ระบบการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสำหรับกระบวนการทำแห้ง

นายรวิศ ทัศคร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540
ISBN 974-638-965-3
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17986576

FUZZY LOGIC CONTROL FOR DRYING PROCESS

Mr.Ravis Tasakorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Master of Science in Food Technology

Department of Food Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-638-965-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสำหรับกระบวนการทำแห้ง
โดย	นายรวิศ ทัศคร
ภาควิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยยุทธ ธัญพิทยากุล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. รมณี สงวนดีกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัยยุทธ ธัญพิทยากุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ
(คุณ ธีระ สงวนดีกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. ชิดพงศ์ ประดิษฐสุวรรณ)

รวิศ ทัศคร :ระบบการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกสำหรับกระบวนการทำแห้ง (FUZZY LOGIC CONTROL FOR DRYING PROCESS) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ชัยยุทธ ธัญพิทยากุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์; 145 หน้า. ISBN 974-638-965-3

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับควบคุมเครื่องทำแห้งน้ำตาลทรายแบบ shelf dryer ด้วยหลักการของฟัซซี่ลอจิก โดยทดสอบกับแบบจำลองของเครื่องทำแห้งที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรระบบต่างๆด้วยวิธีวิเคราะห์แบบอนุกรมเวลาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่ตรวจวัดได้ในโรงงานพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความชื้นในน้ำตาลทรายขาออกได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของบรรยากาศภายนอกเครื่องทำแห้ง(r = +0.560) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอก(r = +0.405) ค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ด (r =+0.519) ขนาดเม็ดน้ำตาลเฉลี่ยที่ 50 % สะสม (r = +0.627) ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขาออก (r = -0.564) และระดับอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง(r = -0.518) ผลการวิเคราะห์แสดงถึงความสัมพันธ์เชิงบวกของอุณหภูมิที่ความสูงระดับกลางและอุณหภูมิที่ความสูงระดับบน (r = +0.824) อุณหภูมิที่ความสูงระดับกลางและอุณหภูมิที่ความสูงระดับล่าง (r = +0.907) เมื่อจำลองและเปรียบเทียบผลของการควบคุมโดยใช้เครื่องควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกและการควบคุมโดยใช้เครื่องควบคุมแบบ PI ที่ได้จากโรงงานโดยใช้โปรแกรมภาษา C++ พบว่าที่สภาวะสมดุลเมื่อตัวแปรต่างๆมีค่าคงที่กรณีควบคุมด้วย PI กระบวนการเข้าสู่สมดุลที่ 69 เซลเซียส ภายในเวลา 5.39 นาที กรณีควบคุมด้วย FLC กระบวนการเข้าสู่สมดุลที่ 69 เซลเซียส ภายในเวลา 4.79 นาที เมื่อกำหนดความชื้นน้ำตาลทรายขาเข้าเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นระหว่างเวลา 5.59-22.9 นาทีกรณีควบคุมด้วย PI กระบวนการได้รับผลกระทบจากตัวแปรรบกวนระหว่างเวลา 14.1 นาที ถึง 23.4 นาทีโดยมีอุณหภูมิลดลงเป็น 67 เซลเซียส กรณีควบคุมด้วย FLC กระบวนการได้รับผลกระทบโดยมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 70 เซลเซียสในระหว่างเวลา 6.79-15.3 นาที เมื่อความชื้นน้ำตาลทรายขาออกมีค่าเพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลา 1.9 – 41.2 นาทีจากกรณีควบคุมด้วย PI พบว่ากระบวนการเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ 69 เซลเซียส ภายในเวลา 5.19 นาที กรณีควบคุมด้วย FLC พบว่ากระบวนการเข้าสู่ภาวะสมดุลช้าลง ด้วยค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นโดยอยู่ที่ 70 เซลเซียส ภายในเวลา 7.09 นาที เมื่อน้ำตาลขาเข้าหยุดไหลในเวลาระหว่าง 7.19 – 21.50 นาทีกรณีควบคุมแบบ PI พบว่า กระบวนการเข้าสู่สมดุลที่ 69 เซลเซียส ณ เวลา 5.39 นาที กรณีควบคุมแบบ FLC พบว่ากระบวนการเข้าสู่สมดุลที่ 69 เซลเซียส ณ เวลา 4.79 นาที และกระบวนการได้รับผลกระทบโดยมีอุณหภูมิลดลงจนคงที่อยู่ที่ 61 เซลเซียส ระหว่างเวลา 7.39 – 26.2 นาที เมื่อน้ำตาลทรายขาออกหยุดไหลระหว่าง 4.49 – 29.8 นาที กรณีควบคุมด้วย PI นั้นกระบวนการเข้าสู่สมดุลที่ 69 เซลเซียส ภายในเวลา 5.49 นาที และผลการควบคุมด้วย FLC พบว่ากระบวนการเข้าสู่สมดุลที่ 69 เซลเซียส ณ เวลา 4.79 นาที เมื่อค่าความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไม่พบผลที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิในเครื่องทำแห้งในการควบคุมทั้งสองกรณี

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่าเครื่องควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกมีขีดความสามารถเพียงพอในการนำมาใช้จริงกับกระบวนการทำแห้งน้ำตาลทรายโดยมีความไวต่อการควบคุม และความทนทานต่อตัวแปรรบกวนใกล้เคียงกับของเครื่องควบคุมแบบ PI ทั้งนี้ประสิทธิภาพขึ้นกับแนวทางที่ผู้ออกแบบเครื่องควบคุมแบบ FLC ได้ออกแบบชุดของกฎการควบคุมและการกำหนดค่าฟังก์ชันการเป็นสมาชิกให้กับตัวแปรต่างๆเป็นสำคัญ

ภาควิชา ..... **ลายมือชื่อนิสิต** .....

สาขาวิชา ..... **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา** .....

ปีการศึกษา ..... **ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม** .....

C727305 : MAJOR FOOD TECHNOLOGY
KEY WORD FUZZY LOGIC / FOOD AUTOMATION / DRYER CONTROL

RAVIS TASAKORN: FUZZY LOGIC CONTROL FOR DRYING PROCESS.THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. CHAIYUT TANYAPITTAYAKUL, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D. 145pp. ISBN 974-638-965-3

Aim of this research is to develop a computer simulation program based on the fuzzy control theory for controlling of a sugar shelf dryer. The developed program was tested with a dryer mathematical model acquired from analyzed results of process variable changes. Process variables, which are time series data, were analyzed with time series analysis for their cross correlation coefficients. Results analyzed from real operation condition show that changes in dried sugar moisture content were affected from changes of ambient air temperature (r=+0.560), relative humidity of ambient air (+0.405), covariation of sugar particles (r=+0.519), mean aperture at 50% accumulation (r=+0.627), relative humidity of exhaust air (r=-0.564), and exhaust air temperature (r= -0.518), result shows positive relation between bed temperature at top level and bed temperature at middle level of the dryer (r=+0.824), and between bed temperature at middle level and bed temperature at lowest level (r= +0.907). After comparing the simulated results between FLC and PI using C++ programming, steady state result shows that when using PI, process approached near set point at 69 celcius within 5.39 minutes, when using FLC, the result shown at 69 celcius within 4.79 minutes. In case of wet sugar moisture increased during 5.59-22.9 minutes, PI controlled process was affected from it during 14.1-23.4 minutes and a dryer temperature decreased to 67 celcius while FLC controlled process temperature was increased to 70 celcius during 6.79-15.3 minutes. When dried sugar moisture content was increased during 1.9-41.2 minutes, from PI control, results shown that the process temperature was reached at 69 celcius within 5.19 minutes, FLC control exhibited slower rate with 70 celcius within 7.09 minutes. In case wet sugar flow rate was stopped during 7.19-21.50 minutes, PI control process temperature was reached 69 celcius within 5.39 minutes, while FLC control reached the same temperature at 4.79 minutes. During 7.39-26.2 minutes, FLC controlled process also showed decreasing in temperature down to 61 celcius. When dried sugar flow rate was stopped during 4.49-29.8 minutes, PI controlled process reached 69 celcius at 5.49 minutes and FLC control results reached 69 celcius at 4.79 minutes. When relative humidity of ambient air changed, no significant effects were found in both controlling schemes.

From all results, fuzzy logic controller had enough potential in practice for sugar drying processes and had control resolution and robustness with disturbances almost the same as PI. It should be kept in mind that FLC efficiency depended significantly on the way which its rule base and membership function were designed.

ภาควิชา.....	**ลายมือชื่อนิสิต**.....
สาขาวิชา.....	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา**.....
ปีการศึกษา.....	**ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม**.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงสำเร็จสมบูรณ์ได้ยากยิ่ง หากมิได้รับความช่วยเหลือ การชี้แนะ รวมทั้งตอบข้อซักถามในประเด็นปัญหาจากบุคลากรหลายท่านทั้งที่ได้และไม่ได้กล่าวถึงเอาไว้ในกิตติกรรมประกาศนี้

ผู้วิจัยกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.ชัยยุทธ ธัญพิทยากุล และ ผศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่านเป็นอย่างสูง ที่ได้แนะนำให้คำปรึกษา ให้แนวคิดต่างๆในงานวิจัย การสัมมนา การวิเคราะห์ข้อมูล การแก้ไขโปรแกรม จนถึงการตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณ คุณ ธีระ สงวนดีกุล เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาแนะนำโรงงานน้ำตาลทรายท่ามะกา แก่ผู้วิจัย และได้กรุณาสละเวลาของท่านเพื่อนำผู้วิจัยไปชมโรงงานดังกล่าวเป็นครั้งแรกด้วยตนเอง

ขอบพระคุณ บุคลากรทุกฝ่าย ณ โรงงานน้ำตาลท่ามะกา ที่ได้กรุณาแนะนำวิธีการใช้เครื่องมือตรวจวัดคุณภาพในห้องปฏิบัติการ และอนุญาตให้ผู้วิจัยใช้เครื่องมือดังกล่าวเพื่องานวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ได้อนุเคราะห์ให้ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลจากการเดินเครื่องทำแห้งในสภาวะการผลิตจริง และให้ที่พักแก่ผู้วิจัยอย่างดีตลอดช่วงเวลาที่ได้ไปเก็บข้อมูล

ขอบพระคุณ ฝ่ายวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และบัณฑิตวิทยาลัย ในการให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอบพระคุณ คุณคม กมลพัฒนะ และคุณยศธร ศักดิ์เดชยนต์ ที่กรุณาช่วยลากเส้นกราฟในการวิเคราะห์ข้อมูลบางส่วน โดยเฉพาะคุณคม กมลพัฒนะ ที่กรุณาให้คำแนะนำบางส่วนในการเขียนรูปเล่ม ขอบพระคุณ อ.ดร.เพียรพรรค ทัศคร บิดาของผู้วิจัย ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้การสนับสนุนด้านการเงิน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กรุณาสนับสนุนทุนในการจัดซื้อฮาร์ดดิสก์ชิ้นใหม่เพื่อใช้ในงานวิจัยแทนชิ้นเดิมที่หมดสภาพการใช้งาน และการให้ยืมอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในช่วงปลายของการวิจัยจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ลง ขอบพระคุณ มารดา และป้าของผู้วิจัยที่กรุณาช่วยดูแลอำนวยความสะดวกด้านต่างๆทุกๆอย่างแก่ผู้วิจัย รวมทั้งการสนับสนุนด้านการเดินทางตลอดการวิจัย

หลังจากสิ้นสุดโครงการวิจัย ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์และความรู้ด้านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ กระบวนการผลิตและอบแห้งน้ำตาลทราย และวิศวกรรมการควบคุมระบบ เพิ่มเติมอย่างมากมาย นับว่าเป็นความรู้ที่มีค่ายิ่งในการใช้เป็นพื้นฐานในการทำวิจัยขั้นสูงต่อไป จึงใคร่ขอขอบพระคุณผู้อื่นที่ได้ให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัย แต่มิได้เอ่ยนามเอาไว้ในที่นี้ด้วยอีกคำรบหนึ่ง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....ค.
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....ง.
กิตติกรรมประกาศ.....จ.
สารบัญตาราง.....ฉ.
สารบัญรูป.....ฌ.

บทที่

1.บทนำ.....1
2.วารสารปริทัศน์.....4
2.1 การใช้ฟัซซี่ลอจิกในอุตสาหกรรมอาหาร
2.2 กระบวนการผลิตน้ำตาลทรายและเครื่องทำแห้งที่ใช้
2.3 การควบคุมชนิดต่างๆที่ใช้กับเครื่องทำแห้งในอุตสาหกรรม
3.การทดลอง.....33
3.1 ขั้นตอนการเก็บข้อมูลการทำแห้งจากเครื่องทำแห้งชนิด shelf dryer
3.2 การนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมกระบวนการทำแห้ง ด้วยภาษา C/C++
3.2.1 นำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยวิธี time series analysis โดยการวิเคราะห์หา cross correlation coefficient
3.2.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเครื่องทำแห้ง
3.2.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก
3.2.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการควบคุมแบบ PI
3.3 แนวการทำงานเบื้องต้นของโปรแกรมเครื่องทำแห้ง
3.3.1 วางผังงานเบื้องต้น (flow chart) ของโปรแกรมระบบควบคุมเครื่องทำแห้ง
3.3.2. เขียนซอร์สโค้ดโดยใช้โปรแกรมคอมไพเลอร์ Borland C++ 5.0 แล้วทดสอบการทำงานของโปรแกรมที่เขียนขึ้น

4.ผลการทดลอง(ตอนที่1).....43
4.1ผลการวิเคราะห์อนุกรมเวลาจากการเก็บข้อมูลโรงงานครั้งแรก
4.2ผลการวิเคราะห์อนุกรมเวลาจากการเก็บข้อมูลโรงงานครั้งที่สอง
5.วิจารณ์ผลการทดลอง(ตอนที่1).....89
6. แนวคิดในการออกแบบโปรแกรมจำลองการทำแห้งจากผลการทดลองตอนที่ 1.....100
7. ผลการทดลอง(ตอนที่2).....120
7.1ผลการควบคุมด้วย FLC
7.2 ผลการควบคุมด้วย PI
8.วิจารณ์ผลการทดลอง(ตอนที่2).....131
9.สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....135
รายการอ้างอิง.....143
ภาคผนวก.....148
ประวัติผู้เขียน.....156

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ข้อดีและข้อเสียของระบบควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้า และแบบป้อนกลับ.....23

2.2 นิยามของศัพท์ทางเทคนิคบางคำที่ใช้ในระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกแบบต่างๆ.....31

4.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....43

4.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....45

4.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้งและอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....46

4.4สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้งและความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....47

4.5สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้งและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....48

4.6สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้งและอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....49

4.7สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....50

4.8สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....51

4.9สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....52

4.10สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....53

4.11สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....54

4.12สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....55

4.13สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....56
4.14สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....57
4.15สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....58
4.16สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....59
4.17สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....60
4.18สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....61
4.19สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับบนของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับล่างของเครื่องทำแห้ง.....62
4.20สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับกลางของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับล่างของเครื่องทำแห้ง.....63
4.21สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับกลางของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับบนของเครื่องทำแห้ง.....64
4.22สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....65
4.23สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....66
4.24สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....67
4.25สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....68
4.26สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....69
4.27สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....70

4.28สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....71
4.29สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....72
4.30สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....73
4.31สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....74
4.32สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....75
4.33สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....76
4.34สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....77
4.35สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....78
4.36สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....79
4.37สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....80
4.38สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....81
4.39สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้งและอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....82
4.40สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับบนของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับล่างของเครื่องทำแห้ง.....83
4.41สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับกลางของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับล่างของเครื่องทำแห้ง.....84
4.42สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับกลางของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับบนของเครื่องทำแห้ง.....85

4.43 สรุปค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์จากข้อมูลที่เก็บบันทึกมาครั้งแรก.....86
4.44 สรุปค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์จากข้อมูลที่เก็บบันทึกมาครั้งที่สอง.....87

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรขาออก ตัวแปรที่สามารถปรับค่าได้ และตัวแปรที่เป็นสิ่งรบกวนต่างๆ 17

2.2 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....19

2.3 หลักการของเครื่องควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้า.....21

2.4 เครื่องควบคุมแบบป้อนค่าล่วงหน้าร่วมกับแบบจำลองคณิตสาสตร์ของกระบวนการเครื่องควบคุมแบบป้อนกลับ.....22

2.5 ระบบ Inferential control.....24

2.6 โครงสร้างของระบบควบคุมโดยไมโครโพรเซสเซอร์.....26

2.7 ระบบฐานความรู้.....29

3.1 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบควบคุมเครื่องทำแห้ง.....39

3.2 ผังงานของโปรแกรมตัวแทนเครื่องทำแห้ง.....40

3.3 ลำดับขั้นการทำงานของเครื่องควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก.....41

3.4 ผังงานของโปรแกรมควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก.....42

4.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....43

4.2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....44

4.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....45

4.4สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....46

4.5สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....47

4.6สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....48

4.7สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....49

4.8สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....50
4.9สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....51
4.10สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....52
4.11สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....53
4.12สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....54
4.13สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....55
4.14สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....56
4.15สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....57
4.16สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....58
4.17สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....59
4.18สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....60
4.19สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับบนของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับล่างของเครื่องทำแห้ง.....61
4.20สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับกลางของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับล่างของเครื่องทำแห้ง.....62
4.21สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับกลางของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับบนของเครื่องทำแห้ง.....63
4.22สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....64

4.23สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....65
4.24สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....66
4.25สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....67
4.26สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....68
4.27สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายนอกที่ไหลเข้าเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....69
4.28สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....70
4.29สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....71
4.30สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลเปียกขาเข้า และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....72
4.31สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....73
4.32สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....74
4.33สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของขนาดเม็ดน้ำตาลทราย (C.V.) และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....75
4.34สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก.....76
4.35สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....77
4.36สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างขนาดเฉลี่ยที่ 50% สะสมของเม็ดน้ำตาลทราย และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....78
4.37สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....79

4.38สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นของน้ำตาลทรายแห้งขาออก และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....80
4.39สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิของอากาศที่ไหลออกจากเครื่องทำแห้ง.....81
4.40สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับบนของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับล่างของเครื่องทำแห้ง.....82
4.41สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับกลางของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับล่างของเครื่องทำแห้ง.....83
4.42สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ระดับกลางของเครื่องทำแห้ง และอุณหภูมิที่ระดับบนของเครื่องทำแห้ง.....84
6.1 สมดุลพลังงานของเครื่องทำแห้งน้ำตาล.....103
6.2 ระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิกโดยทั่วไป.....108
6.3 ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก.....108
6.4 บล็อคไดอะแกรมแสดงการควบคุมเครื่องทำแห้ง.....110
6.5 บล็อคไดอะแกรมแสดงการควบคุมเครื่องทำแห้งโดยใช้เครื่องควบคุมแบบ FLC.111
6.6 ฟัซซี่เซตสำหรับอุณหภูมิเครื่องทำแห้ง.....113
6.7 ฟัซซี่เซตสำหรับความชื้นน้ำตาลทราย.....114
6.8 ฟัซซี่เซตสำหรับคำสั่งการควบคุม.....114
6.9 ผังงานแสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลัก.....119