การจัดการน้ำและน้ำเสียของโรงงานชุบสังกะสีโดยใช้เทคนิคการออปติไมซ์

นาย วัชรพงษ์ ศิลาเลิศรักษา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2544
ISBN 974-03-1462-7
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I20477132

WATER - WASTEWATER MANAGEMENT OF A ZINC PLATING PLANT BY THE OPTIMIZATION TECHNIQUE

Mr. Watcharapong Silalertruksa

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Chemical Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1462-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดการน้ำและน้ำเสียของโรงงานชุบสังกะสีโดยใช้เทคนิคการออปติไมซ์
โดย	นายวัชรพงษ์ ศิลาเลิศรักษา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ สุดกล้า บุญญนันท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล กิตติศุภกร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ สุดกล้า บุญญนันท์)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี)

วัชรพงษ์ ศิลาเลิศรักษา : การจัดการน้ำและน้ำเสียของโรงงานชุบสังกะสีโดยใช้เทคนิคการออปติไมซ์ (Water-Wastewater Management of a Zinc Plating by The Optimization Technique) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ไพศาล กิตติศุภกร, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. สุดกล้า บุญญนันท์ , 120 หน้า. ISBN 974-03-1462-7.

น้ำเสียจัดเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญของอุตสาหกรรมเคมี มีแหล่งกำเนิดทั้งจากกระบวนการผลิตและหน่วยสนับสนุน การนำน้ำทิ้งจากหน่วยต่าง ๆ กลับมาใช้ใหม่จัดเป็นแนวทางหนึ่งของการป้องกันมลพิษ อันจะนำไปสู่การลดปริมาณการใช้น้ำดี (Freshwater) และปริมาณการเกิดน้ำเสียของกระบวนการผลิตลงได้ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองโครงข่ายการจัดการน้ำและน้ำเสียตามหลักการอนุรักษ์มวล พิจารณาโดยการนำสายของน้ำทิ้งจากหน่วยต่าง ๆ รวมถึงสายของน้ำดีที่ใช้ในภาพรวมทั้งระบบ มาทำการแยก ผสม และนำกลับไปใช้ใหม่ในหน่วยอื่นที่สามารถยอมรับน้ำนั้นได้ ซึ่งชุดของสมการดุลมวลสารและสมการเงื่อนไขของกระบวนการทั้งหมดที่ได้จะถูกนำมาตั้งเป็นปัญหาสำหรับการทำออปติไมซ์โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อให้มีการใช้น้ำดีต่ำที่สุด ปัญหาสำหรับทำออปติไมซ์จะอยู่ในรูปโปรแกรมแบบไม่เชิงเส้นตรง (Non-linear Programing) สามารถจำลองและหาคำตอบได้ด้วยโปรแกรมแกมส์ (GAMS) ในงานวิจัยได้ทดสอบแบบจำลองกับกระบวนชุบสังกะสี-โครเมี่ยมของโรงงานแห่งหนึ่ง พบว่าโรงงานสามารถลดการใช้น้ำดีในกระบวนการล้างน้ำ (Rinsing) ลงได้โดยการควบคุมอัตราการไหลของน้ำล้างและการนำน้ำล้างกลับมาใช้อย่างเหมาะสมจะลดการใช้น้ำดีลงได้ 588 ลบ.ม./ปี หรือคิดเป็นร้อยละ 7.45 ของปริมาณการใช้น้ำในปัจจุบัน

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต .....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

4171489121 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: OPTIMIZATION / MASS INTEGRATION / RINSING / GAMS / ZINC PLATING

WATCHARAPONG SILALERTRUKSA : WATER - WASTEWATER MANAGEMENT OF A ZINC PLATING PLANT BY THE OPTIMIZATION TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : PAISAN KITTISUPAKORN,Ph.D. THESIS COADVISOR : SUDKLA BOONYANANT, 120 pp. ISBN 974-03-1462-7.

Wastewater, one of significant environmental aspects of chemical industry, is normally generated by processes and their utility systems. Water reuse is one method of pollution prevention to reduce the generating of wastewater and process freshwater consumptions. The objective of this work is to model a water and wastewater management network with respect to mass conservation. A mass integration for segregation, mixing, reusing and direct recycling is set up to model the water-wastewater use as a whole plant concept. Discharged water from each unit as well as freshwater feed are considered to be segregated, mixed, allocated to other units. This set of allocation equations is then combined with process constraints and solved as an optimization problem with an objective function of minimising the amount of freshwater feeds to the system. This optimization problem is formulated as a Non-linear Programing (NLP) and solved by the high-level modeling language GAMS. A case study of Zn - Cr plating is implemented. Simulation results had demonstrated can be reduces the amount of freshwater input in rinsing units by a proper rinsing water flow rate control; 7.45 percent reduction of freshwater usage (588 cubic meters per year) is obtained.

Department Chemical Engineering
Field of study Chemical Engineering
Academic year 2001

Student's signature .....
Advisor's signature .....
Co-advisor's signature .....

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร อาจารย์ที่ปรึกษา และคุณสุดกล้า บุญญนันท์ วิศวกรอาวุโส สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านได้ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และแนวความคิดต่างๆ ในงานวิจัยนี้ด้วยดีตลอดมาจนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วยรองศาสตราจารย์ ดร.อุรา ปานเจริญ ประธานกรรมการ และอาจารย์ ดร.มนตรี วงศ์ศรี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ขึ้น

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ Mr. Seiji Masuda ประธานบริษัท คุณฤทธิรณ พับบรรจง ผู้จัดการทั่วไปฝ่ายโรงงาน และคุณพิมพ์ประไพ ภูมิรัตน์ หัวหน้าวิศวกรและผู้แทนผู้บริหารด้านสิ่งแวดล้อม บริษัท ซันโก ฟาสเท็ม (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ให้ผู้วิจัยเข้าไปศึกษาวิจัยในกระบวนการผลิตของโรงงาน รวมถึงเอื้อเฟื้อข้อมูล อุปกรณ์ต่าง ๆ และข้อเสนอแนะเพื่อให้งานวิจัยดังกล่าวนี้สำเร็จลุล่วง

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาและครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ คุณมาลินี สุขสุอรรถ และทีมงานฝ่ายธุรกิจและสิ่งแวดล้อม สถาบันสิ่งแวดล้อมไทยทุกท่าน รวมถึงเพื่อน ๆ ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนด้านต่าง ๆ แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดีตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ
กิตติกรรมประกาศ.....ฉ
สารบัญ.....ช
สารบัญภาพ.....ญ
สารบัญตาราง.....ฏ

บทที่

1. บทนำ.....1
   1.1 ข้อมูลทั่วไปของอุตสาหกรรมตกแต่งผิวโลหะ.....1
   1.2 ความเป็นมาและมูลเหตุจูงใจของงานวิจัย.....2
   1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....4
   1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....4
   1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....4
   1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....5
2. ผลงานวิจัยที่ผ่านมา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....6
   2.1 ความเป็นมาของเทคนิคพินช์.....6
   2.2 การประยุกต์เทคนิคพินช์กับโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวล.....7
   2.3 การประยุกต์โครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลกับการลดน้ำเสียของกระบวนการ.....10
   2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทคนิคพินช์เพื่อลดการใช้น้ำในภาคอุตสาหกรรม.....16
   2.5 การออปติไมซ์.....17
      2.5.1 ส่วนประกอบของการออปติไมซ์.....18
      2.5.2 อัลกอริทึมของการออปติไมซ์.....21
3. กระบวนการตกแต่งผิวโลหะประเภทชุบสังกะสี – โครเมี่ยม.....23
   3.1 ภาพรวมของกระบวนการผลิต.....23
   3.2 กระบวนการล้างน้ำ.....24
      3.2.1 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการล้างน้ำ.....24
      3.2.2 รูปแบบของกระบวนการล้างน้ำ.....27

บทที่ หน้า

4. วิธีดำเนินการวิจัย.....31

4.1 บทนำ.....31

4.2 แนวทางการวิจัย.....34

4.2.1 การสร้างและทดสอบแบบจำลองกระบวนการล้างน้ำ.....34

4.2.2 การจัดทำดุลมวลสารของระบบที่สภาวะคงตัว.....36

4.2.3 การสร้างแบบจำลองโครงข่ายการจัดการน้ำและน้ำเสีย.....36

4.2.4 การทำออปติไมซ์แบบจำลอง.....36

5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....37

5.1 ผลการทดสอบแบบจำลองกระบวนการล้างน้ำ.....37

5.1.1 ผลเปรียบเทียบกระบวนการล้างน้ำหลังการล้างด้วยไฟฟ้า ครั้งที่ 1.....39

5.1.2 ผลเปรียบเทียบกระบวนการล้างน้ำหลังการกัดกรด.....40

5.1.3 ผลเปรียบเทียบกระบวนการล้างน้ำหลังการล้างด้วยไฟฟ้า ครั้งที่ 2.....40

5.1.4 ผลเปรียบเทียบกระบวนการล้างน้ำหลังการกัดกรดกระตุ้นผิว.....41

5.1.5 วิจารณ์ผลการทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลจริง.....42

5.1.6 วิจารณ์แนวทางการประยุกต์ใช้แบบจำลองกระบวนการล้างน้ำ.....43

5.2 แบบจำลองโครงข่ายการจัดการน้ำและน้ำเสีย.....47

5.2.1 สมมติฐานสำหรับการสร้างแบบจำลอง.....47

5.2.2 โครงสร้างแบบจำลอง.....48

5.2.3 แบบจำลองโครงข่ายการจัดการน้ำและน้ำเสียของกระบวนการล้างน้ำ.....50

5.2.4 ขอบเขตของกระบวนการ 52

5.3 ดุลมวลสารของกระบวนการที่สภาวะคงตัว 53

5.4 ผลการออปติไมซ์แบบจำลอง.....54

5.4.1 กรณีศึกษาที่ 1: ไม่จำกัดขอบเขตความเข้มข้นของน้ำล้างในบ่อสุดท้าย.....54

5.4.2 กรณีศึกษาที่ 2: ควบคุมความเข้มข้นน้ำล้างบ่อสุดท้าย แบบที่ 1.....64

5.4.3 กรณีศึกษาที่ 3: ควบคุมความเข้มข้นน้ำล้างบ่อสุดท้าย แบบที่ 2.....69

5.4.4 กรณีศึกษาที่ 4: ควบคุมความเข้มข้นน้ำล้างบ่อสุดท้าย แบบที่ 3.....79

5.4.5 วิจารณ์ผลการออปติไมซ์แบบจำลอง.....89

6. สรุปผลงานวิจัย.....96

6.1 แบบจำลองกระบวนการล้างน้ำ.....96

บทที่ หน้า

6.2 แบบจำลองโครงข่ายการจัดการน้ำและน้ำเสีย....98

6.3 ข้อเสนอแนะ....100

รายการอ้างอิง....103

ภาคผนวก....106

ภาคผนวก ก โปรแกรมแกมส์....107

ก.1 บทนำ....107

ก.2 หลักการทำงาน....107

ก.3 โครงสร้างของแบบจำลองแกมส์....107

ภาคผนวก ข การจำลองโครงข่ายด้วยโปรแกรมแกมส์....109

ภาคผนวก ค ข้อมูลกระบวนการของโรงงาน....117

ค.1 กระบวนการล้างน้ำหลังการล้างด้วยไฟฟ้าครั้งที่ 1....117

ค.2 กระบวนการล้างน้ำหลังการกัดกรด....118

ค.3 กระบวนการล้างน้ำหลังการกัดกรดกระตุ้นผิว....118

ค.4 กระบวนการล้างน้ำหลังการล้างด้วยไฟฟ้าครั้งที่ 2....119

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์....120

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ หน้า

2.1 ลักษณะการใช้น้ำในกระบวนการ....11

2.2 การสร้างเส้นภาระน้ำรวมจำกัด และค่าต่ำสุดของการใช้น้ำ....12

2.3 รูปแบบโครงข่ายเชื่อมตัดของเสีย (WINs)....13

2.4 แผนภาพ "แหล่งให้น้ำ – แหล่งรับน้ำ"....14

2.5 การแจกแจงมวลผ่านกระบวนการแยก ผสม และนำกลับไปใช้ใหม่โดยตรง....15

3.1 "Tank-in-Tank Rinsing Model" ของการล้างแบบน้ำนิ่งและแบบน้ำล้นต่อเนื่อง....25

3.2 กระบวนการล้างน้ำแบบบ่อล้างน้ำนิ่ง....27

3.3 กระบวนการล้างน้ำแบบบ่อล้างน้ำล้น....28

3.4 กระบวนการล้างน้ำล้นหลายขั้นแบบอนุกรม....29

3.5 กระบวนการล้างน้ำล้นหลายขั้นแบบขนาน....29

4.1 กระบวนการชุบสังกะสี – โครเมี่ยมของโรงงานแห่งหนึ่ง....33

4.2 แบบจำลองแสดงสารขาเข้า-ออกของกระบวนการล้างน้ำ....34

5.1 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในบ่อน้ำล้างภายหลังการล้างด้วยไฟฟ้า ครั้งที่ 1....39

5.2 ปริมาณไฮโดรคลอริกในบ่อน้ำล้างภายหลังการกัดกรด....40

5.3 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ในบ่อน้ำล้างภายหลังการล้างด้วยไฟฟ้า ครั้งที่ 2....41

5.4 ปริมาณไฮโดรคลอริกในบ่อน้ำล้างภายหลังการกัดกรดกระตุ้นผิว....41

5.5 อัตราการไหลน้ำและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สะสมในบ่อน้ำล้าง "A1RIN1" และ "A1RIN2"....44

5.6 อัตราการไหลน้ำและปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สะสมในบ่อน้ำล้าง "A1RIN1" และ "A1RIN2" ภายหลังปรับลดการใช้น้ำหลังชั่วโมงที่ 8....45

5.7 น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการและรูปแบบการนำกลับไปใช้....48

5.8 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานก่อนปรับปรุง....53

5.9 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างด่างกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 1 โดย MINOS5....54

5.10 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างด่างกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 1 โดย CONOPT....57

5.11 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างด่างกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 1 โดย CONOPT2....58

5.12 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างกรดกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 1 โดย MINOS5....59

5.13 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างกรดกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 1 โดย CONOPT และ CONOPT2....60

บทที่ หน้า

5.14 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 1) โดย MINOS5.....61

5.15 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 1) โดย CONOPT.....62

5.16 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 1) โดย CONOPT2....63

5.17 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างด่างกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 2 โดย CONOPT2.....66

5.18 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างกรดกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 2 โดย CONOPT2.....67

5.19 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 2) โดย CONOPT2 68

5.20 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างด่างกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 3 โดย CONOPT2.....72

5.21 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างกรดกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 3 โดย CONOPT2.....73

5.22 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 3) โดย CONOPT2 ...74

5.23 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 3-1).....75

5.24 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 3-2).....76

5.25 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 3-3).....77

5.26 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 3-4).....78

5.27 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างด่างกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 4 โดย MINOS5, CONOPT และ CONOPT2.....82

5.28 ผลออปติไมซ์การนำน้ำล้างกรดกลับมาใช้ในกรณีศึกษาที่ 4 โดย MINOS5, CONOPT และ CONOPT2.....83

5.29 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 4) โดย MINOS5, CONOPT และ CONOPT2 84

5.30 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 4-1).....85

5.31 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 4-2).....86

5.32 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 4-3).....87

5.33 โฟลวชีทกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงานหลังปรับปรุง (กรณีศึกษาที่ 4-4).....88

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

2.1 ข้อมูลกระบวนการตัวอย่าง.....12

5.1 ปริมาณชิ้นงานที่ผ่านการชุบเคลือบผิวชิ้นงานของโรงงานในรอบ 12 ชั่วโมง.....37

5.2 ขอบเขตของกระบวนการล้างน้ำ (บ่อน้ำล้างด่าง).....52

5.3 ขอบเขตของกระบวนการล้างน้ำ (บ่อน้ำล้างกรด).....52

5.4 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างด่าง (กรณีศึกษาที่ 1).....55

5.5 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างกรด (กรณีศึกษาที่ 1).....55

5.6 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างด่าง (กรณีศึกษาที่ 2).....65

5.7 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างกรด (กรณีศึกษาที่ 2).....65

5.8 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างด่าง (กรณีศึกษาที่ 3).....70

5.9 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างกรด (กรณีศึกษาที่ 3).....70

5.10 ผลออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างด่าง (กรณีศึกษาที่ 3) เมื่อพารามิเตอร์เปลี่ยน.....71

5.11 ผลออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างกรด (กรณีศึกษาที่ 3) เมื่อพารามิเตอร์เปลี่ยน.....71

5.12 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างด่าง (กรณีศึกษาที่ 4).....80

5.13 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างกรด (กรณีศึกษาที่ 4).....80

5.14 ผลออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างด่าง (กรณีศึกษาที่ 4) เมื่อพารามิเตอร์เปลี่ยน.....81

5.15 ผลออปติไมซ์ในกลุ่มของน้ำล้างกรด (กรณีศึกษาที่ 4) เมื่อพารามิเตอร์เปลี่ยน.....81

5.16 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ของกระบวนการล้างน้ำ (บ่อน้ำล้างด่าง).....89

5.17 เปรียบเทียบผลการออปติไมซ์ของกระบวนการล้างน้ำ (บ่อน้ำล้างกรด).....89

5.18 เปรียบเทียบผลการประหยัดน้ำใหม่ของกระบวนการเตรียมผิวชิ้นงาน.....90