques in the Design of Control systems. PhD thesis, The University of Queensland, 1991
- [3] R.B. Newell and P. L. Lee. Applied Process Control. Prentice-Hall, NSW, Australia, 1988.
- [4] T. Srinophakun. Intelligent Advisor for Control System Designers. PhD thesis, The University of Queensland, 1998.
- [5] R.D. Johnston, G.W. Barton, M.L. Brisk. Single-Input-Output control system synthesis. Part I. *Comp. Chem. Engng.* 9(6) (1985a) 547-555.
- [6] R.D. Johnston, G.W. Barton, M.L. Brisk. Single-Input-Output control system synthesis. Part II. *Comp. Chem. Engng.* 9(6) (1985a) 557-566.

STRUCTURAL MODELING

SRINOPHAKHUN, T.

CHEMICAL ENGINEERING DEPARTMENT, KASETSART UNIVERSITY, BANGKOK,

ABSTRACT

To achieve the situation of lacking information to describe the process system, structural modeling is introduced and employed. In so doing the process model can be represented by structural form of information. This will lead to the capability to understand the process even in the very early stage of design, which some necessary information can be supplied.

This paper aims to introduce such a kind of this powerful technique which promises to help engineers in the early phase of design

การจำลองโครงสร้าง

เพื่อที่จะสามารถอธิบายกระบวนการในสถานะที่มีข้อมูลไม่เพียงพอ นั้น การจำลองโครงสร้าง (structural modeling) ถูกแนะนำและใช้เพื่อจำลองกระบวนการในรูปแบบของโครงสร้าง ดังนั้น ด้วยกรรมวิธีการจำลองดังกล่าว จะสามารถช่วยให้เข้าใจและอธิบายกระบวนการแม้อันในสถานะแรกเริ่มของการออกแบบซึ่งมีข้อมูลเพียงบางส่วนเท่านั้น

รายงานฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อแนะนำเทคนิคดังกล่าวซึ่งเชื่อว่าสามารถช่วยงานออกแบบเริ่มต้นให้กับวิศวกร

1. INTRODUCTION

In large-scale processing industries, co-operation between the process control engineer and the process design engineer is essential. This co-operation is needed in the early phase of process design when the choice of process structure is still open. It is far more cost effective to consider this at an early stage.

Most studies of analysis and synthesis problems in dynamic systems use numerical system models, numerical analysis and design algorithms. The use of numerical methods may, however, be tedious, unreliable and even impossible especially in large scale systems. For many real-world problems these limitations lead to different conclusions about the controllability of the system in an early stage of design. To overcome these limitations, qualitative structural analysis has been developed by many researchers and applied to a structural model of the system. This model, expressed in the form of structural matrices, is slightly closer to physical phenomena since it requires only information about whether or not a variable is involved in a particular equation of the system. This concept has been introduced

for the synthesis of control systems by many researchers. The structural controllability criteria seek to expose the systems in which uncontrollability is caused not by numerical faults but by inherent structural characteristics.

Usually, process design often relies on creativity and the decision-making phase will always require some expert knowledge. This knowledge should specifically lead to a set of variables in the control system. An expert system programming style can promisingly address this situation.

The notion of the controllability of a process structure must play a key role if we wish to integrate effectively the design of a process and its control system as alluded to earlier. Nevertheless, direct application of numerical or algebraic tests to assess the controllability of a plant suffers from several drawbacks:

1. The plant may appear to be uncontrollable due to an unfortunate choice of the parameter describing the system;
2. The problem of numerical rank determination is not trivial; and

3. The combined effort of derivation of a numerical model for the plant and of determining its controllability for various control structures could be prohibitively expensive in practice.

These difficulties can be avoided by considering only the invariant structural properties of the system. The structural approach can be the representation of the synthesis of control system (structural) design. Moreover, the evaluation of configurations can also be achieved by implementing this approach as the searching tool.

II. STRUCTURAL CONTROLLABILITY

The numerical controllability analysis depends on the selection (which is fortuitous) of the parameter values of the system. Even for well-behaved physical systems the condition for complete controllability may fail at isolated points. Consequently, it seems to be more satisfactory to regard the entries of A , B as indeterminate with the invariant structural properties corresponding to a dynamic system. Only some entries which are often precisely zero have exact numerical values.

In the context of "structural controllability" and of related "structural investigations", takes into account only the "structure" of the matrices. This means, instead of numerically given matrices the corresponding structural matrices of the same dimensions, are considered. The concepts of "structure" and "structural controllability" for linear control systems were defined by purely graphical considerations.

Definition 1 (Structural matrix, A)

A is called a structural matrix if its entries are either fixed to zero values or arbitrary (denoted by x) elements. An x placed at the junction of a row and column indicates that the column variable affects the row variable in some way. ■

Definition 2 (Directed graph associated with A)

Consider a structural matrix A of dimension $n \times m$. The directed graph $G(A) = (V, E)$ consists of :

1. a finite set of vertices (nodes) $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ and
2. a finite set of edges (branches) $E = \{e_1, \dots, e_m\}$.

Each edge (branch) is associated with an ordered pair of vertices (nodes). ■

Definition 3 (Generic rank of structural matrix)

Generic rank of a structural matrix A is the maximal rank that A achieves as a function of its arbitrary (non-zero) elements. ■

Definition 4 (Structural system)

A structural system S which is characterized by the sets of matrices (A, B) (or (A, B, C) , or (A, B, C, D)) is an ordered pair of those structural matrices. ■

The structural model of the system expressed in the form of structural matrices is closer to physical reality since it requires only information related to whether or not a variable is involved in a particular equation of the system.

III. OUTPUT STRUCTURAL CONTROLLABILITY

After the context of structural controllability had been introduced, much research was conducted mainly to gain a benefit of controllability analysis with qualitative information. Therefore, the controllability analysis and design procedure can be done simultaneously especially in the early stage. However, these approaches have

a drawback in that they consider the states of the process rather than the output for testing the structural controllability. To overcome this limitation, the output structural controllability¹ is introduced as a core criteria in the design of all control configurations.

Definition 5 (Output structural controllability²)

A system is output structurally controllable if there exists independent accessibility from system inputs to all system outputs. ■

From the viewpoint of structural model system, there are 3 kinds of defection in the model which will affect the controllability. They are

- The contraction of output and input (Type I)
- Lack of access to output from input (Type II)
- Access to output from other output (Type III).

Here, the concept of generating the structural model without effect from those defections is of interest. This model will guarantee the controllability of system. The relationship between input and output can imply as the 'cause' and 'effect' and represent by the graphical technique.

Definition 6 (Cause-and-Effect Digraph²)

Cause-and-Effect relationships between different variables of a system can be represented by a digraph called the Cause-and-Effect digraph of the process flowsheet, where nodes in the digraph are the process variables and the directed edges show the relationships between variables. ■

The digraph technique is utilized to search for all possible paths from manipulated variables to objective variables before the analysis of defective structural type II and type III. Defective structural type I is determined by considering each subsystem and nominated objective variable for deletion. The major key is to check the dimension of the subsystem after deleting the nominated objective variable in order to keep their value in some specific condition. In the process of iterations, members of excess manipulated variables and excess objective variables are selected. Finally, the set of Cause-and-Effect relationships is established in terms of the Cause-and-Effect matrix.

IV. EVALUATION OF CONTROL CONFIGURATION

The graph-theoretical representation of a process lends itself naturally to the notion of a structural interaction; i.e. a structural coupling the sense of structural interdependencies between the process variables. The basic idea is that by choosing a manipulated input that is physically 'close' to a controlled variable (or has a direct effect on it) then a good chance of obtaining favorable static and dynamic characteristics for the particular input/output pair is possible. The concept of relative order and the relation to structure model¹ will apply to the evaluation of control configurations.

Theorem 1:

Consider a (non)linear system and its corresponding digraph. Let l_{ij} denote the lengths of shortest paths omitted connecting u_j and y_i . Also, let r_{ij} be the relative orders between u_j and y_i . Then, $r_{ij} = l_{ij} - 1$. ■

For the matrix system which has the relative order as the element, the differences between off diagonal and diagonal relative orders provide a measure of the overall structural coupling in the

system. The larger these differences, the weaker is the structural coupling in the system. In general, a ranking of the outputs according to their importance may then be helpful in order to identify the most favorable control configurations. These conclusions allow the development of heuristic guidelines for the structural evaluation of alternative control configurations.

Algorithm 1 : (rule base for the evaluation of structural matrix³)

Rule 1: Since the major diagonal of the output structural matrix represents an input/output controlling pair, the lower the relative order in each major diagonal, the more direct the effect on the pair.

Rule 2: Since the off-diagonal of the output structural matrix represents a structural coupling of an input/output pair, the higher relative order in each off-diagonal in each column, the less favorable the pairing configuration.

Rule 3: Since the off-diagonal of the output structural matrix of which the value of relative order is ∞ represents an input/output no-effect pair, the bigger the amount of such an element of matrix, the

less is the coupling effect of the configuration. ■

This analysis so far has established that relative order is a fundamental structural concept, which quantifies the notions of "direct effect" and "physical closeness", expresses fundamental structural limitations for control quality and allows the evaluation of structural coupling between input and output variables in a process.

V. CONCLUSIONS

The process leading to the synthesis and design of processes is summarized in Figure 1. The terms "Qualitative property" and "Semi-qualitative property" refer to structural property. The systematic procedure begins with the general idea of process design and its properties. The expert system can guide and support a knowledge-base involving the information of process variables. The structural controllability analysis requires minimum criteria to justify those models. Designers need to reconsider some previous steps: flowsheet rearrangement, more information in modeling; and iterating to achieve structural controllability. The

expert system can take part in the decision-making step to reconsider and consider an oversized flowsheet. From these steps, all possible control configurations will be nominated. The designer should now consider the evaluation of the alternative configurations. More information is required to generate a quantitative analysis. The numerical model

and controllability can possibly be archived at this stage. In some cases, limited information makes this stage hard to accomplish. The evaluation based on a qualitative method should be taken into account. Finally, a process design, or set of them, emerges in which the designer can guarantee the controllability.



Figure 1. Systematic diagram of the synthesis of process design

REFERENCES

1. Daoutidis, P. and C. Kravaris (1992). Configurations for Multivariable Nonlinear Structural Evaluation of Control

Processes, *Chem. Engng. Sci.*, Vol. 47, No. 5, 1091-1107.

2. Lin, X. G. (1991). *Structural Techniques in the Design of Control systems*. PhD thesis, The University of Queensland.

3. Srinophakun, T. (1996). *Intelligent Advisor for Control System Designers*. PhD thesis, The University of Queensland.

การประยุกต์ทฤษฎีกราฟในระบบควบคุม

ธงไชย ศรีนพคุณ

ณวัฒน์ ศรุฑกุล

อาจารย์

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

เทคนิคพิเศษของทฤษฎีกราฟชื่อ Digraph จะถูกใช้เพื่อวิเคราะห์ระบบควบคุม ซึ่งเทคนิคนี้จะใช้ได้กับกระบวนการที่มีความยุ่งยากและมีขนาดสัณฐานมาก ข้อได้เปรียบอย่างมากของเทคนิคนี้คือ ความสามารถที่จะแสดงแบบจำลองคณิตศาสตร์ของกระบวนการด้วยคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง การวิเคราะห์ด้วยคุณสมบัติเชิงโครงสร้าง ทำให้วิศวกรกระบวนการ สามารถทำงานได้ แม้ในสภาวะที่มีข้อมูลจำกัด

บทความนี้จะเริ่มด้วยการปูพื้นฐานทฤษฎีกราฟ การใช้เทคนิคทางกราฟเพื่อหาค่า Determinant และการหาคุณสมบัติ Controllability และ Observability ของระบบโดยเทคนิคเชิงโครงสร้าง

An Application of Graph Theory on Control System

Thongchai Srinophakun

Somwut Krutkun

Lecturer

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering Kasetsart University

Bangkok 10900 Thailand

Abstract

Specific Graph Theory called Digraph is the criteria algorithm to analyze the control system. This technique aims to address the problem of large and complicate process system. The most advantage of the technique is their abilities to represent the mathematical model of process with their structural characteristics. To analyze problem with structural properties will allow a process engineers verify their knowledge-base even in a light information stage.

The paper will begin with the addressing the graph technique on system. The graph technique to determining the determinant of system will be followed up. Finally the controllability and observability will be revised and addressed with structural technique.

บทนำ

กระบวนการควบคุม (process control) ในปัจจุบัน ได้รับความซับซ้อนและยุ่งยากมากขึ้น ดังนั้นทฤษฎีควบคุมแบบเก่า (classical control) ซึ่งถูกจำกัดให้แก้ปัญหาได้เพียงตัวแปรกระบวนการที่จำกัดจึงไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้ จุดนี้ได้มีการทำเทคโนโลยี State Space เข้ามาจำลองกระบวนการ ซึ่งเป็นการเข้าสู่แนวทางทฤษฎีควบคุมแบบใหม่ (modern control) ซึ่งจะมองกระบวนการเป็นแบบจำลองเชิงอนุพันธ์ ถึงกระนั้นการจำลองเชิงอนุพันธ์ก็ยังมีข้อเสียคือ (K. J. Reinschke, 1988)

1. การมองกระบวนการเป็นแบบจำลอง สมการเชิงอนุพันธ์ (ordinary matrix differential equation) โดยค่าสมาชิกของเมตริกซ์จะต้องเป็นค่าที่ทราบค่าแน่นอน ซึ่งแต่ละค่าของสมาชิก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าสมาชิกใดสมาชิกหนึ่งไปจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสมาชิกอื่นที่มีความสัมพันธ์กับสมาชิกนั้นด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์แต่ละสมาชิก
2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระบวนการนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากทุกสมาชิกต้องมียุทธศาสตร์ซึ่งนำไปคำนวณได้ ในกรณีที่ระบบที่ต้องการจำลองมีขนาดใหญ่ บางครั้งไม่สามารถจะทราบค่าของตัวแปรได้ครบถ้วน ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ระบบได้แม่นยำ
3. ถ้าระบบมีขนาดใหญ่จะทำให้ขนาดของเมตริกซ์มีขนาดใหญ่ด้วย ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ และการมองความสัมพันธ์ในระบบ

จากจุดดังกล่าว ทำให้มีการเสนอแนวคิดทางทฤษฎีกราฟ ซึ่งมีจุดเด่นในแง่ความอ่อนตัวในการนำไปใช้คือ การมองกระบวนการ และสร้างความสัมพันธ์ในลักษณะคุณภาพ (qualitative characteristic) ในการพิจารณาสภาวะของระบบ พร้อมทั้งความสามารถในการวิเคราะห์ทฤษฎีระบบ (system theory) ซึ่งนำมาประยุกต์กับการควบคุมได้อย่างครอบคลุม

Digraph Technique

Digraph เป็นการกำหนดคุณสมบัติของกราฟให้มีทิศทางจากจุด (vertex) หนึ่งไปตามเส้นทาง (edge หรือ path) ถึงอีกจุดหนึ่ง คุณสมบัตินี้จึงนำมาใช้อธิบายระบบพลวัตได้อย่างสะดวก คุณสมบัติและพฤติกรรมของ Digraph จึงสามารถประยุกต์เพื่ออธิบายเทียบกับทฤษฎีที่ใช้ศึกษากระบวนการพลวัต

ทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุม จัดเป็นทฤษฎีที่อธิบายปรากฏการณ์ระบบพลวัตของตัวแปรการควบคุม (control variables) ต่างๆ โดยแทนความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ด้วยเส้นทางระหว่างตัวแปร จุดเด่นที่เห็นได้ชัดคือ เป็นการอธิบายถึงความสัมพันธ์ในลักษณะโครงสร้าง ซึ่งทำให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ และสามารถพิจารณาวิเคราะห์ ทำนายผลของความสัมพันธ์เหล่านี้ได้ในระดับหนึ่งโดยไม่ต้องอาศัยค่าตัวเลขในการคำนวณ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Digraph กับ State Space เพื่อเป็นการเชื่อมโยงเทคนิค Digraph เข้ากับทฤษฎีการควบคุมสมัยใหม่จึงจำเป็นต้องแสดงการอธิบายหรือเทียบเคียงการวิเคราะห์ State Space ด้วยทฤษฎีทางกราฟ โดยกำหนดให้

$$\dot{x}_i(t) = f_i[x_1(t), \dots, x_n(t); u_1(t), \dots, u_m(t)] \quad (1)$$

โดย $i = 1 \dots n$; $t = \text{เวลา}$

$$y_j(t) = g_j[x_1(t), \dots, x_n(t); u_1(t), \dots, u_m(t)] \quad (2)$$

โดย $j = 1 \dots n$

กรณีพิจารณาแบบเป็น Static state feedback

$$u(t) = h_k^s[x_1(t), \dots, x_n(t); t] \quad (3)$$

โดย $k = 1 \dots m$

กรณีพิจารณาแบบเป็น Static output feedback

$$u(t) = h_k^o[x_1(t), \dots, x_n(t); t] \quad (4)$$

โดย $k = 1 \dots m$

การวิเคราะห์แบบ State Space ด้วย Digraph หรือข้อกำหนดการ Mapping มีดังนี้
กำหนดให้

G^x คือ Set ของ Vertex และ Edge ที่มี

m คือ Input Vertex ($I_1, \dots, I_m$)

n คือ State Vertex ($1, \dots, n$)

r คือ Output Vertex ($O_1, \dots, O_r$)

คุณสมบัติที่ 1 ถ้า State Variable x_j อยู่ใน Function $f_i(x, u, t)$ ดังนั้น

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \neq 0 \text{ จะมี Edge จาก Vertex } j \text{ ไปยัง Vertex } i$$

คุณสมบัติที่ 2 ถ้า Input Variable u_k อยู่ใน Function $f_i(x, u, t)$ ดังนั้น

$$\frac{\partial f_i}{\partial u_k} \neq 0 \text{ จะมี Edge จาก Vertex } I_k \text{ ไปยัง Vertex } i$$

คุณสมบัติที่ 3 ถ้า State Variable x_i อยู่ใน Function $f_i(x, u, t)$ ดังนั้น

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_i} \neq 0 \text{ จะมี Edge จาก Vertex } i \text{ ไปยัง Vertex } 0_j$$

คุณสมบัติที่ 4 ถ้า State Variable x_i อยู่ใน Function $h_i^s(x, t)$ ดังนั้น จะมี Edge จาก Vertex i ไปยัง Vertex 1_k ซึ่งอยู่ใน Static State Feedback

คุณสมบัติที่ 5 ถ้า Output Variable y_i อยู่ใน Function $h_i^o(y, t)$ ดังนั้น จะมี Edge จาก Vertex 0_i ไปยัง Vertex 1_k ซึ่งอยู่ใน Static Output Feedback

จากคุณสมบัติข้อที่ 1 ถึง 3 จะสามารถเปลี่ยน สมการ State Space มาเป็น Digraph ทำให้สามารถวิเคราะห์ระบบ structural controllability โดยคุณสมบัติข้อที่ 4 และ structural observability โดยคุณสมบัติข้อที่ 5 ซึ่งสัมพันธ์กับการหา determinant ของระบบที่เกี่ยวข้อง

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ Digraph กับ การคำนวณหา determinant เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นโดยง่ายของการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้

กำหนดให้

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} & \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{matrix} \end{matrix}$$

เป็น เมทริกซ์ซึ่งให้ตัวแปร a_{mn} ที่ทราบค่าแน่นอนจากตัวอย่างจะเห็นได้ว่า เมทริกซ์มีค่า determinant เท่ากับ $a_{13}a_{21}a_{32} - a_{11}a_{23}a_{32} + a_{11}a_{23}a_{33}$ ซึ่งเมื่อใช้ทฤษฎีลักษณะของกราฟ จะแสดงให้เห็นถึงการหา determinant ได้โดยการแทนค่า เมทริกซ์ด้วยกราฟ ใช้คุณสมบัติของกราฟ เพื่อแยกกราฟออกเป็นกลุ่มเรียกว่า cycle family แล้วจึงพิจารณาค่า determinant ดังนี้

ทฤษฎีลักษณะของกราฟ

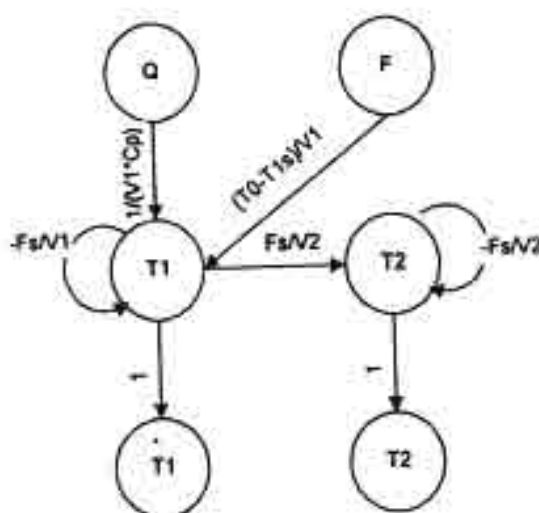
- 1 ให้ Row Matrix A เป็น Vertices $v_1, \dots, v_n$
- 2 ให้ Column Matrix A เป็น Vertices $v_1, \dots, v_n$
- 3 ให้ Edge จาก v_i ไป v_j โดยมี Weight คือ a_{ij}

- V_i = ปริมาตรในแต่ละถังซึ่งเป็นตัวแปรแสดงสภาวะของระบบ (m³)
 C_p = ความจุความร้อนจำเพาะ ซึ่งสมมุติให้มีค่าคงที่ (kJ / K.m³)
 Q = ความร้อนที่ขดลวดให้กับของเหลวเป็นตัวแปรที่ใช้ควบคุมระบบ (kW)
 Subscript "s" แสดงถึง ที่สภาวะคงตัว (Steady State)

ส่วน State Space Matrix ของ ตัวแปรที่ต้องการควบคุมที่ต้องการคืออุณหภูมิจาก ถังที่ 1 และ ถังที่ 2 ตามลำดับ

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

อนึ่ง เมื่อนำ State space matrix A, B และ C มาสร้างเป็นแมทริกซ์โครงสร้างคือ $\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}$ และทำการ Mapping จะได้ Digraph ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 Digraph ของระบบที่ ประกอบด้วย 2 ถังปฏิกริยาและขดลวดให้ความร้อน

ในทางวิศวกรรม การแสดงรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆในระบบด้วย เทคนิค Digraph ทำให้ง่ายต่อความเข้าใจ จากรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลกับระบบ คือ F และ Q ซึ่งจะมีผลต่ออุณหภูมิ T_1 โดยตรง และมีผลต่ออุณหภูมิ T_2 โดยอ้อม ในแง่ของการออกแบบระบบควบคุมอย่างง่าย จะสรุปได้ว่า จะต้องใช้ทั้ง F และ Q เพื่อควบคุม T_1 และ T_2 ในแง่ของขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสามารถแสดงได้โดย ค่า weight ของเส้นทางที่แสดงใน Digraph ในการวิเคราะห์เกี่ยวกับความสามารถในการควบคุมของระบบสามารถกระทำได้ เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์ (ค่า

Weight) ต่างๆ แต่ถ้าไม่สามารถจะกำหนดหรือวัดค่าเหล่านั้นได้ จำเป็นต้องใช้การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างแบบประยุกต์

การวิเคราะห์ด้วย Digraph ต่อระบบ State Space ที่ถูกจัดอยู่ในรูปเมตริกซ์โครงสร้าง (structural matrix) ซึ่งเป็น เมตริกซ์พิเศษที่แทนค่าตัวแปร L ในตำแหน่งสมาชิก (a_{mn}) ที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ทำให้สามารถวิเคราะห์ controllability และ observability ในลักษณะโครงสร้างได้ จากตัวอย่างข้างต้นสามารถเขียนสมการเป็นเมตริกซ์โครงสร้างได้คือ

เมตริกซ์โครงสร้าง A, B, C

$$A = \begin{bmatrix} L & 0 \\ L & L \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} L & L \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad C = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}$$

Structural Controllability หรือ S-Controllability

ทฤษฎีที่ 1

ระบบเมตริกซ์ประกอบ (A, B) โดยสมาชิกทุกตัวของ A, B เป็นตัวแปร หรือค่าคงตัวที่ทราบค่าใดๆ จะมีคุณสมบัติ controllability ก็ต่อเมื่อ $\text{Rank}(B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B) = n$ โดยที่ n คือ ขนาดของเมตริกซ์ย่อย A

ทฤษฎีเสริมที่ 1

ระบบเมตริกซ์ประกอบ (A, B) โดยสมาชิกทุกตัวของ A, B เป็นตัวแปรโครงสร้าง (L หรือ 0) จะมีคุณสมบัติ Structural Controllability ก็ต่อเมื่อ structural-rank (หรือ S-rank) $\{[B], [AB], [A^2B], \dots, [A^{n-1}B]\} = n$

โดยที่ n คือ ขนาดของเมตริกซ์ย่อย A และเรียกว่า structural rank (S-rank)
จากตัวอย่างข้างต้น จะได้สมการในรูป structural matrix คือ

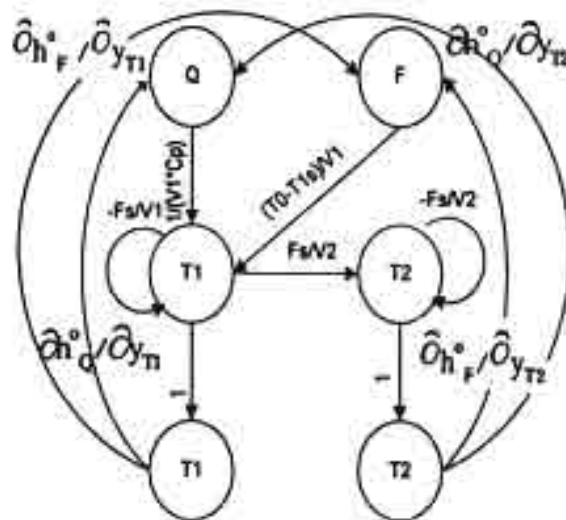
$$\begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & L \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ F \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} L & 0 \\ L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

และสามารถพิจารณา structural controllability ได้คือ

$$S\text{-rank}([B], [AB]) = S\text{-rank} \begin{bmatrix} L & L & L & L \\ 0 & 0 & L & L \end{bmatrix} = 2 = n$$

ระบบของตัวอย่างเป็น structural observability และจะสามารถเขียนเป็นดังรูปที่ 6 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดการ Mapping ที่ 5



รูปที่ 6 แสดงรูป Digraph ที่มีคุณสมบัติ Structural Observability

จาก matrix A , B และ C นำไปทดสอบ structural controllability และ structural observability ได้ผลคือ ระบบมี structural rank เท่ากับ 2 และ 2 ตามลำดับซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีเสริมที่ 1 และ 2 จึงสามารถสรุปได้ว่า ระบบสามารถควบคุมสถานะได้โดยใช้ตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนได้ (Q และ F) ภาควิชาควบคุม (manipulate variables) และสังเกตสถานะของระบบโดยพิจารณาจากตัวแปรแสดงสถานะ (T_1 และ T_2) ของ ตัวแปร output (T_1 และ T_2) ได้

Structural Complete หรือ S-Complete

คือ ระบบที่มีทั้ง structural controllability และ structural observability จากรูปที่ 5 และ 6 สามารถนำมารวมกันเป็น structural complete ได้ดังรูปที่ 7

แปรทั้งหมด เป็นแนวทางเพื่อวิเคราะห์ในระดับวิศวกรรม เพื่อออกแบบระบบควบคุมเป็นการวางแผนทางปฏิบัติให้ควบคู่กับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เพื่อผลลัพธ์ที่แม่นยำและเฉพาะเจาะจง

เอกสารอ้างอิง

1. K. J. Reinschke 1998. "Multivariable Control : A Graph - theoretic Approach". Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag. Berlin . 274P
2. T. Srinophakun 1996. "Intelligent Advisor for Control System Designers". Phd.Thesis. The University of Queensland. Queensland. Australia

A Prototype Package for Control, Design and Evaluation based on a Structural Model

T. Srinophakun¹ and P.A. Lant²

1. Department of Chemical Engineering, Kasetsart University, Bangkok, 10900, Thailand.

2. Department of Chemical Engineering, The University of Queensland, Queensland, 4072, Australia.

ABSTRACT

This paper presents a prototype software system developed to help process control engineers and process design engineers evaluate plant design alternatives to achieve more controllable processes. Being based on structural models allows this to be done at an early design stage or when process improvement is suggested by exploring the qualitative information. Output structural controllability analysis is introduced and used as the core criterion to ensure that all plant-design control objectives are controllable, called a 'controlled plant'. The analysis of controllability is undertaken via the accessibility and relationship between control objectives and manipulated variables. By using graphical techniques, not only is all the accessibility of process variables addressed, but also the extent of relationship. The framework of the package contains modules to:

- acquire the structural matrix model for each unit operation.
- interactively select control objectives and manipulated variables for each unit.
- integrate the units into a complete plant, to analyze for controllability.
- report the multiloop control pairing between the manipulated variables and control objectives, and
- evaluate the alternative control configurations.

The package utilizes both mathematical and heuristic algorithms interactively and has a library of dynamic models for some common unit operations. Furthermore, this package includes a flexible interface to commercial flowsheeting packages and also a built-in expert system to help the designer in the decision-making stage. The package is demonstrated by case studies.

Keywords: Cause-and-Effect relation, Controllability, Graph theory, Process design, Relative order, Structural evaluation, Structural model.

INTRODUCTION

The co-operation between the process control engineer and the process design engineer is needed in the early phase of process design. It is far more cost effective to consider this because the controlled plant is the best goal. Qualitative structural analysis is introduced into this procedure because using of numerical method is tedious, unreliable and even impossible especially in large scale systems. The expression of the analysis in the form of structure model is slightly closer to physical phenomena since it requires only information about whether or not a variable is involved in a particular equation of the system. This concept has been introduced for the synthesis of control. The structural controllability criteria seek to expose the systems in which uncontrollability is caused not by numerical faults but by inherent structural characteristics. All possible single-input single-output control loop pairings can be simulated from the structural model approach. The guidelines for the structural evaluation of alternative control configurations based on control quality characteristics and structural coupling considerations is considered to rank all alternatives.

OUTPUT STRUCTURAL CONTROLLABILITY

After the context of structural controllability had been introduced, much research was conducted mainly to gain a benefit of controllability analysis with qualitative information. Therefore, the controllability analysis and design procedure can be done simultaneously especially in the early stage. However, these approaches have a drawback in that they consider the states of the process rather than the output for testing the structural controllability. To overcome this limitation, the output structural controllability (Lin, 1991) is introduced as a core criteria in the design of all control configurations.

Definition 3.6 (Output structural controllability; Lin, 1991)

A system is output structurally controllable if there exists independent accessibility from system inputs to all system outputs. ■

From the viewpoint of structural model system, there are 3 kinds of defection in the model which will affect the controllability. They are

- The contraction of output and input (Type I)
- Lack of access to output from input (Type II)
- Access to output from other output (Type III).

Here, the concept of generating the structural model without effect from those defections is of interest. This model will guarantee the controllability of system. The relationship between input and output can imply as the 'cause' and 'effect' and represent by the graphical technique.

Definition 3.7 (Cause-and-Effect digraph; Lin, 1991)

Cause-and-Effect relationships between different variables of a system can be represented by a digraph called the Cause-and-Effect digraph of the process flowsheet, where nodes in the digraph are the process variables and the directed edges show the relationships between variables. ■

The digraph technique is utilized to search for all possible paths from manipulated variables to objective variables before the analysis of defective structural type II and type III. Defective structural type I is determined by considering each subsystem and nominated objective variable for deletion. The major key is to check the dimension of the subsystem after deleting the nominated objective variable in order to keep their value in some specific condition. In the process of iterations, members of excess manipulated variables and excess objective variables are selected. Finally, the set of Cause-and-Effect relationships is established in terms of the Cause-and-Effect matrix. The general idea of the algorithm is shown in Figure 1.

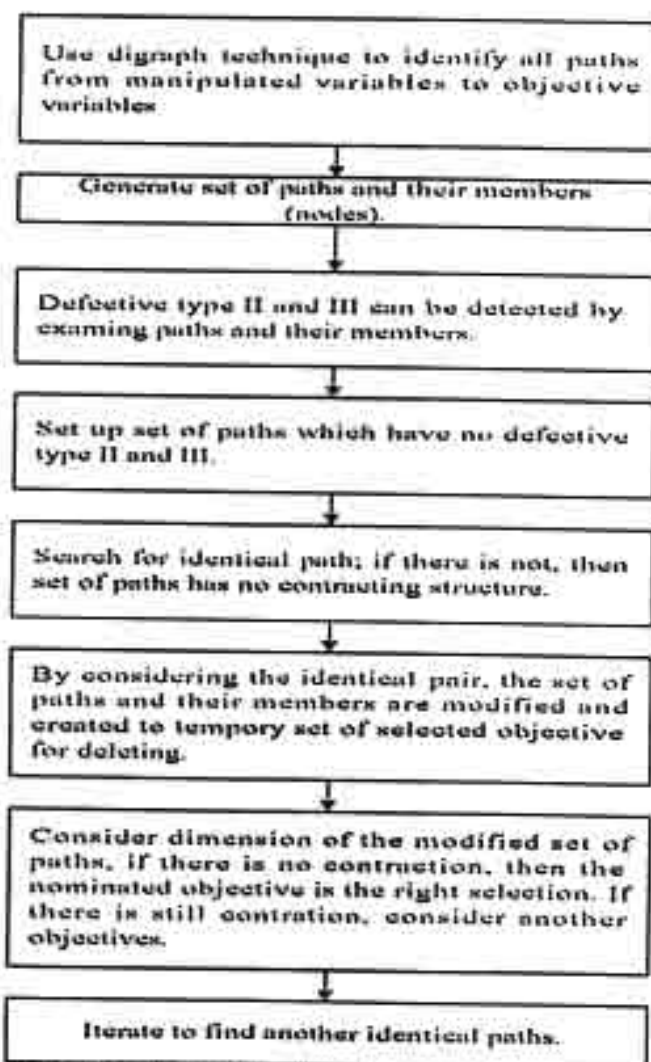


Figure 1 Flow chart of an algorithm for setting up the Cause-and-Effect Matrix

Example 1 (Case study of distillation column)

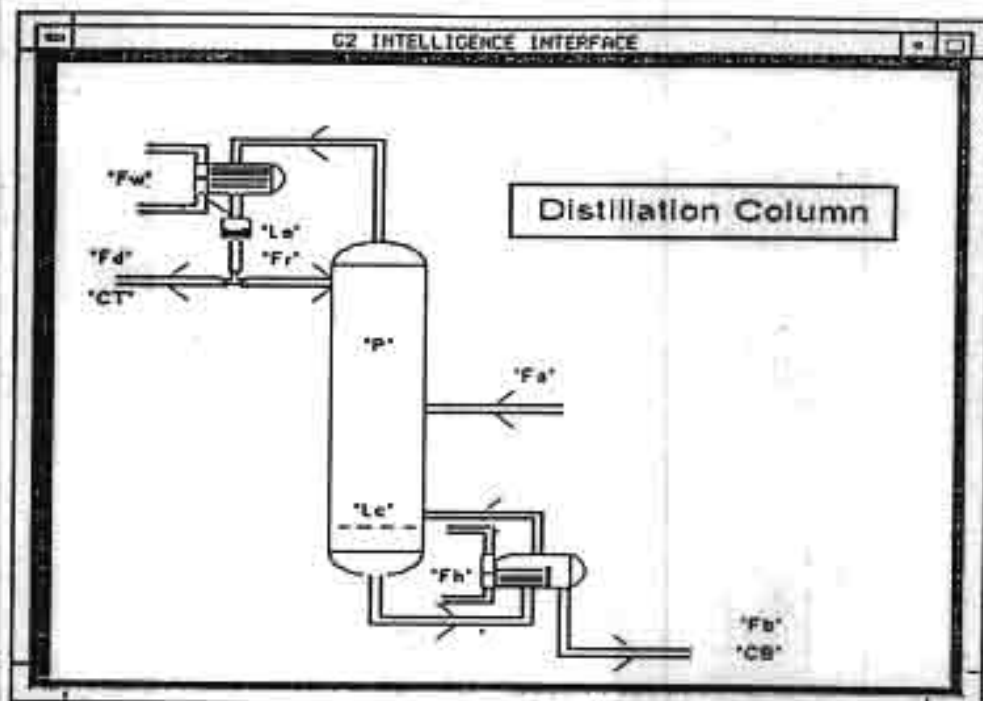


Figure 2 Distillation column

Selection of Unit Operation from Library										
	CT*	CB*	P*	La*	Lc*	Fd	Fb	Fr	Fh	Fw
CT*	x							x	x	
CB*		x						x	x	
P*								x	x	
La*						x		x	x	x
Lc*							x	x	x	x
CT	x									
CB		x								
P			x							
La				x						
Lc					x					

Figure 3 Structure matrix of distillation column

Cause-and-Effect matrix					
distillation column					
	Fd	Fb	Fr	Fh	Fw
CT			x	x	
CB			x	x	
P				x	x
La	x		x		x
Lc		x	x	x	

All possible excess manipulated variables.

All possible excess manipulated variables.

Figure 4 Cause-and-Effect matrix

EVALUATION OF CONTROL CONFIGURATION

The graph-theoretical representation of a process lends itself naturally to the notion of a structural interaction; i.e. a structural coupling the sense of structural interdependencies between the process variables. The basic idea is that by choosing a manipulated input that is physically 'close' to a controlled variable (or has a direct effect on it) then a good chance of obtaining favorable static and dynamic characteristics for the particular input/output pair is possible. The concept of relative order and the relation to structure model (Daoutidis and Kravaris 1992) will apply to the evaluation of control configurations.

Theorem 1:

Consider a (non)linear system and its corresponding digraph. Let l_{ij} denote the lengths of shortest paths omitted connecting u_i and y_j . Also, let r_{ij} be the relative orders between u_i and y_j . Then, $r_{ij} = l_{ij} - 1$. ■

For the matrix system which has the relative order as the element, the differences between off diagonal and diagonal relative orders provide a measure of the overall structural coupling in the system. The larger these differences, the weaker is the structural coupling in the system. In general, a ranking of the outputs according to their importance may then be helpful in order to identify the most favorable control configurations. These conclusions allow the development of heuristic guidelines for the structural evaluation of alternative control configurations.

Algorithm 1: (rule base for the evaluation of structural matrix; Srinophakunn, 1996)

Rule 1: Since the major diagonal of the output structural matrix represents an input/output controlling pair, the lower the relative order in each major diagonal, the more direct the effect on the pair.

Rule 2: Since the off-diagonal of the output structural matrix represents a structural coupling of an input/output pair, the higher relative order in each off-diagonal in each column, the less favorable the pairing configuration.

Rule 3: Since the off-diagonal of the output structural matrix of which the value of relative order is ∞ represents an input/output no-effect pair, the bigger the amount of such an element of matrix, the less is the coupling effect of the configuration. ■

This algorithm is an hierarchical by nature. The major diagonal represents the degree of effect between manipulated input and objective output in the control configuration. Rule 1 is normally a primary consideration for good characteristics. Rule 2 and Rule 3 play a supplementary role to classify those configurations.

This analysis so far has established that relative order is a fundamental structural concept, which quantifies the notions of "direct effect" and "physical closeness", expresses fundamental structural limitations for control quality and allows the evaluation of structural coupling between input and output variables in a process.

Example 2 (A forced circulation evaporator; Newell and Lee, 1991)

The evaporation system consists of a heat exchanger unit and a vapor disengagement vessel with pumped recirculation of liquid. Vapor is condensed in the overhead exchanger. Various control configurations can be investigated for such a system. Of primary control importance are the product concentration (C_2), the evaporator level (L_2) and the system pressure (P_2). The system has a number of manipulated variables which include the steam pressure (P_{100}), the product flowrate (F_2) and the cooling water flowrate (F_{200}). Figure 5 shows a detail of this system with the process variables.

The governing equations based on a mass balance analysis are

$$\begin{aligned}\dot{L}_2 &= f(C_2, P_2, F_2, P_{100}), \\ \dot{C}_2 &= f(C_2, F_2), \\ \dot{P}_2 &= f(C_2, P_2, P_{100}, F_{200}).\end{aligned}$$

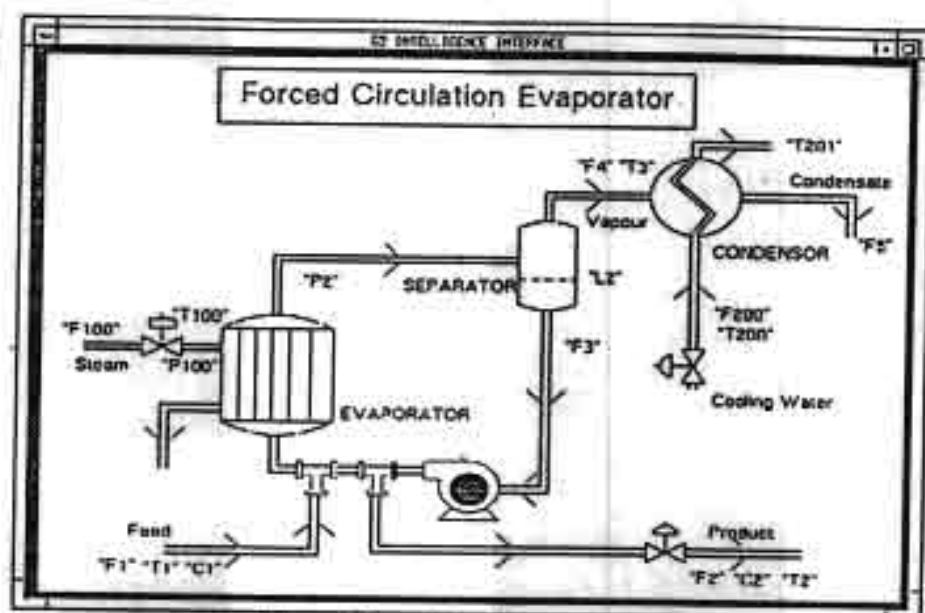


Figure 5 Forced circulation evaporator

The Cause-and-Effect matrix is

Cause-and-Effect Matrix			
Forced Circulation Evaporator			
	F2	P100	F200
L2	x	x	x
C2	x		
P2	x	x	x

All possible excess manipulated variables.

All possible excess manipulated variables.

Figure 6 Cause-and-Effect matrix of the forced circulation evaporator

There are two configurations to control the set of objectives after applying the system pairing procedure (in figure 7).

	F_2	P_{100}	F_{200}		F_2	F_{200}	P_{100}
C_2	$\begin{bmatrix} x \\ x & x & x \\ x & x & x \end{bmatrix}$	C_2	$\begin{bmatrix} x \\ x & x & x \\ x & x & x \end{bmatrix}$				
L_2		L_2					
P_2		P_2					

Configuration 1

Configuration 2

Configuration 1

Configuration 2

Figure 7 Two control configurations of the forced circulation evaporator

In order to evaluate these two configurations, the relative order is superimposed into those matrices by applying theorem 1. All possible paths from manipulated inputs to objective outputs are shown in figure 9. Therefore, the result from the path searching procedure can be interpreted into the cause-and-effect matrix in figure 8.

	F_2	P_{100}	F_{200}		F_2	F_{200}	P_{100}
C_2	$\begin{bmatrix} 1 & \infty & \infty \\ 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	C_2	$\begin{bmatrix} 1 & \infty & \infty \\ 1 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}$				
L_2		L_2					
P_2		P_2					

Configuration 1

Configuration 2

Configuration 1

Configuration 2

Figure 8 Two control configurations with a detail of relative order

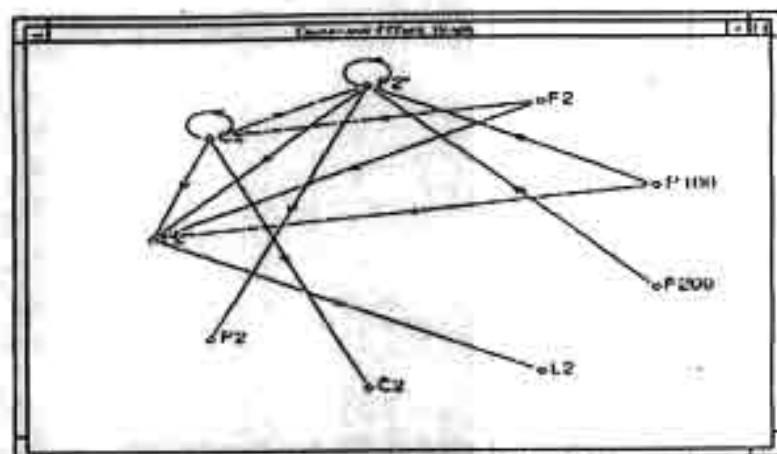


Figure 9 Cause-and-Effect graph of forced circulation evaporator

Configuration 1 has better structural characteristics, since the diagonal entries contain the lowest value of relative order (value '1') which is the interpretation of rule 1 of algorithm 1.

THE PROTOTYPE

The prototype is built up with several programs mostly coding in C computer language. It also employs the MATLABTM as the computational part for searching the paths of digraph. The interfacial part between the prototype and the G2TM, a graphical, object-oriented environment for building and developing an intelligent real-time system, is also coded. The general aim of each program is to represent each algorithm in this contribution. These programs can either work separately by themselves or work together in the prototype. It runs on Hewlett Packard[®] Workstation 750 under the HP-UX 9.0 operating system and Silicon Graphics[®] POWER CHALLENGETM under the IRIX 6.1 operating system. To comply with the code, each of programs must stay in the specified directories. The graphical-user-interface, MOTIF[®] version 1.2, must be installed in the standard directory of Hewlett Packard[®] machine in order to comply correctly.

CONCLUSIONS

When using structural approaches to synthesize control structures, the designer can alter a process flowsheet to meet the lower bound of structural controllability. Therefore, the system with structural uncontrollability can be treated without penalty before expecting the process control design system to be controllable. This structural controllability viewpoint is clearly an advantageous technique because the designer can improve the process controllability in some way by utilizing only structural information. The evaluation of all possible control configurations is approached by addressing the relative order between a pairing of manipulation and object. This relative order is detected directly from the searching of the Cause-and-Effect graph.

FUTURE DIRECTIONS

The general module for interfacing with commercial design packages is still being generated in Graphical User Interface style. A PC-based version is also being developed. Expert Systems and Decision Support Systems can be applied in many stages where interaction with the designer is required. Case studies are being sought to test the reliability of the package.

REFERENCES

- Daouididis, P. and C. Kravaris (1992). Structural Evaluation of Control Configurations for Multivariable Nonlinear Processes. *Chem. Engng. Sci.*, Vol. 47, No. 5, 1091-1107.
- Lin, X. G. (1991). *Structural Techniques in the Design of Control systems*. PhD thesis, The University of Queensland.
- Newell, R. B. and P. L. Lee (1988). *Applied Process Control*. Prentice-Hall, NSW, Australia.
- Srinophrakun, T. (1996). *Intelligent Advisor for Control System Designers*. PhD thesis, The University of Queensland.

การวิเคราะห์กระบวนการควบคุมด้วยทฤษฎีกราฟ
ANALYSIS OF PROCESS CONTROL BY GRAPH THEORY

ธงไชย ศรีนพคุณ
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมวุฒิ กรุทกุล
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์
และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

Thongchai SRINOPHAKUN
Department of Chemical Engineering,
Faculty of Engineering, Kasetsart University.

Somwut KRUTKUL
National Electronics and Computer
Technology Centre.

บทคัดย่อ

เทคนิคกราฟถูกนำเสนอเพื่อศึกษากระบวนการเคมีสมัยใหม่ จุดสำคัญของเทคนิคนี้คือการใช้ความสัมพันธ์ทางกายภาพเพื่อสื่อถึงการวิเคราะห์กระบวนการ

เทคนิคกราฟนี้ใช้วิเคราะห์ ความสามารถในการควบคุมได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์แก่วิศวกรในการออกแบบกระบวนการในภาวะที่มีข้อมูลจำกัด

บทความนี้ จะทบทวนเทคนิคกราฟ และการประยุกต์ในการวิเคราะห์การควบคุม โดยใช้กระบวนการ Supercritical Fluid Extraction เป็นกรณีศึกษา และใช้ชุดวิเคราะห์กราฟของโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์แสดงว่ากระบวนการสามารถควบคุมได้โดยพิจารณาในลักษณะแบบจำลองโครงสร้าง

Abstract

To investigate modern chemical processes, the graphical technique is presented and studied. The nature of graphical implementation which analyses the processes by their physical relationship is the vital advantage of this technique.

The analysis of controllability and observability are undertaken via the graphical representation. This procedure allows process designer evaluate the plant design alternatives at an early design stage, where information is insufficiency.

This paper presents the review of the graphical technique and its implementation of control analysis. Supercritical Fluid Extraction process is demonstrated with the using of Graphical toolbox of MATLAB environment. The result confirms that the plant can be controlled in structural model veiw point.

Keywords : Graph theory, structural properties, controllability, observability.

กระบวนการควบคุม (Process Control) ในปัจจุบัน เพิ่มความซับซ้อนและยุ่งยากมากขึ้น ดังในทฤษฎีควบคุมยุคเก่า (Classical Control) ซึ่งถูกจำกัดให้แก้ปัญหาได้เพียงตัวแปรกระบวนการที่จำกัดจึงไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้ จุดนี้ได้มีการนำทฤษฎี State Space เข้ามาจำลองกระบวนการซึ่งเป็นการเข้าสู่แนวทางทฤษฎีควบคุมยุคใหม่ (Modern Control) ซึ่งจะมองกระบวนการเป็นแบบจำลองเชิงอนุพันธ์ ถึงกระนั้นการจำลองเชิงอนุพันธ์ก็ยังมีข้อเสียคือ (K. J. Reinschke, 1988)

1. การมองกระบวนการเป็น แบบจำลอง สมการเชิงอนุพันธ์ (Ordinary Matrix Differential equation) โดยค่าสมาชิกของเมทริกซ์ จะต้องเป็นค่าที่ทราบค่าแน่นอน ซึ่งแต่ละค่าของสมาชิก เมื่อการเปลี่ยนแปลงค่าสมาชิกใดสมาชิกหนึ่งไปจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงสมาชิกอื่นที่มีความสัมพันธ์กับสมาชิกนั้นด้วย โดยการเปลี่ยนแปลงจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์แต่ละสมาชิก

2. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระบวนการนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากทุกสมาชิกของมีค่าคงตัวซึ่งนำไปคำนวณได้ ในกรณีที่ระบบที่ต้องการจำลองมีขนาดใหญ่ บางครั้งไม่สามารถทราบค่าของตัวแปรได้ครบถ้วน ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ระบบได้แม่นยำ

3. ถ้าระบบมีขนาดใหญ่จะทำให้ขนาดของเมทริกซ์ มีขนาดใหญ่ด้วย ซึ่งยากต่อการวิเคราะห์ และการมองความสัมพันธ์ในระบบ

จากจุดดังกล่าว ทำให้มีการเสนอแนวคิดทางทฤษฎีกราฟ ซึ่งมีจุดเด่นในแง่ความอ่อนตัวในนำไปใช้ คือ การมองกระบวนการ และ สร้างความสัมพันธ์ในลักษณะคุณภาพ (Qualitative characteristic) ในการพิจารณาสถานะของระบบ พร้อมทั้ง ความสามารถในการวิเคราะห์ ทฤษฎีระบบ (System Theory) ซึ่งนำมาประยุกต์กับการควบคุมได้อย่างครอบคลุม

Digraph Technique

Digraph เป็น การกำหนดคุณสมบัติของกราฟให้มีทิศทางจากจุด (Vertex) หนึ่งไปตามเส้นทาง (Edge หรือ Path) ถึงอีกจุดหนึ่ง คุณสมบัตินี้จึงนำมาใช้อธิบายระบบพลวัต (Dynamic System) ได้อย่างสะดวก คุณสมบัติและพฤติกรรมของ Digraph จึงสามารถประยุกต์เพื่ออธิบายเทียบเคียงกับทฤษฎีที่ใช้ศึกษาระบบพลวัต

ทฤษฎีเกี่ยวกับการควบคุม จัดเป็นทฤษฎีที่อธิบายปรากฏการณ์ระบบพลวัต ของตัวแปรการควบคุม (Control Variables) ต่างๆ โดยแทนความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านี้ด้วยเส้นทางระหว่างตัวแปร จุดเด่นที่เห็นได้ชัดคือ เป็นการอธิบายถึงความสัมพันธ์ ในลักษณะโครงสร้าง (Structural

Relationship) ซึ่งทำให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจ และสามารถพิจารณาวิเคราะห์ ทำนายผลของความสัมพันธื เหล่านี้ได้ในระดับหนึ่ง โดยไม่จำเป็นต้องอาศัยค่าตัวเลขในการคำนวณ

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง Digraph กับ State Space เพื่อเป็นการเชื่อมโยงเทคนิค Digraph เข้ากับทฤษฎีการควบคุมสมัยใหม่ จึงจำเป็นต้องแสดงการอธิบายหรือเทียบเคียงการวิเคราะห์ State Space ด้วยทฤษฎีทางกราฟ โดยกำหนดให้

$$\dot{x}_i(t) = f_i(x_1(t), \dots, x_n(t); u_1(t), \dots, u_m(t)) \quad (1)$$

โดย $i = 1, \dots, n$; $t = \text{เวลา}$

$$y_j(t) = g_j(x_1(t), \dots, x_n(t); u_1(t), \dots, u_m(t)) \quad (2)$$

โดย $j = 1, \dots, n$

กรณีพิจารณาระบบเป็น Static State Feedback

$$u(t) = h_k(x_1(t), \dots, x_n(t); t) \quad (3)$$

โดย $k = 1, \dots, m$

กรณีพิจารณาระบบเป็น Static output feedback

$$u(t) = h'_k(x_1(t), \dots, x_n(t); t) \quad (4)$$

โดย $k = 1, \dots, m$

กรรมวิธีอธิบายระบบ State Space ด้วย Digraph หรือข้อกำหนดการ Mapping มีดังนี้ กำหนดให้

G' คือ Set ของ Vertex และ Edge ที่มี

m คือ Input Vertex ($I_1, \dots, I_m$)

n คือ State Vertex ($1, \dots, n$)

r คือ Output Vertex ($O_1, \dots, O_r$)

คุณสมบัติที่ 1 ถ้า State Variable x_i อยู่ใน Function $f_i(x, u, t)$ ดังนั้น

$\partial f_i / \partial x_j \neq 0$ จะมี Edge จาก Vertex j ไปยัง Vertex i

คุณสมบัติที่ 2 ถ้า Input Variable u_k อยู่ใน Function $f_i(x, u, t)$ ดังนั้น

$\partial f_i / \partial u_k \neq 0$ จะมี Edge จาก Vertex I_k ไปยัง Vertex i

คุณสมบัติที่ 3 ถ้า State Variable x_i อยู่ใน Function $g_j(x, u, t)$ ดังนั้น

$\partial g_j / \partial x_i \neq 0$ จะมี Edge จาก Vertex i ไปยัง Vertex O_j

คุณสมบัติที่ 4 ถ้า State Variable x_i อยู่ใน Function $h'_k(x, t)$ ดังนั้น จะมี Edge จาก Vertex i ไปยัง Vertex I_k ซึ่งอยู่ใน Static State Feedback

คุณสมบัติที่ 5 ถ้า Output Variable y_j อยู่ใน Function $h'_k(y, t)$ ดังนั้น จะมี Edge จาก Vertex O_j ไปยัง Vertex I_k ซึ่งอยู่ใน Static Output Feedback

จากคุณสมบัติข้อที่ 1 ถึง 3 จะสามารถเปลี่ยน สมการ State Space มาเป็น Digraph ทำให้สามารถวิเคราะห์ระบบ Structural Controllability โดยคุณสมบัติข้อที่ 4 และ Structural Observability โดยคุณสมบัติข้อที่ 5 ซึ่งสัมพันธ์กับการหา Determinant ของระบบที่เกี่ยวข้อง

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ Digraph กับ การคำนวณหา Determinant เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นโดยง่ายของการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้

กำหนดให้

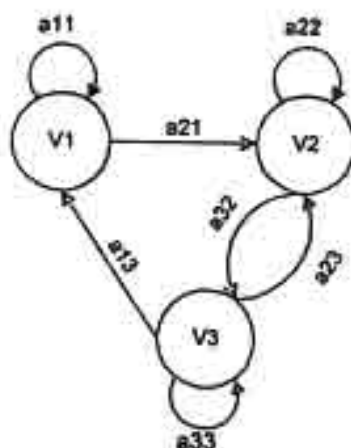
$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{matrix}$$

เป็น เมตริกซ์ซึ่งให้ตัวแปร a_{ij} ที่ทราบค่าแน่นอนจากตัวอย่างจะเห็นได้ว่า เมตริกซ์มีค่า Determinant เท่ากับ $a_{11}a_{22}a_{33} - a_{11}a_{23}a_{32} + a_{13}a_{22}a_{31}$ ซึ่งเมื่อใช้ทฤษฎีลักษณะของกราฟ จะแสดงให้เห็นถึงการหา Determinant ได้โดย การแทนค่า เมตริกซ์ด้วยกราฟ ใช้คุณสมบัติของกราฟเพื่อแยกวงกราฟออกเป็นกลุ่มเรียกว่า Cycle Family แล้วจึงพิจารณาค่า Determinant ดังนี้

ทฤษฎีลักษณะของกราฟ

- 1 ให้ Row Matrix A เป็น Vertices $v_1, \dots, v_n$
- 2 ให้ Column Matrix A เป็น Vertices $v_1, \dots, v_n$
- 3 ให้ Edge จาก v_j ไป v_i โดยมี Weight คือ a_{ij}

ดังรูปที่ 1



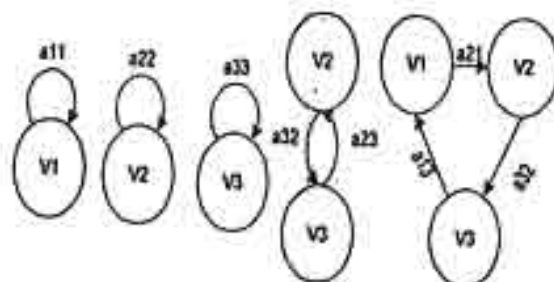
รูปที่ 1 แสดงรูปแบบของ Digraph ในทฤษฎีลักษณะของกราฟ

การหา Determinant

1. ฎ Cycle Families ที่มีจำนวน Vertices เท่ากัน
2. ใช้ Sign Rule คือ $(-1)^{d+1}$

และสามารถแยก Digraph มาเป็น Cycle Family ได้ การแยก Cycle Family กระทำโดยการแบ่งกลุ่ม Digraph ให้เป็นกลุ่มย่อย ซึ่งกลุ่มย่อยนั้นประกอบไปด้วย กลุ่มที่ไม่สามารถหา Vertex เริ่มต้น และ Vertex จบได้ (Cycle) ซึ่งมีผลรวมของ Vertices ของกลุ่มย่อยจะเท่ากับ จำนวน Vertices ของระบบที่ทำการแยกและให้ n คือจำนวน Vertices และ d คือจำนวน Cycle

ดังรูปที่ 2

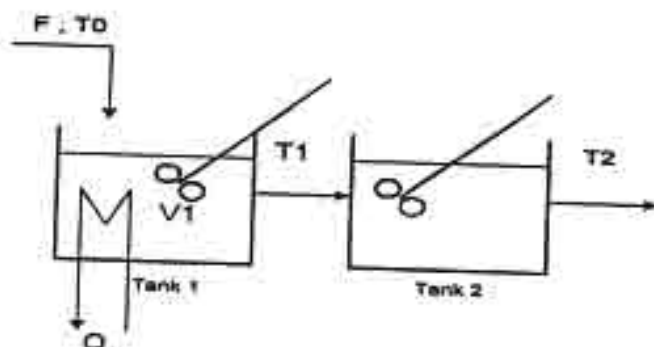


รูปที่ 2 แสดง Cycle Family

ได้ ค่า Determinant A

$$\begin{aligned}
 &= (-1)^{1+1} a_{11} a_{22} a_{33} + (-1)^{1+2} a_{11} a_{23} a_{32} \\
 &+ (-1)^{1+3} a_{11} a_{21} a_{31} \\
 &= a_{11} a_{22} a_{33} - a_{11} a_{23} a_{32} + a_{11} a_{21} a_{31}
 \end{aligned}$$

ตัวอย่าง กระบวนการที่ประกอบด้วย 2 ดังปฏิกิริยา และ ขดลวดให้ความร้อน (T. Srinophakun, 1996)



รูปที่ 3 ระบบที่ ประกอบด้วย 2 ดังปฏิกิริยา และ ขดลวดให้ความร้อน

จากรูปที่ 3 เป็นกระบวนการที่ประกอบไปด้วย ดังปฏิกิริยา 2 ตัว ตัวหนึ่งมี ขดลวดให้ความร้อน Q กับระบบ สามารถทำการเขียนเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการนี้ตามรูปแบบมาตรฐาน

- 4) Reflux ที่ป้อนกลับเข้า Stripper อยู่ในภาวะอิ่มตัว
- 5) ไม่คิดว่าการเกิดความร้อนเนื่องจากการเจือจาง และ การผสมของสาร
- 6) มีการควบคุมระดับอย่างสมบูรณ์ใน Accumulator และ Reboiler
- 7) ไม่คิด loss เนื่องจาก valve
- 8) คิดว่า Feed เป็น Binary mixture (ไม่คิดว่าใน Feed มีน้ำปนมาด้วย)

จากสมมติฐาน 8 ข้างต้น สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ Stripper ได้ดังนี้

Condensor:

$$(V+qS) y_1 + Mk = (S+L)(1-y_1)$$

$$V+qS+Mk=L+S$$

Column:

$$M_1(dx_1/dt) = L(1-y_1-x_1) + (V+qS)(y_1-y_2)$$

$$M_2(dx_2/dt) = L(x_1-x_2) + V(y_2-x_2) + (V+qS)(x_2-y_2) + S(x_{r1}-x_2)$$

$$M_3(dx_3/dt) = [L+(1-q)S](x_2-x_3) + V(y_3-y_1)$$

Reboiler:

$$M_4(dx_4/dt) = [L+(1-q)S](x_3-x_4) + V(x_4-y_3)$$

$$B=L+(1-q)S-V$$

เมื่อ M_i = Molar Holdup ของแต่ละ Tray

M_4 = Molar Holdup ใน Reboiler

x_{r1} = เศษส่วน โมลของ CO_2 ที่อยู่ใน Feed

x_1, y_1 = เศษส่วน โมลของ CO_2 ที่อยู่ใน Liquid และ Vapor phase ตามลำดับ

x_2, x_3 = เศษส่วน โมลของ CO_2 ที่อยู่ใน Overhead และ Bottom product ตามลำดับ

L = Flow rate ของ Reflux (kmol/h)

V = อัตราการเดือด ของสาร ใน Reboiler (kmol/h)

M_1 = Flow rate ของ CO_2 ที่ใช้เติมให้กับ Overhead product

B = Bottom Flowrate (kmol/h)

และ เช่นเดียวกับ Extractor ความสัมพันธ์ของ Liquid และ Vapor ใน Thermal Equilibrium สามารถหาได้จากสูตร

$$x_i = [y_i y_{i+1} (1-E'_{MV})] / (K'_i E'_{MV})$$

เมื่อ E'_{MV} = Murphree' Efficiency

K'_i = Partition coefficients ของ Tray ที่ i

จากการวิเคราะห์ผลแสดงให้เห็นว่าใน ทาง Numerical แสดงให้เห็นว่าระบบไม่ สามารถควบคุมและสังเกตได้ แต่เมื่อทำการทดสอบทาง Structural (การหาค่า Structural Controllability และ Structural Observability) พบว่า ระบบสามารถ ควบคุมและ สังเกต State ของระบบจาก Output ได้

จากการทดสอบข้างบนได้ผลเป็นคังข้างคั้น สรุปได้ว่า หากมีการแก้ไข ค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ใน Matrix A,B,C เช่น การปรับลดหภูมิ ให้เป็นค่าที่เหมาะสม ระบบนี้ สามารถที่จะทำการควบคุม และ สังเกตได้ เพราะว่า สามารถหา Structural Controllability และ Structural Observability ได้

สรุป

1.ขั้นตอนการวิเคราะห์ระบบทำได้โดยการแปลงระบบ State Space ให้เป็น Digraph ซึ่งใช้คุณสมบัติข้อที่ 1-3 การวิเคราะห์คุณสมบัติ Structural Controllability และ Structural Observability กระทำโดยพิจารณาคุณสมบัติข้อที่ 4 และ 5 ตามลำดับ อนึ่งถ้าระบบมีคุณสมบัติครบทั้งสองประการ ระบบนั้นจะมีคุณสมบัติที่เรียกว่า Structural Complete

2.เนื่องจากการพิจารณาระบบ เป็น เมตริกซ์โครงสร้าง ทำให้สามารถพิจารณา Structural Controllability และ Structural Observability ซึ่งง่ายกว่าการพิจารณาระบบใน State Space ที่ต้องทราบค่าสมาชิกทุกตัวของเมตริกซ์ในสมการ และการวาดรูป Digraph จะแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแต่ละ Manipulate ซึ่งมีผลต่อ สภาวะของระบบ ได้ง่ายกว่าการแสดงในสมการ State Space

เอกสารอ้างอิง

- K. J. Reinschke 1988, Multivariable Control : A Graph - theoretic Approach, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer-Verlag, Berlin . 274P
- T. Srinophakun 1996, Intelligent Advisor for Control System Designers, Phd.Thesis, The University of Queensland, Queensland, Australia
- Yudi Samyudia, et al. 1996, Control Strategies For Supercritical Fluid .Chemical Engineering science .Vol 51. No 5.pp.769-787.

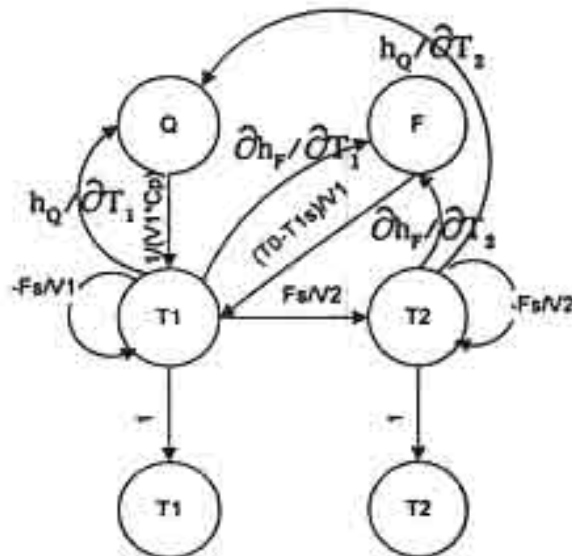
$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ L & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & L \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q \\ F \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix}$$

และสามารถพิจารณา Structural Controllability ได้คือ

$$S\text{-Rank}([B], [AB]) = S\text{-Rank} \begin{bmatrix} L & L & L & L \\ 0 & 0 & L & L \end{bmatrix} = 2 = n$$

∴ ระบบของตัวอย่างเป็น Structural Controllability และจะสามารถเขียนเป็นดังรูปที่ 5 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดการ Mapping ที่ 4



รูปที่ 5 แสดงรูป Digraph ที่มีคุณสมบัติ Structural Controllability

Structural Observability หรือ S-Observability

ทฤษฎีที่ 2

ระบบเมตริกซ์ $(A, C)^T$ โดยสมาชิกทุกตัวของ A, C เป็นตัวแปรหรือ ค่าคงตัว ที่ทราบค่าใดๆ จะมีคุณสมบัติ Observability ก็ต่อเมื่อ

$$\text{Rank} (C, AC, A^2C, \dots, A^{n-1}C)^T = n$$

โดยที่ n คือ ขนาดของเมตริกซ์ย่อย A

ทฤษฎีเสริมที่ 2

ระบบเมตริกซ์ $(A, C)^T$ โดยสมาชิกทุกตัวของ A, C เป็น ตัวแปรโครงสร้าง (L หรือ 0) จะมีคุณสมบัติ Structural Observability ก็ต่อเมื่อ

$$S\text{-Rank}([C], [AC], [A^2C], \dots, [A^{n-1}C])^T = n$$

โดยที่ n คือขนาดเมตริกซ์ย่อย A

จากตัวอย่าง เมื่อจัดรูปเป็นเมตริกซ์โครงสร้างและพิจารณา Structural Observability ได้ดังนี้

1781/1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840

1840