

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การประยุกต์ใช้คาลมานฟิลเตอร์
ในการประมาณค่าเซตพอยท์ที่ดีที่สุดสำหรับระบบการชั่งแบบเต็ม

AN APPLICATION OF KALMAN FILTERING
IN ESTIMATING AN OPTIMAL SETPOINT FOR FILLING WEIGHING SYSTEM



จด.
ศ 3347
2558

เลขที่ 138779
วันที่ 16 ต.ค. 2558
วันเดือนปี

b.....
i.....

12717469

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ KMIL-2015-EN-M-010-149 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AN APPLICATION OF KALMAN FILTERING
IN ESTIMATING AN OPTIMAL SETPOINT FOR FILLING WEIGHING SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-EN-M-010-149

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การประยุกต์ใช้คาลมานฟิลเตอร์ในการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่ดีที่สุด
สำหรับระบบการชั่งแบบเต็ม

Thesis Title An Application of Kalman Filtering in Estimating an Optimal
Setpoint for Filling Weighing System

นักศึกษา นายศักรินทร์ สิ้นไชย

รหัสประจำตัว 56601262

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-010-149

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ยุทธพงษ์	รังสรรค์เสรี
รศ.ดร.จีรสุดา	โกษีย์ภรณ์
รศ.ดร.มนตรี	ศิริปรัชญานันท์
ผศ.ดร.ตุลยา	ลิมปิติ
รศ.ดร.ปราโมทย์	วาดเขียน

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-304

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้คาลมานฟิลเตอร์ในการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่ดีที่สุดสำหรับระบบการชั่งแบบเดิม
นักศึกษา	นายศักรินทร์ สินไชย
รหัสนักศึกษา	56601262
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน

บทคัดย่อ

ในระบบการชั่งน้ำหนักแบบเดิมวัดจุดบในแนวตั้งหรือเป็นการเดิมจากด้านบนนั้น โดยปกติแล้วตัวเซ็นเซอร์ในการวัดค่าน้ำหนักจะไม่ได้ติดตั้งไว้ที่ตัวควบคุมการเดิมวัดจุดบลงไปชั่ง นั้นเป็นเหตุให้ในการชั่งแต่ละครั้งจะมีค่าน้ำหนักที่เกินจากค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ นอกจากนั้นค่าน้ำหนักส่วนเกินจากการชั่งน้ำหนักแต่ละครั้งไม่คงที่เนื่องด้วยปัจจัยต่างๆ ดังนี้ การสั่นของเครื่องจักร อัตราการไหลของวัดจุดบ และรอบการอ่านค่าของเซ็นเซอร์ในระบบ ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ทำให้เกิดค่าน้ำหนักส่วนเกินจากการชั่งแต่ละครั้ง ดังนั้นเพื่อจะแก้ไขปัญหาในงานวิจัยนี้จึงใช้คาลมานฟิลเตอร์มาทำนายค่าเซ็ทพอยท์ที่ดีที่สุดเพื่อให้ค่าน้ำหนักส่วนเกินถูกชดเชยจนในการชั่งแต่ละครั้งมีค่าน้ำหนักตรงตามค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้ และเพื่อที่จะแสดงถึงประสิทธิภาพของเทคนิคที่นำเสนอ ผลการทดลองที่ได้นั้นถูกเปรียบเทียบกับวิธีการทางสถิติแบบต่างๆ ไป ซึ่งพบว่าเทคนิคที่นำเสนอนั้นความเร็วในการชั่งน้ำหนักแต่ละครั้งเพิ่มขึ้นและค่าความผิดพลาดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในงานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเทคนิคทางสถิติแบบต่างๆ ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	An Application of Kalman Filtering in Estimating an Optimal Setpoint for Filling Weighing System
Student	Mr. Sakkarin Sinchai
Student ID.	56601262
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Paramote Wardkein

ABSTRACT

Generally, a weighing system in which a sensor is not installed at a discharge gate, particularly in vertical filling, gives rise to an excess of weight added to the given target of weight. However, the excess is not constant on account of some factors, such as vibration of the machine, flow of the substance, and cycle time of the system. These factors cause the surplus to fluctuate. To solve this problem, Kalman filtering is presented to approximate the optimal setpoint to satisfy the defined target. To demonstrate the performance of the proposed technique, the resulting outcome is compared with that of using the conventional statistical method. The results have shown that the proposed approach has significantly increased the speed and lowered the error. It is pointed out that the proposed algorithm may be preferable to the traditional statistical technique owing to its effectiveness.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้า นาย ศักรินทร์ สิ้นไชย ได้ศึกษาและทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การประยุกต์ใช้กาลมานพิลเตอร์ในการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่ดีที่สุดสำหรับระบบการชั่งแบบเติม เพื่อสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนั้น สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงอยากกล่าวขอบคุณผู้สนับสนุนทุกท่าน

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน รศ.ดร.จิรสุดา โกษิยาภรณ์ และ ผศ.ดร.ตุลยา ลิมปิติ สำหรับคำแนะนำ และคำปรึกษา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ นายเลอสรณ์ กิรสมุทธานนท์ นางสาวสินีนาท สดมहाขลาสินธุ์ และนายธนนท์ คณะเจริญที่ได้ให้ความช่วยเหลือในส่วนแนวคิดและให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ บริษัท ไลอ้อน (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องจักรและวัตถุดิบในการทำงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง

และขอขอบคุณ นายภากร ศิริโชติดำรงค์ และนายสุธาสิน ศรีสุข ที่ช่วยให้ความบันเทิงในระหว่างที่ทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ความสำเร็จในวันนี้เกิดขึ้นได้เพราะการให้การสนับสนุน คำปรึกษาทั้งในเรื่องการเรียนและการใช้ชีวิตเป็นอย่างดีของ บิดาและมารดา รวมไปถึงกำลังใจที่ดีจากพี่น้องเพื่อนฝูงทุกคน

ศักรินทร์ สิ้นไชย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ระบบการชั่งน้ำหนักแบบเดิม.....	1
1.2 ลำดับการเดิมวัตถุติดลงไปชั่ง.....	2
1.3 ปัญหาของการชดเชย.....	7
1.4 เชื้อพอยท์คืออะไร.....	8
1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องชั่งแบบเดิมที่ผ่านมา.....	9
1.6 แนวทางการวิจัย.....	12
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	14
2.1 สหสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่ม.....	14
2.2 การหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่.....	15
2.3 ตัวกรองปรับค่าได้.....	16
2.4 คาลมานฟิลเตอร์.....	20
2.5 ค่าจำกัดความหนาทนแบบอ่อน.....	29
2.6 การค้นหาฟังก์ชันเส้นกราฟ.....	30
บทที่ 3 การสร้างแบบจำลองการวัด.....	36
3.1 การออกแบบจำลองการวัด.....	36
3.2 กระบวนการประมวลผลของคาลมานฟิลเตอร์.....	40
3.3 การออกแบบค่าจำกัดความหนาทนแบบอ่อนที่รับได้.....	42
3.4 ลำดับขั้นตอนที่ใช้ในโปรแกรมเพื่อแก้ปัญหา.....	42
3.5 การทดสอบด้วยข้อมูลจำลอง.....	44
3.6 การทดลองจริงกับเครื่องชั่งแบบเดิม.....	49
บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองกระบวนการ.....	58
4.1 การออกแบบจำลองกระบวนการ.....	58
4.2 การทดสอบด้วยข้อมูลจำลองโดยใช้วิธีการใหม่.....	62
4.3 การนำแบบจำลองกระบวนการไปทดลองจริงกับเครื่องชั่งแบบเดิม.....	65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	หน้า 76
เอกสารอ้างอิง.....	77
ภาคผนวก การคำนวณหาค่าคาดหวัง.....	78
ประวัติผู้เขียน.....	81



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบการวัดปริมาณวัตถุบ.....	1
1.2 เริ่มการชั่งน้ำหนักแบบเดิม.....	3
1.3 วัตถุบยังไม่แตกกระทบโหลดเซลล์.....	4
1.4 โหลดเซลล์เริ่มอ่านค่าน้ำหนัก.....	4
1.5 โหลดเซลล์อ่านค่าน้ำหนักได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์.....	4
1.6 โหลดเซลล์อ่านค่าน้ำหนักได้ 100 เปอร์เซ็นต์.....	5
1.7 วัตถุบที่ลอยค้ำอยู่ในอากาศไหลลงไปรวมในภาชนะที่ใช้ชั่ง.....	5
1.8 เสร็จสิ้นการชั่งน้ำหนักแบบเดิมโดยไม่มีการชดเชย.....	5
1.9 โหลดเซลล์อ่านค่าน้ำหนักได้ 95 เปอร์เซ็นต์.....	6
1.10 วัตถุบที่ลอยค้ำอยู่ในอากาศไหลลงไปรวมในภาชนะที่ใช้ชั่ง.....	7
1.11 เสร็จสิ้นการชั่งน้ำหนักแบบเดิมโดยมีการชดเชย.....	7
1.12 ปัญหาที่ทำให้น้ำหนักวัตถุบที่ลอยค้ำอยู่ในอากาศไม่คงที่.....	8
1.13 บล็อกไดอะแกรมการชดเชยเชิงพอยท์โดยการหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่.....	9
1.14 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบพีไอดี (PID Control).....	10
1.15 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic).....	11
1.16 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบเดิม.....	13
2.1 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานตัวกรองปรับค่าได้ (Wiener's Structure).....	17
2.2 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างตัวกรองปรับค่าได้ (Adaptive Filter Structure).....	18
2.3 บล็อกไดอะแกรมระบบเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่อง.....	21
2.4 ภาพแท่งความถี่ความเข้มแสง (Intensity) กับปริมาณจุดภาพ (Pixels).....	29
2.5 เปรียบเทียบสัญญาณต้นฉบับหลังป้อนเข้าค่าจำกัดความหนานแบบแข็งและแบบอ่อน	30
2.6 กราฟจุดคู่อันดับของผลการทดลองหนึ่งๆ.....	31
2.7 ฟังก์ชันเส้นโค้งที่ถูกสร้างขึ้นให้สัมพันธ์กับผลการทดลอง.....	32
3.1 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบการชดเชยค่าเชิงพอยท์น้ำหนัก.....	36
3.2 น้ำหนักวัตถุบที่ลอยค้ำอยู่ในอากาศที่น้ำหนักเป้าหมายต่างๆ.....	38
3.3 เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักเป้าหมายกับค่า H	40
3.4 โค้ดเสมือนสำหรับการจำลองการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB.....	43
3.5 โค้ดเสมือนสำหรับการทดลองจริงกับโปรแกรม SoMachine.....	44
3.6 ไดอะแกรมทางเวลาของแบบจำลองการเปิดปากปล่อยวัตถุบ.....	45
3.7 ผลการทดสอบหาค่าเชิงพอยท์เมื่อน้ำหนักที่ชั่งได้พอดีหรือมากกว่าค่าที่รับได้.....	47
3.8 ผลการทดสอบหาค่าเชิงพอยท์เมื่อน้ำหนักที่ชั่งได้ต่ำกว่าค่าที่รับได้.....	48
3.9 ผลการทดสอบหาค่าเชิงพอยท์เมื่อค่าเชิงพอยท์เริ่มต้นแตกต่างกัน.....	49
3.10 ซอฟต์แวร์ SoMachine.....	50
3.11 ขากรใช้งานสำหรับ Kalman_FF Function Block Diagram.....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.12 โค้ดสำหรับการประมาณค่าเซ็ทพอยท์อาศัยแบบจำลองการวัด.....	51
3.13 ค่าเซ็ทพอยท์จากแบบจำลองการวัดและเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 3005 กรัม.....	53
3.14 ค่าเซ็ทพอยท์จากแบบจำลองการวัดและเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 5005 กรัม.....	54
4.1 บล็อกไดอะแกรมการประมาณค่าเซ็ทพอยท์.....	58
4.2 ภาพแท่งความถี่ของค่า $E(z[n]Tg)$ และค่า $z[n]Tg$ ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม..	60
4.3 ภาพแท่งความถี่ของค่า $E(z[n]z[n-1])$ และค่า $z[n]z[n-1]$ ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม.....	61
4.4 ภาพแท่งความถี่ของค่า $E(z[n]Tg)$ และค่า $z[n]Tg$ ที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัม..	61
4.5 ภาพแท่งความถี่ของค่า $E(z[n]z[n-1])$ และค่า $z[n]z[n-1]$ ที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัม.....	62
4.6 โค้ดเสมือนสำหรับการจำลองที่ถูกแก้ไข.....	63
4.7 ผลการทดสอบหาค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีใหม่.....	64
4.8 โค้ดสำหรับการทดลองที่เพิ่มการปรับการค่า $A[n]$	65
4.9 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 3005 กรัม (ความชันปกติ).....	66
4.10 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 3505 กรัม (ความชันปกติ).....	67
4.11 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 5005 กรัม (ความชันปกติ).....	68
4.12 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 3005 กรัม (ความชันสูง).....	69
4.13 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 3505 กรัม (ความชันสูง).....	70
4.14 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 5005 กรัม (ความชันสูง).....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	เกณฑ์ที่ใช้กำหนดลำดับการเติมวัตถุบิ.....	2
1.2	เปรียบเทียบคุณสมบัติงานวิจัยที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องชั่งแบบเดิม.....	11
3.1	ข้อมูลทางสถิติน้ำหนักวัตถุบิที่ลอยค้ำอยู่ในอากาศ.....	39
3.2	ค่าเชิพอยท์กกลางและค่าอัตราส่วนของแต่ละน้ำหนักเป้าหมาย.....	39
3.3	การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการทดสอบประมาณค่าเชิพอยท์.....	46
3.4	การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับลำดับการเติม.....	46
3.5	การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการทดลองจริง.....	52
3.6	ค่าเชิพอยท์ที่ได้จากการทดลองจริง.....	55
3.7	ความถูกต้องของน้ำหนักที่วัดได้จากการทดลอง.....	56
3.8	เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการชั่งน้ำหนัก.....	56
3.9	ความถี่จำนวนการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติและไม่ปกติ.....	56
4.1	ค่าเชิพอยท์ที่ได้จากการทดสอบ.....	64
4.2	ค่าขอบเขตล่างที่รับได้ตามเงื่อนไขใหม่.....	66
4.3	ค่าเชิพอยท์ที่ได้จากการทดลองจริง (ความชันปกติ).....	72
4.4	ค่าเชิพอยท์ที่ได้จากการทดลองจริง (ความชันสูง).....	72
4.5	ความถูกต้องของน้ำหนักที่วัดได้จากการทดลอง (ความชันปกติ).....	73
4.6	เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการชั่งน้ำหนัก (ความชันปกติ).....	73
4.7	ความถี่จำนวนการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติและไม่ปกติ (ความชันปกติ).....	73
4.8	ความถูกต้องของน้ำหนักที่วัดได้จากการทดลอง (ความชันสูง).....	74
4.9	เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการชั่งน้ำหนัก (ความชันสูง).....	74
4.10	ความถี่จำนวนการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติและไม่ปกติ (ความชันสูง).....	74
4.11	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน.....	75

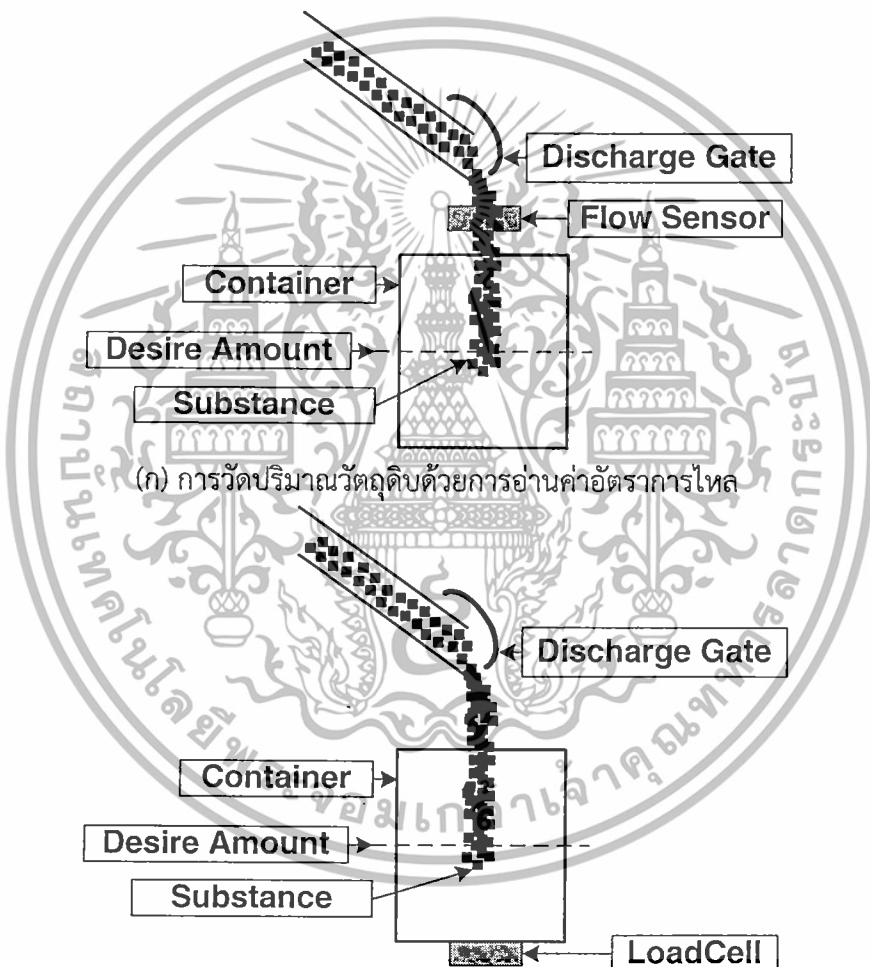
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ระบบการชั่งน้ำหนักแบบเดิม

ระบบการชั่งน้ำหนักแบบเดิมคือระบบการชั่งวัสดุบในขณะที่มีการเติมวัสดุบลงไปจนได้ น้ำหนักที่ต้องการ ระบบการชั่งน้ำหนักในลักษณะนี้มีรูปแบบการอ่านค่าน้ำหนักอยู่ 2 รูปแบบ ได้แก่ การอ่านค่าน้ำหนักโดยใช้การอ่านค่าอัตราการไหลที่ถูกเติมลงไปและการอ่านค่าน้ำหนักโดยใช้การอ่านค่าน้ำหนักที่ไหลลงไปกตหับ การอ่านค่าน้ำหนักของทั้ง 2 รูปแบบถูกแสดงในรูปที่ 1.1



(ก) การวัดปริมาณวัสดุบด้วยการอ่านค่าอัตราการไหล

(ข) การวัดปริมาณวัสดุบด้วยการอ่านค่าน้ำหนัก

รูปที่ 1.1 ระบบการวัดปริมาณวัสดุบ

การทำงานของระบบการวัดน้ำหนักวัสดุบในรูปที่ 1.1(ก) และ 1.1(ข) มีลักษณะการอ่านค่าน้ำหนักวัสดุบที่ต่างกัน โดยระบบในรูปที่ 1.1(ก) จะอ่านค่าน้ำหนักที่ไหลลงมาแบบทันทีทันใดทำให้เมื่อโฟลว์เซ็นเซอร์ (Flow Sensor) อ่านได้ค่าน้ำหนักที่ต้องการแล้วสั่งปิดปากปล่อยวัสดุบ (Discharge Gate) และพบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) น้ำหนักวัสดุบที่อยู่ในภาชนะที่ใช้ในการวัดจะมีน้ำหนักตามที่ต้องการพอดี แต่ในทางกลับกันระบบการวัดน้ำหนักในรูปที่ 1.1(ข) จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มอ่านค่าน้ำหนักที่ไหลลงมาก็ต่อเมื่อวัตถุติดตกลงไปกระทบด้านล่างของภาชนะที่ใช้ในการวัด นั่นหมายความว่า การอ่านค่าน้ำหนักวัตถุที่ไหลลงมาเกิดขึ้นที่หลังจากการปล่อยวัตถุติดลงมา เมื่อโหลดเซลล์ (Load Cell Sensor) อ่านได้ค่าน้ำหนักที่ต้องการแล้วสั่งปิดปากปล่อยวัตถุติดจะยังคงมีวัตถุติดที่ลอยค้างอยู่ในอากาศยังไม่ได้อ่านค่าเหลืออยู่และพบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัว (วัตถุติดที่ลอยค้างอยู่ในอากาศไหลลงไปรวมกับวัตถุติดที่อยู่ในภาชนะที่ใช้ในการวัดเรียบร้อยแล้ว) น้ำหนักวัตถุติดที่อยู่ในภาชนะที่ใช้ในการวัดมีน้ำหนักเกินจากค่าน้ำหนักที่ต้องการ

ดังนั้นระบบการชั่งน้ำหนักในลักษณะนี้ (รูปที่ 1.1(ข)) จำเป็นต้องมีการชดเชยการสั่งปิดปากปล่อยวัตถุติดให้เร็วขึ้นเพื่อให้น้ำหนักวัตถุติด ณ ตอนที่สั่งปิดปากปล่อยวัตถุติดรวมกับน้ำหนักวัตถุติดที่ลอยค้างอยู่ในอากาศได้เท่ากับน้ำหนักที่ต้องการ

ในความเป็นจริงพบว่าน้ำหนักวัตถุติดที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่เกิดขึ้นในการชั่งน้ำหนักแต่ละครั้งไม่คงที่ ทำให้การชดเชยสั่งปิดปากปล่อยวัตถุติดให้เร็วขึ้น ณ จุดเดิมๆทำไม่ได้ ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอวิธีการชดเชยหาจุดสั่งปิดปากปล่อยวัตถุติดให้เร็วขึ้นและมีความสอดคล้องกับน้ำหนักวัตถุติดที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ โดยที่ใช้ฟังก์ชันพอกเป็นวัตถุติดที่ใช้ในการชั่งน้ำหนัก

เพื่อให้เข้าใจการทำงานของระบบการชั่งแบบเดิมเพิ่มขึ้น ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการอธิบายลำดับการเติมวัตถุติดลงไปชั่ง

1.2 ลำดับการเติมวัตถุติดลงไปชั่ง

โดยทั่วไป ในหนึ่งรอบการชั่งของระบบการชั่งแบบเดิมมีลำดับการเติมวัตถุติดลงไปชั่ง 2 หรือ 3 ลำดับ [1][2] ขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่ต้องการชั่ง ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการแบ่งเกณฑ์ลำดับการเติม ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 เกณฑ์ที่ใช้กำหนดลำดับการเติมวัตถุติด

น้ำหนักที่ต้องการชั่ง	ระดับ	ลำดับการเติม	รูปแบบการเปิดปากปล่อยวัตถุติด
500 กรัม ถึง 1000 กรัม	ต่ำ	3	กว้าง -> แคบ -> ริน
1001 กรัม ถึง 9000 กรัม	กลาง	2	กว้าง -> แคบ
9001 กรัม ถึง 1000 กิโลกรัม	สูง	2	กว้าง -> แคบ

การเติมวัตถุติดลงไปชั่งจำเป็นต้องมีการควบคุมเปิดปากปล่อยวัตถุติดหลายลำดับด้วยเหตุผล ดังนี้ การเปิดปากปล่อยวัตถุติดให้กว้างในช่วงแรกเพื่อให้น้ำหนักวัตถุติดเข้าสู่เป้าหมายเร็วขึ้นแต่ไม่สามารถสั่งให้เปิดกว้างตลอดได้เพราะเมื่อวัตถุติดถูกปล่อยลงมาเรื่อยๆมีแรงกระแทกสูงไปด้วย แรงกระแทกนี้อาจทำให้โหลดเซลล์อ่านค่าได้ผิดพลาดที่น้ำหนักที่ได้นั้นมากกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักที่ต้องการ (ต่อไปจะเรียกว่าน้ำหนักเป้าหมาย) แล้วทำให้สั่งปิดปากปล่อยวัตถุติด โดยที่เมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วน้ำหนักที่วัดได้จริงมีแนวโน้มที่จะต่ำกว่าน้ำหนักต้องการ ดังนั้นการเปิดปากปล่อยวัตถุติดให้กว้างมักจะถูกสั่งให้เปิดจนได้น้ำหนักประมาณ 70 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเป้าหมายและปากปล่อยวัตถุติดจะถูกเปลี่ยนมาเปิดให้แคบจนน้ำหนักวัตถุติดถึงน้ำหนักเป้าหมาย ปากปล่อยวัตถุติดก็จะถูกสั่งปิด การเปิดปากปล่อยวัตถุติดให้แคบนอกจากช่วยลดความผิดพลาดในการอ่านค่าน้ำหนักแล้วยังช่วยให้ง่ายต่อการควบคุมเพราะแรงกระแทกที่ลดลงส่งผลให้การสั่นสะเทือนลดลงทำให้โอกาสที่น้ำหนักที่วัดได้น้อยกว่าน้ำหนักเป้าหมายจากแรงกระแทกลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เพื่อการใช้งานภายในเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 1.1 น้ำหนักที่ต้องการชั่งในช่วง 500 กรัม ถึง 1000 กรัม มีลำดับการเติม 3 ลำดับเนื่องจากว่าน้ำหนักในช่วงนี้อยู่ในเกณฑ์ต่ำ ค่าความผิดพลาดที่รับได้จึงต่ำด้วยดังนั้นการเปิดปากปล่อยวัสดุบิให้ริน (ลำดับที่ 3) ก็ยิ่งช่วยให้เกิดความผิดพลาดต่ำลง แต่ในกรณีของน้ำหนักที่ต้องการชั่งอยู่ในระดับกลางและสูง ค่าความผิดพลาดที่รับได้ค่อนข้างสูงดังนั้นลำดับการเปิดปากปล่อยวัสดุบิจึงใช้แค่ 2 ลำดับ

ในวิทยานิพนธ์นี้น้ำหนักที่ต้องการชั่งอยู่ในระดับกลาง ช่วง 3000 กรัม ถึง 5000 กรัม และมีลำดับการเปิดปากปล่อยวัสดุบิ 2 ลำดับคือเปิดกว้างและเปิดแคบ

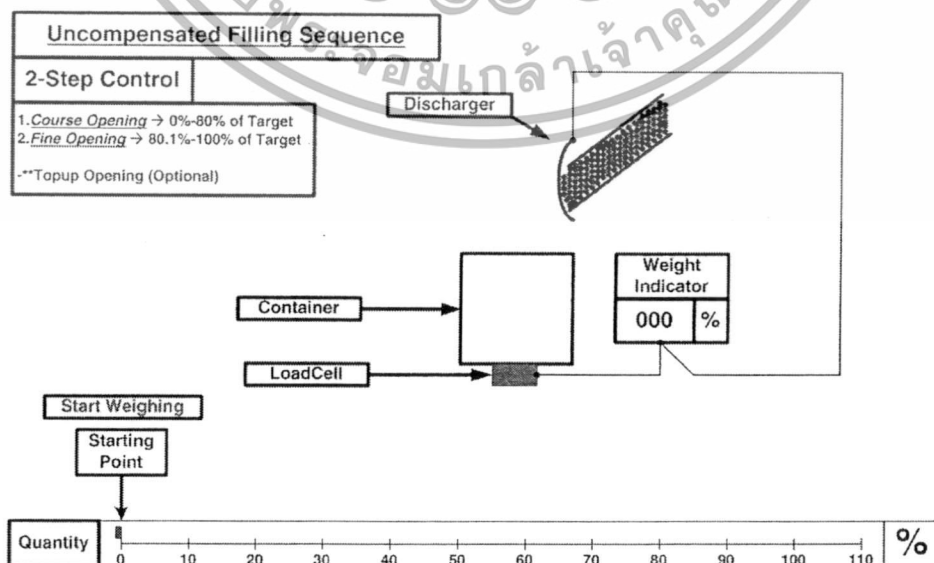
นอกจากลำดับการเปิดปากปล่อยวัสดุบิดังแสดงในตารางที่ 1.1 ยังมีลำดับการเปิดปากปล่อยวัสดุบิพิเศษอีกหนึ่งลำดับเพิ่มเติมในกรณีที่เปิดปากปล่อยวัสดุบิครบทั้ง 3 ลำดับสำหรับน้ำหนักที่ต้องการชั่งในระดับต่ำและ 2 ลำดับสำหรับน้ำหนักที่ต้องการชั่งในระดับกลางและสูงแล้ว น้ำหนักที่วัดได้ยังคงต่ำกว่าน้ำหนักเป้าหมาย ลำดับการเปิดปากปล่อยวัสดุบิพิเศษนี้จะถูกส่งการสั่งการเปิดปากปล่อยวัสดุบิในระดับนี้จะแคบมากซึ่งจะแคบกว่าการเปิดแบบรินในการเปิดลำดับที่ 3 ของน้ำหนักที่ต้องการชั่งในระดับต่ำ

กล่าวโดยสรุปแล้วระบบการชั่งแบบเต็มที่ทำงานปกติจะมี 3 ลำดับสำหรับน้ำหนักเป้าหมายในระดับต่ำและจะมี 2 ลำดับสำหรับน้ำหนักเป้าหมายในระดับกลางและสูง ในทางกลับกันถ้ามีการเปิดปากปล่อยวัสดุบิแบบพิเศษระบบการชั่งแบบเต็มจะไม่ได้ทำงานอยู่ในสภาวะปกติ นั้นส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักต่อหนึ่งรอบการชั่งเพิ่มขึ้นด้วย

1.2.1 การชั่งน้ำหนักแบบเต็มโดยไม่มีารชดเชย

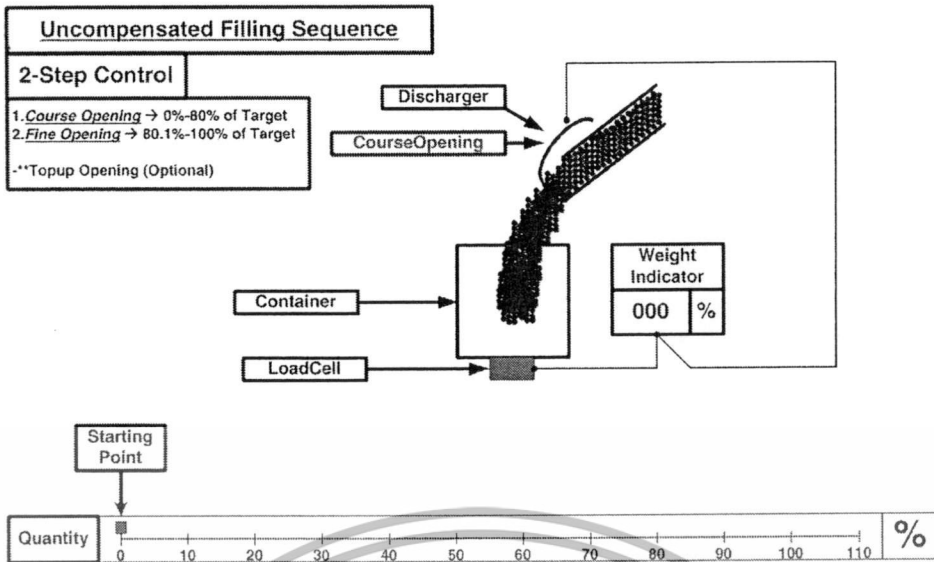
การชั่งน้ำหนักแบบเต็มโดยไม่มีารชดเชยในหัวข้อนี้กำหนดให้เป็น 100 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเป้าหมาย โดยที่ปากปล่อยวัสดุบิจะถูกเปิดให้กว้างตั้งแต่ 0 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเป้าหมายและจากนั้นปากปล่อยวัสดุบิจะถูกเปิดให้แคบตั้งแต่ 80.1 ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเป้าหมายและเมื่อครบ 100 เปอร์เซ็นต์ปากปล่อยวัสดุบิจะถูกสั่งปิด นอกจากนี้ยังได้สมมติให้ค่าน้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศมีอยู่ 5 เปอร์เซ็นต์ (ในความเป็นจริงอาจจะไม่ใช่ 5 เปอร์เซ็นต์)

ขั้นตอนการชั่งน้ำหนักถูกแสดงเป็นไดอะแกรมในรูปที่ 1.2 ถึง 1.8

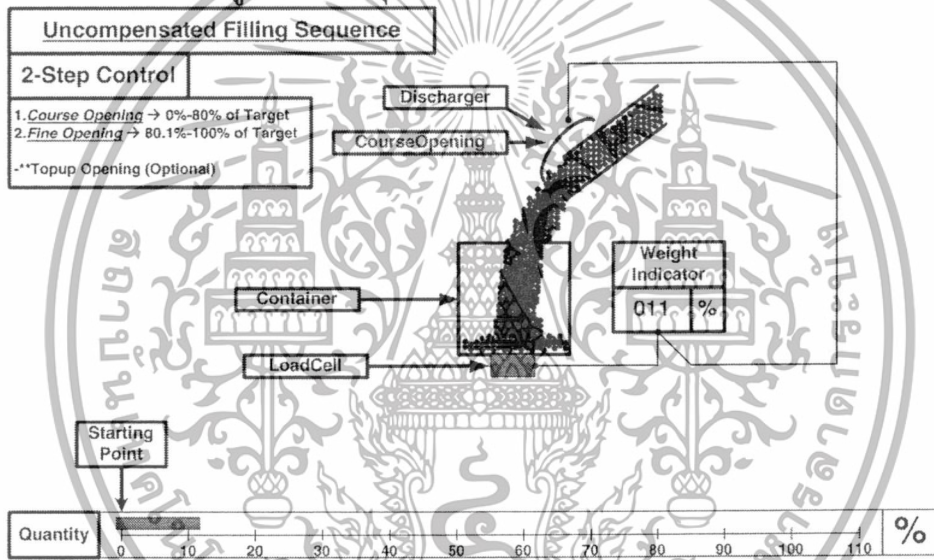


รูปที่ 1.2 เริ่มการชั่งน้ำหนักแบบเต็ม

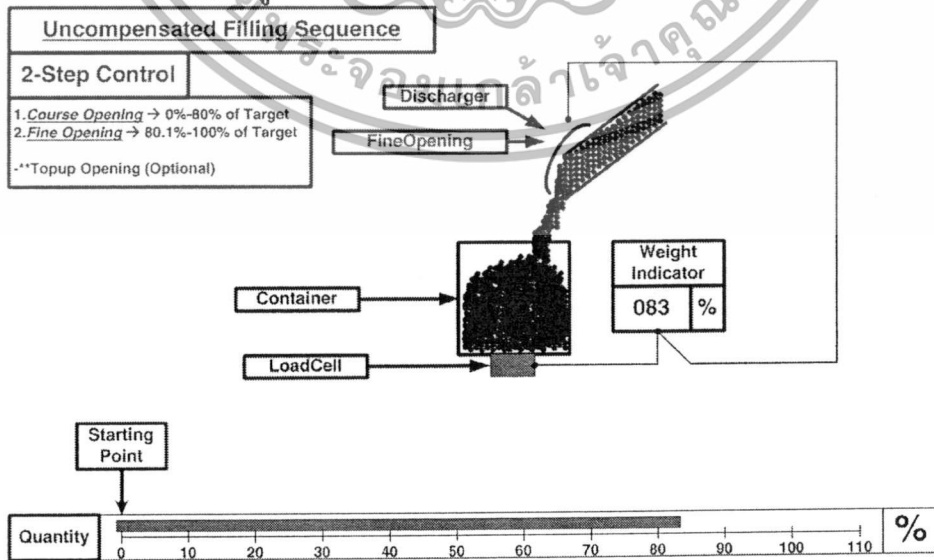
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 วัตถุที่ยังไม่ตกกระทบโหลดเซลล์

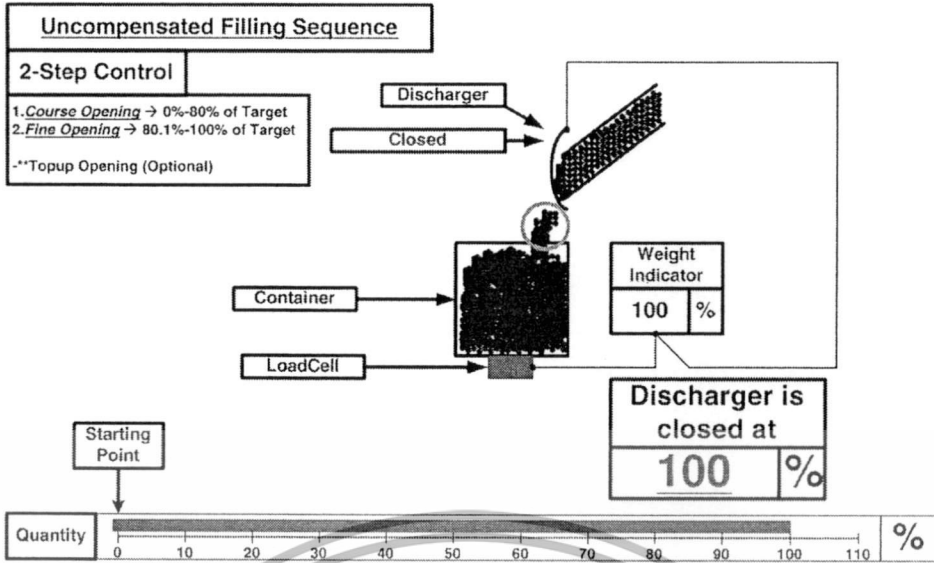


รูปที่ 1.4 โหลดเซลล์เริ่มอ่านค่าน้ำหนัก

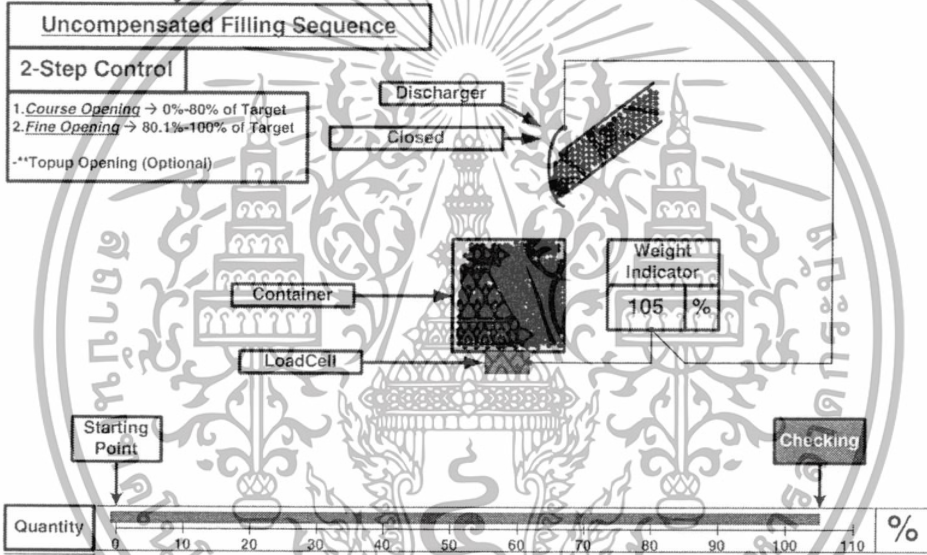


รูปที่ 1.5 โหลดเซลล์อ่านค่าน้ำหนักได้มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

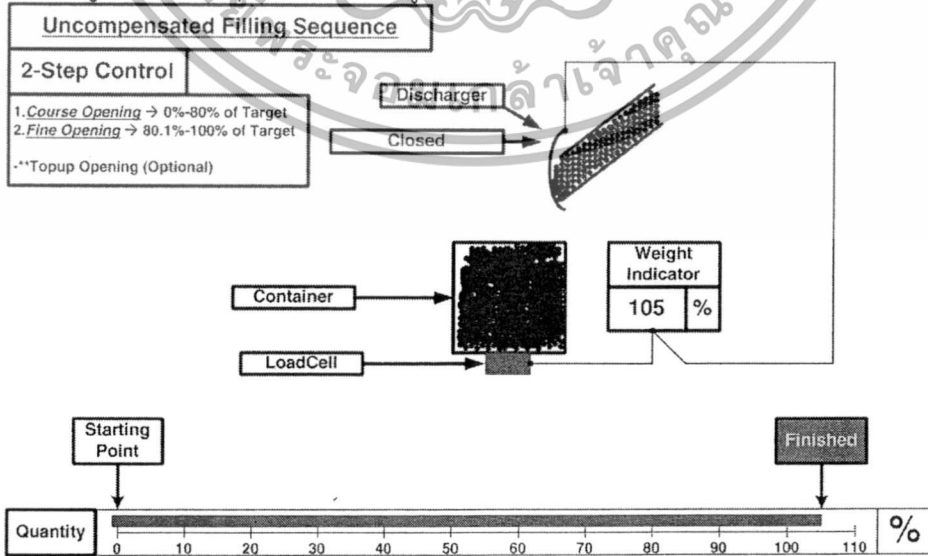
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.6 โหลดเซลล์อ่านค่าน้ำหนักได้ 100 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 1.7 วัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศไหลลงไปรวมในภาชนะที่ใช้ซึ่ง



รูปที่ 1.8 เสร็จสิ้นการชั่งน้ำหนักแบบเต็มโดยไม่มีกรชดเชย

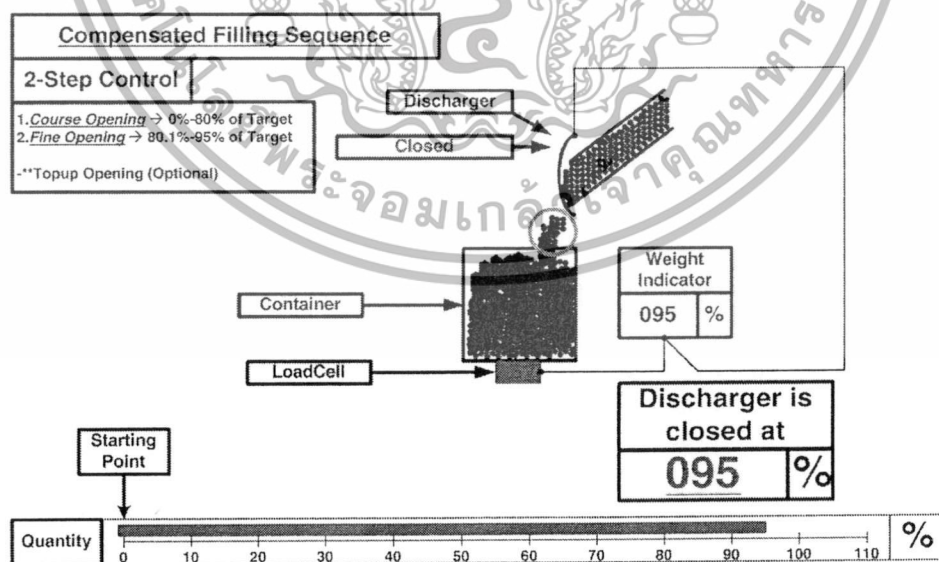
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 1.2 เป็นการเริ่มการชั่งน้ำหนัก เมื่อปากปล่อยวัสดุเปิดให้กว้าง (ลำดับที่ 1) วัสดุไหลลงมาดังแสดงในรูปที่ 1.3 แต่โหลดเซลล์ยังไม่เริ่มการอ่านค่าน้ำหนักเพราะวัสดุยังไม่ตกกระทบลงบนตัวภาชนะที่ใช้ชั่งและเมื่อวัสดุตกกระทบโหลดเซลล์ดังแสดงในรูปที่ 1.4 โหลดเซลล์เริ่มทำการค่าน้ำหนัก หลังจากที่โหลดเซลล์อ่านค่าน้ำหนักไปได้ระยะหนึ่งและพบว่าน้ำหนักมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์แล้วปากปล่อยวัสดุถูกปรับให้เปิดแคบ (ลำดับที่ 2) ดังแสดงในรูปที่ 1.5 และเมื่อโหลดเซลล์อ่านค่าน้ำหนักได้ 100 เปอร์เซ็นต์ปากปล่อยวัสดุถูกสั่งให้ปิดแต่ยังมีวัสดุบลอยค้างอยู่ในอากาศ (อยู่ในกรอบวงกลม) ดังแสดงในรูปที่ 1.6 ทันทีที่ปากปล่อยวัสดุถูกสั่งปิดระบบการชั่งจะหน่วงเวลารอให้วัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศไหลลงไปรวมกับวัสดุที่อยู่ในภาชนะที่ใช้ชั่ง โดยที่จะเรียกช่วงนี้ว่าสภาวะคงตัว ระบบการชั่งจะตรวจสอบว่าเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วน้ำหนักที่อ่านได้ทั้งหมดได้เท่าไร (ทั้งหมด 105 เปอร์เซ็นต์) ดังแสดงในรูปที่ 1.7 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าน้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศทำให้น้ำหนักเพิ่มขึ้นอีก 5 เปอร์เซ็นต์จากน้ำหนักเป้าหมาย สุดท้ายหลังจากที่ตรวจสอบน้ำหนักเสร็จเรียบร้อยแล้วระบบจะแจ้งว่าการชั่งน้ำหนักเป็นอันเสร็จเรียบร้อยดังแสดงในรูปที่ 1.8

1.2.2 การชั่งน้ำหนักแบบเต็มโดยมีการชดเชย

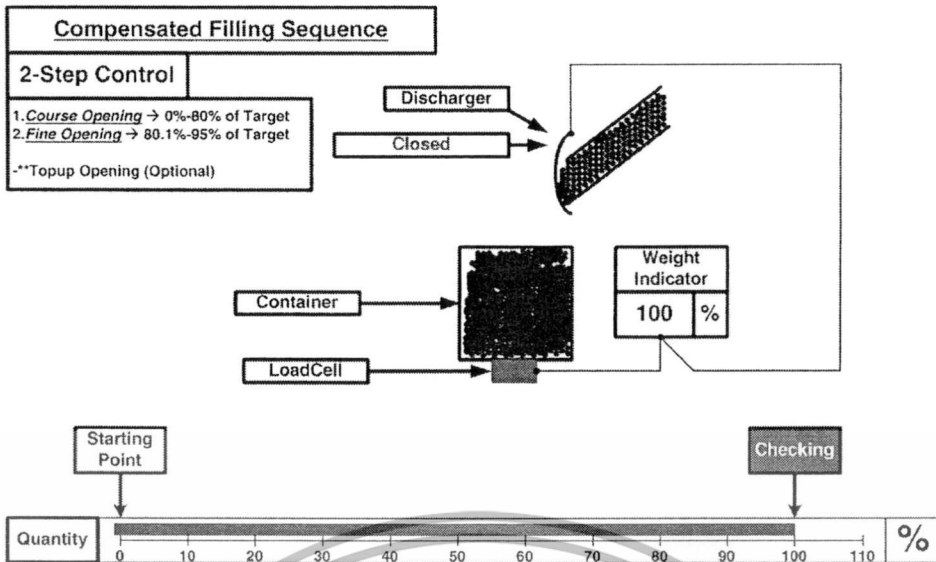
การชั่งน้ำหนักแบบเต็มโดยมีการชดเชยในหัวข้อนี้กำหนดให้น้ำหนักเป้าหมายเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ปากปล่อยวัสดุจะถูกเปิดให้กว้างตั้งแต่ 0 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเป้าหมาย แต่จากหัวข้อย่อย 1.2.1 ค่าน้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศถูกสมมติให้มีอยู่ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นการชดเชยจะโดยการสั่งให้ปากปล่อยวัสดุเปิดให้แคบตั้งแต่ 80.1 ถึง 95 เปอร์เซ็นต์เพื่อชดเชยน้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ

ขั้นตอนการชั่งน้ำหนักที่มีการชดเชยจะเหมือนกับการชั่งน้ำหนักที่ไม่มีการชดเชยตั้งแต่รูปที่ 1.2 ถึงรูปที่ 1.5 แต่ขั้นตอนหลังจากนั้นจะแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 1.9 1.10 และ 1.11

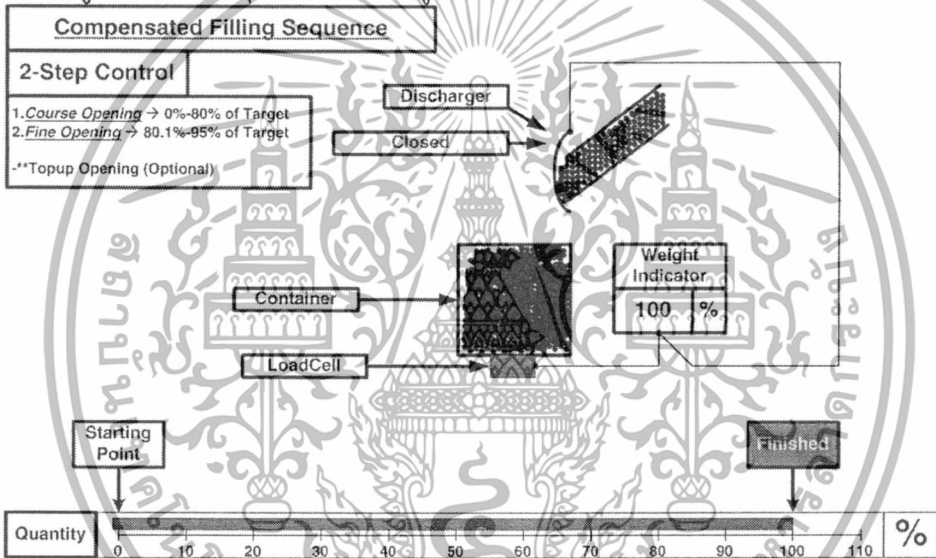


รูปที่ 1.9 โหลดเซลล์อ่านค่าน้ำหนักได้ 95 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.10 วัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศไหลลงโปรวมในภาชนะที่ใช้ชั่ง



รูปที่ 1.11 เสร็จสิ้นการชั่งน้ำหนักแบบเต็มโดยมีการชดเชย

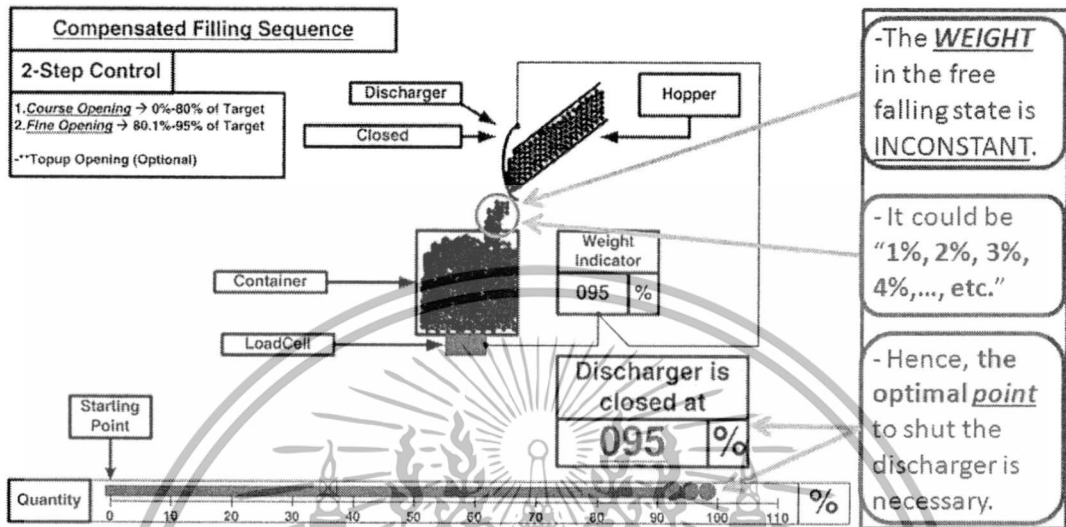
จากรูปที่ 1.9 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อชดเชยด้วยการสั่งให้ปิดปากปล่อยวัสดุเร็วขึ้น (ปิดที่ 95 เปอร์เซ็นต์) ทำให้น้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ (อยู่ในกรอบวงกลม) ไหลลงมารวมกับวัสดุที่ที่อยู่ในภาชนะที่ใช้ชั่งได้เท่ากับน้ำหนักเป้าหมายพอดีเมื่อเข้าสู่ภาวะคงตัวดังแสดงในรูปที่ 1.10 และเมื่อขั้นตอนการตรวจสอบน้ำหนักเสร็จเรียบร้อยระบบจะแจ้งว่าการชั่งน้ำหนักเป็นอันเสร็จเรียบร้อยดังแสดงในรูปที่ 1.11

ในหัวข้อถัดไป (หัวข้อ 1.3) จะเป็นการกล่าวถึงปัญหาของการชดเชย

1.3 ปัญหาของการชดเชย

จากการชดเชยในหัวข้อ 1.2.2 ค่าน้ำหนักวัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศถูกสมมติให้เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นทำให้ทราบว่าควรจะชดเชยสั่งให้ปิดปากปล่อยวัสดุให้เร็วขึ้นที่กี่เปอร์เซ็นต์ แต่จากที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1.1 ว่าน้ำหนักวัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศในการชั่งแต่ละครั้งไม่คงที่ เพราะการชั่งน้ำหนักในลักษณะนี้อาศัยแรงโน้มถ่วงของโลกให้วัสดุไหลลงมายังภาชนะที่ใช้ชั่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นน้ำหนักวัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศค่อนข้างจะคงที่หรือแกว่งนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่อยู่ในถังพักด้านบน (Hopper) ที่รอการปล่อยลงมาซึ่งดังแสดงในรูปที่ 1.12 เนื่องจากในระหว่างการลำเลียงวัสดุมาอย่างต่อเนื่องถึงพักด้านบน วัสดุถูกปล่อยผ่านไปในระบบเปิดทำให้มีโอกาสไปทำปฏิกิริยากับอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ ฝุ่นละออง หรือลม ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อความชื้นของวัสดุ



รูปที่ 1.12 ปัญหาที่ทำให้น้ำหนักวัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศไม่คงที่

ถ้าในวันใดวัสดุที่ใช้ซึ่งในถังพักด้านบนมีความชื้นเหมาะสม (Good Flow) ไม่จับตัวกัน เป็นก้อนน้ำหนักวัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศค่อนข้างจะคงที่ แต่ในทางกลับกันถ้าวันใดวัสดุที่ใช้ซึ่งในถังพักด้านบนมีความชื้นที่ไม่เหมาะสม (Bad Flow) จับตัวกันเป็นก้อนจะส่งผลให้น้ำหนักวัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศจะแกว่งมาก ผลที่ตามมาคือน้ำหนักวัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศอาจจะเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ 2 เปอร์เซ็นต์ 3 เปอร์เซ็นต์ 4 เปอร์เซ็นต์ หรือค่าอื่นๆ ก็ได้

ดังนั้นปัญหาของการชดเชยคือไม่ทราบว่าจะตั้งปิดปากปล่อยวัสดุจุดไหนดีที่สุดและสอดคล้องกับน้ำหนักวัสดุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ โดยที่จุดตั้งปิดอาจจะเป็นไปได้ตั้งแต่ 90 ถึง 97 เปอร์เซ็นต์เป็นต้นดังแสดงที่มุมขวาล่างของรูปที่ 1.12

1.4 เซ็ทพอยท์คืออะไร

เซ็ทพอยท์ (Setpoint) คือค่าที่ใช้บอกเครื่องจักรให้สั่งปิดปากปล่อยวัสดุเมื่อได้ปริมาณ (ในที่นี้คือน้ำหนัก) ที่ต้องการแล้ว ซึ่งก็คือจุดสั่งปิดปากปล่อยวัสดุที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ดังนั้นต่อไปจะเรียกเซ็ทพอยท์แทนจุดสั่งปิดปากปล่อยวัสดุ

จากหัวข้อย่อย 1.2.1 และ 1.2.2 ค่าเซ็ทพอยท์ถูกแทนด้วยจำนวนเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเป้าหมายเพื่อให้ง่ายต่อการอธิบาย แต่ในการใช้งานจริงค่าเซ็ทพอยท์จะถูกแสดงอยู่ในเทอมของน้ำหนัก ตัวอย่างเช่น เซ็ทพอยท์ถูกตั้งไว้ที่ 95 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเป้าหมาย ถ้าน้ำหนักเป้าหมายคือ 1000 กรัม เซ็ทพอยท์ที่ถูกนำไปใช้สั่งเครื่องจักรเพื่อสั่งปิดปากปล่อยวัสดุคือ 950 กรัม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องชั่งแบบเติมที่ผ่านๆมา

การเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องชั่งแบบเติมจากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าจุดประสงค์หลักๆ ของงานวิจัย [3-7] มีอยู่ 2 ประการคือ

- เพื่อเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักที่ชั่งได้ในแต่ละรอบการชั่ง (ลดการสูญเสียวัตถุดิบ)
- เพื่อเพิ่มความเร็วในการชั่งในแต่ละรอบการชั่ง (ผลิตได้มากขึ้น เพิ่มโอกาสทางการขาย)

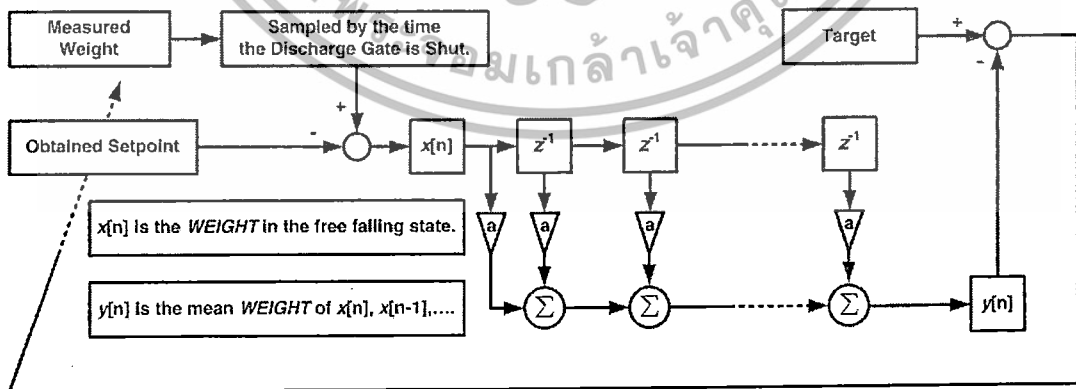
งานวิจัย [4-6] เน้นในเรื่องการเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักที่ชั่งได้เป็นหลักด้วยควบคุมการเปิดปากปล่อยวัตถุดิบหลายลำดับ (มากกว่า 3 ลำดับจากที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1.2) แต่ในงานวิจัย [3] และ [7] สนใจทั้งเพิ่มความถูกต้องของน้ำหนักที่ชั่งได้และลดเวลาที่ใช้ในการชั่งในแต่ละครั้งด้วยการปรับค่าเซ็ทพอยท์ในการปิดปากปล่อยวัตถุดิบแต่ยังคงใช้การควบคุมการเปิดปากปล่อยวัตถุดิบ 2 ลำดับเท่าเดิม

ดังนั้นเทคนิคที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องชั่งในลักษณะจึงถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มได้แก่

- กลุ่มที่ใช้การควบคุมการเปิดปากปล่อยวัตถุดิบหลายลำดับ [4-6]
- กลุ่มที่ใช้การปรับค่าเซ็ทพอยท์ [3][7]

1.5.1 การปรับเซ็ทพอยท์โดยใช้เทคนิคหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ (Moving Average)

งานวิจัยใน [3] ได้นำเสนอวิธีการใช้ค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ (Moving Average) หรืออาจจะเรียกว่าตัวกรองเอฟโออาร์แบบไม่เอนเอียง (Unbiased Finite-Impulse-Response(FIR) filter) ดังแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1.13 คือการเก็บบันทึกค่าน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ ($x[n]$) ในช่วงระยะเวลาหนึ่ง (เช่น 3 ตัวอย่าง หรือ 5 ตัวอย่าง หรือแล้วแต่จะกำหนด) เพื่อนำค่าที่เก็บบันทึกนั้นมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยแล้วนำมาชดเชยค่าเซ็ทพอยท์ การจะใช้วิธีของ [3] นั้น หน่วยความจำส่วนหนึ่งจะถูกสำรองไว้เพื่อที่จะเก็บบันทึกข้อมูลซึ่งจำนวนหน่วยความจำที่ต้องสำรองไว้ขึ้นกับความกว้างของการใช้ค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่และในการใช้วิธีการนี้ค่าเซ็ทพอยท์ที่ถูกชดเชยจะถูกหวนวงเวลาเนื่องด้วยการคำนวณค่าเฉลี่ยน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ ($y[n]$) แบบเคลื่อนที่นั้นต้องเก็บตัวอย่างให้ครบจำนวนที่ต้องการก่อนแล้วจึงทำการชดเชย การใช้เทคนิคนี้มีแนวโน้มที่ค่าเซ็ทพอยท์ที่ถูกชดเชยจะไม่สอดคล้องค่าน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่เกิดขึ้นจริง



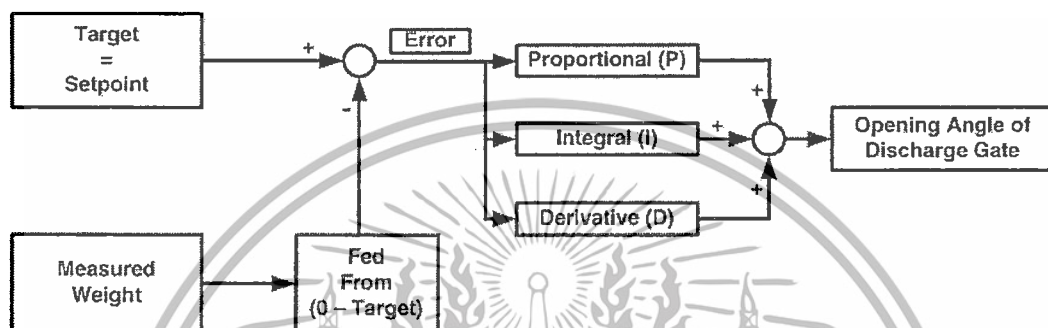
รูปที่ 1.13 บล็อกไดอะแกรมการชดเชยเซ็ทพอยท์โดยการหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่

การเก็บบันทึกค่าน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศสามารถคำนวณหาได้โดยการตั้งค่าเซ็ทพอยท์ที่คำนวณได้ในครั้งก่อนหน้าให้กับเครื่องชั่ง เมื่อเครื่องชั่งสั่งปิดปากปล่อยวัตถุดิบ รอให้เข้าเอกสตูส์ถ้าจะคงตัวแล้วจึงทำการอ่านค่าน้ำหนักที่วัดได้มาแล้วจึงนำมาลบออกจากค่าเซ็ทพอยท์ที่กำหนดไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้กับเครื่องชั่ง (รูปที่ 1.13 ประกอบ) ผลต่างที่ได้ก็คือค่าน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ ทำการเก็บบันทึกครบบจำนวนที่กำหนดสำหรับเพื่อค่าน้ำหนักค่าเฉลี่ย ($y[n]$) และนำค่าเฉลี่ยไปลบออกจากน้ำหนักเป้าหมาย ซึ่งผลต่างที่ได้จะเป็นค่าเซ็ทพอยท์ใหม่สำหรับการชั่งน้ำหนักครั้งต่อไป

1.5.2 การเปิดปากปล่อยวัตถุหลายลำดับโดยใช้การควบคุมแบบพีไอดี (PID)

ในงานวิจัย [4-5] คุณ Araki, N และทีมผู้ร่วมวิจัยอาศัยโครงสร้างพื้นฐานของการควบคุมแบบพีไอดี (PID-Proportional-Integral-Derivative) มาประยุกต์ในการควบคุมการเปิดปากปล่อยวัตถุโดยการทำงานของเทคนิคนี้ถูกจำลองเป็นบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 1.14

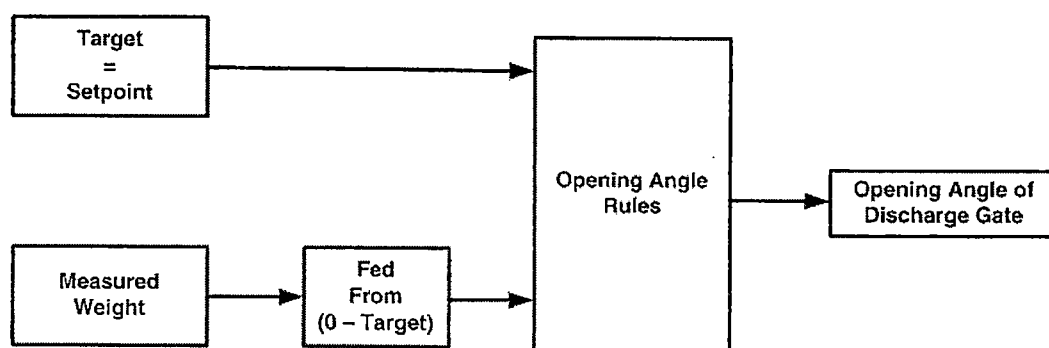


รูปที่ 1.14 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบพีไอดี (PID Control)

ด้วยการใช้เทคนิคนี้ทำให้ค่าเซ็ทพอยท์สามารถตั้งให้เท่ากับค่าน้ำหนักเป้าหมายได้เลย การทำงานของเทคนิคนี้ น้ำหนักที่วัดได้จากโหลดเซลล์จะถูกป้อนเข้าไปหาผลต่าง (Error) กับน้ำหนักเป้าหมายตั้งแต่ศูนย์จนน้ำหนักที่วัดได้เท่ากับน้ำหนักเป้าหมาย ซึ่งในช่วงแรกผลต่างมีค่าสูงทำให้ปากปล่อยวัตถุถูกเปิดกว้างดังนั้นวัตถุจะไหลลงมาทำให้ น้ำหนักที่วัดได้จะเข้าสู่ น้ำหนักเป้าหมายได้รวดเร็ว แต่ในทางกลับกันเมื่อผลต่างมีค่าต่ำๆ ปากปล่อยวัตถุจะถูกเปิดแคบมากๆ วัตถุจึงค่อยๆ ไหลลงมาเพื่อให้เกิดค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ส่งผลให้ในช่วงการเปิดปากแคบมากๆ ใช้เวลานานกว่าจะเสร็จสิ้นการชั่ง การเปิดปากปล่อยวัตถุของเทคนิคนี้ขึ้นอยู่กับผลต่างของน้ำหนักที่วัดได้กับน้ำหนักเป้าหมายทำให้การเปิดปากจะมีหลายลำดับเพราะค่าผลต่างเปลี่ยนไปเรื่อยๆ จนเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามด้วยการใช้เทคนิคเหล่านี้ถึงแม้จะชั่งน้ำหนักได้แม่นยำแต่ก็ต้องแลกกับความซับซ้อนในการสร้าง การใช้ทรัพยากรเป็นจำนวนมากของตัวประมวลผลและเวลาที่ใช้ในการชั่งที่เพิ่มขึ้น

1.5.3 การเปิดปากปล่อยวัตถุหลายลำดับโดยใช้การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

วิธีการที่อยู่บนพื้นฐานของฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) ได้ถูกนำเสนอในงานวิจัย [6] โดยคุณ Dejun, Z และทีมผู้ร่วมวิจัยเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลที่ตามมาคือเงื่อนไขต่างๆ ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อที่จะให้ครอบคลุมสถานการณ์ต่างๆ ที่มีผลต่อการควบคุมการเปิดปากปล่อยวัตถุ โดยวิธีการนี้ถูกจำลองการทำงานเป็นบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 1.15



รูปที่ 1.15 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic)

หลักการควบคุมการเปิดปากปล่อยวัตถุบดของวิธีการนี้จะคล้ายคลึงกับเทคนิค [4-5] เพียงแต่วิธีการของ [6] หลีกเลี่ยงการใช้การควบคุมแบบพีโอทีในการคำนวณหาค่ามุมที่ใช้เปิดปากปล่อยวัตถุบด แม้วิธีการนี้จะเลี่ยงการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ทำให้ความซับซ้อนในการสร้างลดลง (เมื่อเทียบกับโครงสร้างการควบคุมแบบพีโอที) และให้ผลการชั่งน้ำหนักที่แม่นยำ แต่ก็ต้องแลกกับการสร้างเงื่อนไขที่มากพอที่จะครอบคลุมการทำงานได้ทุกรูปแบบ นั่นหมายความว่าหน่วยความจำสำหรับเก็บเงื่อนไขก็เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้การที่มีเงื่อนไขเยอะย่อมส่งผลให้การประมวลผลในแต่ละครั้งนานขึ้นด้วย

จากการทบทวนงานวิจัย [3-6] ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพเครื่องชั่งแบบเดิมในหัวข้อ 1.5.1 ถึง 1.5.3 ถูกนำมาเปรียบเทียบดังแสดงในตารางที่ 1.2 โดยใช้เกณฑ์ดังต่อไปนี้ จุดที่ทำการพัฒนา ความซับซ้อนในการสร้าง การใช้ทรัพยากรของตัวประมวลผล หน่วยความจำที่ต้องการ และเวลาที่ใช้ในการประมวลผลแต่ละครั้ง

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติงานวิจัยที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับเครื่องชั่งแบบเดิม

เกณฑ์การเปรียบเทียบ	เทคนิคที่ถูกนำมาใช้		
	ค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ [3]	การควบคุมแบบพีโอที [4-5]	การควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก [6]
จุดที่ทำการพัฒนา	ชดเชยค่าเซ็ทพอยท์	ควบคุมการเปิดปากปล่อยวัตถุบดหลายลำดับ	ควบคุมการเปิดปากปล่อยวัตถุบดหลายลำดับ
ความซับซ้อนในการสร้าง	ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวอย่างที่ต้องหาค่าเฉลี่ย	ซับซ้อน	ซับซ้อน
การใช้ทรัพยากรของตัวประมวลผล	ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวอย่างที่ต้องหาค่าเฉลี่ย	สูง	ปานกลาง
หน่วยความจำที่ต้องการ	ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวอย่างที่ต้องหาค่าเฉลี่ย	สูง	สูง
เวลาที่ใช้ในการประมวลผลแต่ละครั้ง	ขึ้นอยู่กับจำนวนตัวอย่างที่ต้องหาค่าเฉลี่ย	นาน	นาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ด้วยการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

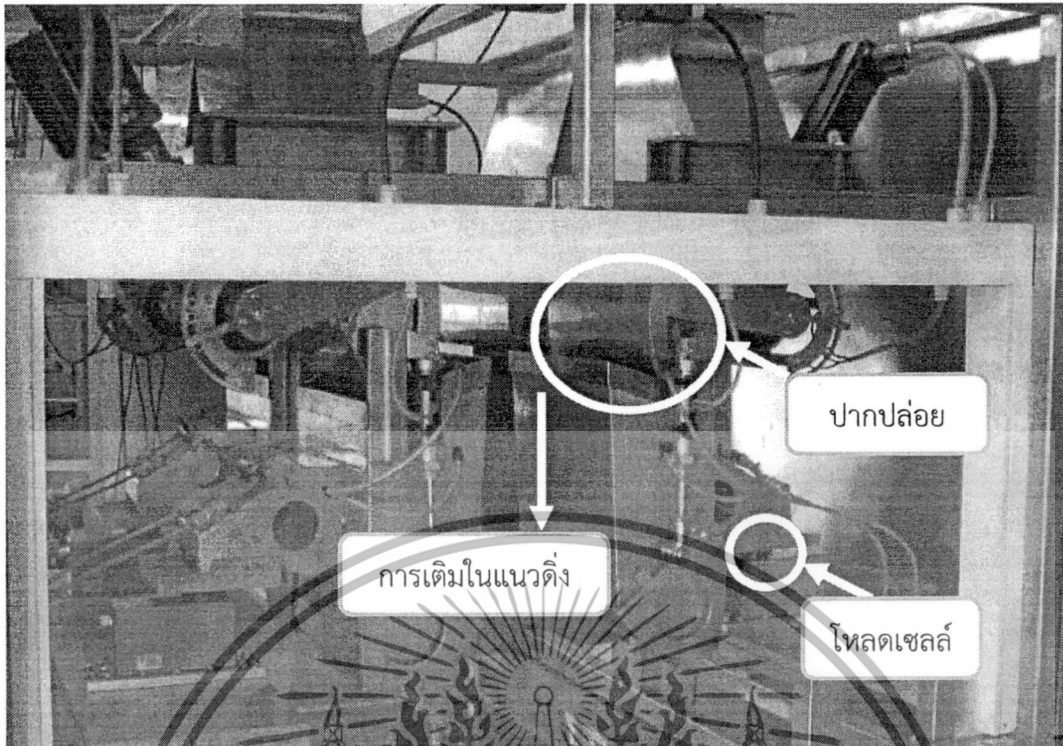
จากการพิจารณาเกณฑ์การเปรียบเทียบในตารางที่ 1.2 เทคนิคที่ใช้ [4-6] มีความซับซ้อนในการสร้างสูงอีกทั้งยังใช้หน่วยความจำสูงและใช้ทรัพยากรของตัวประมวลผลค่อนข้างสูง เพื่อความง่ายในการสร้าง วิทยานิพนธ์นี้จึงเป็นการพัฒนาการชดเชยค่าเซ็นเซอร์แบบงานวิจัยที่ [3] ทำ แม้วิธีการของงานวิจัยที่ [3] มีความง่ายในการสร้าง แต่เนื่องจากการหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ ส่งผลให้การชดเชยค่าเซ็นเซอร์อาจจะไม่สอดคล้องกับน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่เกิดขึ้นจริงเพราะค่า เซ็นเซอร์ที่ไม่ได้ถูกชดเชยทุกครั้ง การชดเชยขึ้นอยู่กับจำนวนตัวอย่างที่เก็บมาหาค่าเฉลี่ย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงนำเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter) ที่มีความซับซ้อนในการสร้างไม่แตกต่างจากวิธีของ [3] มากนักแต่มีสมรรถนะสูงกว่ามาประยุกต์ใช้ชดเชยค่าเซ็นเซอร์ในลักษณะทันทีทันใด (Real-time Manner) เพื่อให้สัมพันธ์กับน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่เกิดขึ้นจริง

1.6 แนวทางการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ในการทำนายค่าเซ็นเซอร์ที่ดีที่สุด โดยอาศัยแบบจำลองกระบวนการ (Process Model) และแบบจำลองการวัด (Measurement Model) ในการประมาณค่าเซ็นเซอร์ในครั้งต่อไป ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. ในส่วนที่หนึ่งจะทำการสร้างแบบจำลองการวัดและนำไปทดลองใช้กับแบบจำลองกระบวนการที่ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่ง
2. ในส่วนที่สองจะทำการสร้างแบบจำลองกระบวนการให้เปลี่ยนไปกับค่าน้ำหนักที่ขังได้และนำไปทดลองแบบจำลองการวัดที่สร้างไว้ในส่วนที่หนึ่ง

ก่อนที่จะนำเอาเทคนิคที่นำเสนอไปทดสอบจริงบนเครื่องขัง เทคนิคที่ถูกนำเสนอจะถูกนำไปจำลองการทำงานบนโปรแกรม MATLAB เพื่อดูความเป็นไปได้ของการทำงานกับเครื่องขังน้ำหนักแบบเต็มค่าน้ำหนักเป้าหมาย 3505 กรัม และทำการเปรียบเทียบผลการประมาณค่าเซ็นเซอร์ของการวิจัยส่วนที่หนึ่งและการวิจัยส่วนที่สอง เมื่อพบว่ามีความเป็นไปได้ว่าสามารถทำงานกับเครื่องขังได้ เทคนิคใหม่สำหรับการทำนายค่าเซ็นเซอร์ที่เหมาะสมที่สุดจะถูกนำไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องขังน้ำหนักแบบเต็มค่าน้ำหนักเป้าหมาย 3505 กรัม ซึ่งเทคนิคที่ถูกนำเสนอจะถูกนำไปเปรียบเทียบการชดเชยกับเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัย [3] บนเครื่องขังเดียวกัน ค่าน้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัม สำหรับการวิจัยส่วนที่หนึ่ง แต่การทดลองสำหรับการวิจัยส่วนที่สองจะทำที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม 3505 กรัม และ 5005 กรัม โดยการทดลองสำหรับการวิจัยส่วนที่สองจะแยกออกเป็น 2 การทดลองดังนี้ ทดลองประมาณค่าเซ็นเซอร์กับวัตถุที่มีความชื้นปกติหรือโพล์วดี และทดลองประมาณค่าเซ็นเซอร์กับวัตถุที่มีความชื้นไม่ปกติหรือโพล์วไม่ดี ในงานวิจัยนี้จะใช้ผงซักฟอกเป็นวัตถุที่นำมาขัง



รูปที่ 1.16 เครื่องชั่งน้ำหนักแบบเติม

เนื้อหาบทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย ส่วนบทที่ 3 เป็นรายละเอียดการสร้างแบบจำลองการวัดของการวิจัยส่วนที่หนึ่ง พร้อมทั้งทำการจำลองการทำงานและการทดลองจริงถัดมาในบทที่ 4 เป็นรายละเอียดการสร้างแบบจำลองกระบวนการของการวิจัยส่วนที่สองและทำการจำลองการทำงานและการทดลองจริง รวมทั้งทำการเปรียบเทียบการทำงานของกรวิจัยส่วนที่หนึ่งและสองด้วย และสุดท้ายบทที่ 5 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในบทนี้อธิบายถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปประยุกต์ในการสร้างอัลกอริทึม (Algorithm) การประมาณค่าเชิงพอยท์ให้ได้ค่าที่ดีที่สุด เริ่มด้วยหัวข้อสหสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่ม (Correlation) การหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ (Moving Average) ตัวกรองปรับค่าได้ (Adaptive Filter) คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter) ค่าจำกัดความทันทานแบบอ่อน (Soft-Thresholding) และการค้นหาฟังก์ชันเส้นกราฟ (Curve Fitting)

2.1 สหสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่ม

สหสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มคือการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มตั้งแต่สองตัวขึ้นไป หรือหาความสัมพันธ์ของชุดข้อมูลตั้งแต่สองชุดขึ้นไปเช่นกัน ปกติแล้วการค่าสหสัมพันธ์ของตัวแปรสุ่มมีหลายเทคนิค แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เพียงสหสัมพันธ์ในตัวเอง (Autocorrelation) และสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross-Correlation)

2.1.1 สหสัมพันธ์ในตัวเอง

สหสัมพันธ์ในตัวเองถูกอธิบายในแง่ของการประมวลผลสัญญาณ (Signal processing) หมายถึงการวัดค่าความเหมือน (Similarity) ของสัญญาณครั้งปัจจุบันกับครั้งก่อนหน้า ถ้าค่าสหสัมพันธ์ในตัวเองมีค่าสูงแสดงว่าสัญญาณที่ถูกวัดได้ครั้งล่าสุดมีความเหมือนกับสัญญาณที่ถูกวัดครั้งก่อนหน้า โดยที่ค่าสหสัมพันธ์ในตัวเองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1

$$R_{xx}[n, n+m] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (x[n]x[n+m]) = E(x[n]x[n+m]) \quad (2.1)$$

โดยที่

$R_{xx}[n, n+m]$ คือค่าสหสัมพันธ์ในตัวเองที่ได้จากสัญญาณ x ที่เวลา n และสัญญาณ x ที่เวลา $n+m$

$x[n]$ คือค่าสัญญาณ x ที่เวลา n และ

$x[n+m]$ คือค่าสัญญาณ x ที่เวลา $n+m$

2.1.2 สหสัมพันธ์ไขว้

สหสัมพันธ์ไขว้นั้นมีลักษณะการวัดที่เหมือนกับค่าสหสัมพันธ์ในตัวเอง ต่างกันตรงที่ค่าสหสัมพันธ์ไขว้นั้นใช้วัดความเหมือนของ 2 สัญญาณ กล่าวคือถ้าค่าสหสัมพันธ์ไขว้มีค่าสูงแสดงว่า 2 สัญญาณนี้มีความเหมือนกันมาก โดยที่ค่าสหสัมพันธ์ไขว้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

$$r_{xy}[n, n+m] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (x[n]y[n+m]) = E(x[n]y[n+m]) \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$r_{xy}[n, n+m]$ คือค่าสหสัมพันธ์ไขว้ที่ได้จากสัญญาณ x ที่เวลา n และสัญญาณ y ที่เวลา $n+m$

$x[n]$ คือค่าสัญญาณ x ที่เวลา n และ

$y[n+m]$ คือค่าสัญญาณ y ที่เวลา $n+m$

2.2 การหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่

การหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่เป็นเทคนิคที่มีความง่ายในการนำไปประยุกต์ใช้กับการจำลองแบบอนุกรมเวลา (Time Series) และการพยากรณ์แบบอนุกรมเวลา การทำงานของเทคนิคนี้จะสุ่มเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาหนึ่งๆ (Period) แล้วทำการหาค่าเฉลี่ย การหาค่าเฉลี่ยเป็นช่วงๆ จะทำให้ทราบแนวโน้มที่เปลี่ยนไปของระบบหนึ่งๆ ในช่วงเวลาต่างๆ ที่ผ่านไปได้ดีกว่าการใช้ค่าเฉลี่ยคงที่เพียงค่าเดียวแทนการเปลี่ยนไปของระบบนั้นๆ แต่ช่วงเวลาหนึ่งๆ ที่สุ่มเก็บตัวอย่างจะต้องเป็นช่วงสั้นๆ การใช้ค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่จะใช้ได้ดีกับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักในช่วงเวลาหนึ่งๆ โดยทั่วไปแล้วเทคนิคนี้นิยมถูกนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการที่คงที่ (Constant Process) และกระบวนการที่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น (Linear Trend Process)

ในวิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายการหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่เฉพาะกระบวนการที่คงที่ (เทคนิคนี้ถูกใช้ใน [3]) เพราะค่าน้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศไม่ได้มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น

2.2.1 การหาค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่อย่างง่ายสำหรับกระบวนการคงที่

กระบวนการ (Process) ที่มีการเปลี่ยนแปลงคงที่หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมากจะพบว่าการเปลี่ยนจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งมักจะมีสัญญาณรบกวนเข้ามารบกวน เช่น เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟตรง (DC Generator) ซึ่งค่ากระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนเข้ามารบกวนสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.3

$$x[n] = a + \varepsilon[n] \quad (2.3)$$

โดยที่

$x[n]$ คือค่ากระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนเข้ามารบกวน

a คือค่ากระบวนการคงที่

$\varepsilon[n]$ คือค่าสัญญาณรบกวนที่ไม่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ (μ_ε) และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ_ε^2

เนื่องจากค่ากระบวนการคงที่ (a) ในสมการที่ 2.3 มีสัญญาณรบกวนเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้การเปลี่ยนจากสถานะปัจจุบันไปยังสถานะอนาคตต้องทำการประมาณค่า (Estimate) การประมาณค่าจะเริ่มจากการสุ่มเก็บค่ากระบวนการที่มีสัญญาณรบกวนเข้ามารบกวนมาช่วงหนึ่งในอดีต (อาจจะเริ่มต้นตั้งแต่กระบวนการเริ่มทำงาน) นั่นคือ $x[1]$ ถึง $x[N]$ และในการสุ่มเก็บค่าตัวอย่างนี้ให้ค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weight (w)) เท่ากัน ในการประมาณค่ากระบวนการคงที่ (a) จะใช้เกณฑ์มาตรฐานแบบความผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด (Least-Squares Error) โดยที่เกณฑ์มาตรฐานดังกล่าวเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ell(a) = \sum_{i=1}^N w(x[i] - a)^2 \quad (2.4)$$

โดยที่

$\ell(a)$ คือค่าผลรวมความผิดพลาดกำลังสอง
 w คือค่าน้ำหนักความสำคัญ

นำสมการที่ 2.4 ไปทำอนุพันธ์เทียบกับค่ากระบวนการคงที่ (a) แล้วจับเท่ากับศูนย์ดังแสดงในสมการที่ 2.5 จะทำให้ค่าที่ประมาณได้มีค่าความผิดพลาดต่ำสุดดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$\frac{d\ell(a)}{da} = 0 \quad (2.5)$$

$$\hat{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w(x[i]) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 พบว่าค่า \hat{a} คือค่าเฉลี่ยเชิงเลขคณิต (Arithmetic Mean) ของการสุ่มตัวอย่างมาจำนวน N ตัวอย่างในช่วงเวลาหนึ่งๆ และยังพบอีกว่าความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.6 คือผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดไม่เอนเอียง (Unbiased Finite-Impulse-Response (FIR)) เพราะค่าน้ำหนักความสำคัญมีค่าเท่ากันทุกค่า

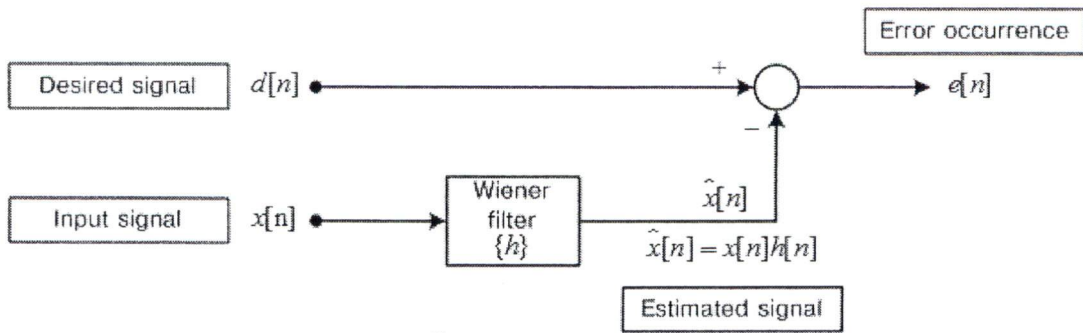
2.3 ตัวกรองปรับค่าได้

ปัจจุบันนี้ตัวกรองปรับค่าเองนั้นถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภท อาทิเช่น การหาอัตลักษณ์ของระบบต่างๆ (System Identification) การทำนายสัญญาณ (Prediction) การกู้สัญญาณจากสัญญาณรบกวน (Noise canceling) การทำภาพถ่ายให้เนียนขึ้น (Photo Smoothing) และในงานอื่นๆอีกหลายประเภท [10][11] เมื่อพิจารณาจากชื่อและงานที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้นั้นบ่งบอกว่าวิธีการนี้คือการปรับระบบให้สัญญาณที่ได้นั้นสอดคล้องกับสัญญาณที่ต้องการ ในหัวข้อนี้จะเริ่มอธิบายตัวกรองปรับค่าได้โดยใช้โครงสร้างพื้นฐาน (Wiener's Structure) ตามด้วยเกณฑ์มาตรฐาน (Criterion) ที่ใช้ในการปรับตัวกรอง

2.3.1 โครงสร้างตัวกรองปรับค่าได้พื้นฐาน

โดยทั่วไปแล้วตัวกรองปรับค่าได้นั้นอาศัยโครงสร้างของวีเนอร์ในการอธิบายการทำงานของโครงสร้างดังกล่าวถูกแสดงอยู่ในบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมพื้นฐานตัวกรองปรับค่าได้ (Wiener's Structure)

จากรูปที่ 2.1 จะได้ว่า

- $d[n]$ คือสัญญาณที่ต้องการหรือเป็นสัญญาณอ้างอิง (Desired signal)
- $x[n]$ คือสัญญาณอินพุต (Input signal)
- $h[n]$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของระบบ (Wiener filter coefficient)
- $\hat{x}[n]$ คือสัญญาณที่ถูกประมาณค่าโดยตัวกรองวีเนอร์ (Estimated signal)
- $e[n]$ คือค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่ถูกประมาณค่า (Error occurrence)

โดยที่ค่า $e[n]$ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.7

$$e[n] = d[n] - \hat{x}[n] \tag{2.7}$$

และค่า $\hat{x}[n]$ สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.8

$$\hat{x}[n] = x[n]h[n] \tag{2.8}$$

ซึ่งการที่จะทำให้ค่า $e[n]$ นั้นมีค่าต่ำที่สุดนั้น ในการใช้โครงสร้างตัวกรองปรับค่าได้พื้นฐาน $e[n]$ กับ $x[n]$ ต้องมีคุณสมบัติตั้งฉากต่อกัน (Orthogonality) ทำให้ค่าคาดหวัง (Expected Value) ของผลคูณของ $e[n]$ กับ $x[n]$ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.9

$$E(e[n]x[n]) = 0 \tag{2.9}$$

จากนั้นนำสมการที่ 2.8 แทนลงในสมการที่ 2.7 ได้สมการที่ 2.10

$$e[n] = d[n] - x[n]h[n] \tag{2.10}$$

แล้วนำสมการที่ 2.10 แทนลงในสมการที่ 2.9 ได้สมการที่ 2.11

$$E\{(d[n] - x[n]h[n])x[n]\} = 0 \tag{2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดรูปสมการที่ 2.11 ใหม่ได้ตั้งสมการที่ 2.12

$$E(d[n]x[n]) = h[n]E(x[n]x[n]) \quad (2.12)$$

และเมื่อนำสมการที่ 2.12 พิจารณาร่วมกับสมการที่ 2.1 และ 2.2 ได้สมการที่ 2.13

$$r_{dx} = h[n]R_{xx} \quad (2.13)$$

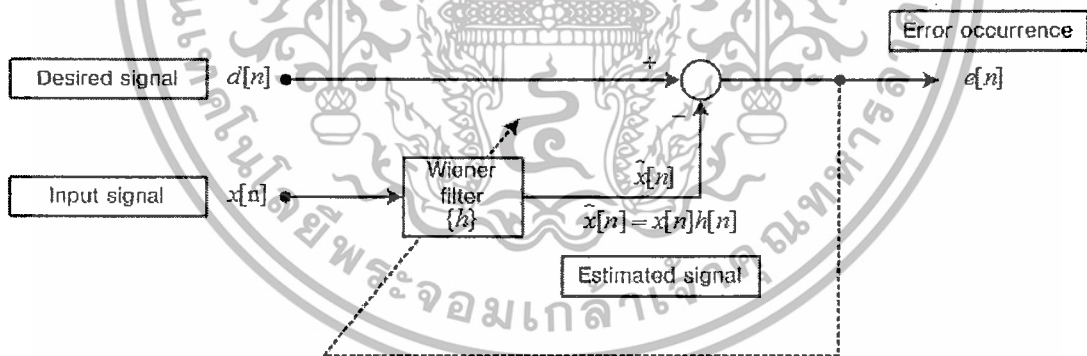
จัดรูปสมการที่ 2.13 ใหม่ได้ตั้งสมการที่ 2.14

$$h[n] = r_{dx} R_{xx}^{-1} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.14 สามารถตีความได้ว่าระบบที่มีสถานะที่เหมาะสมที่สุดหรือมีค่าความผิดพลาดต่ำที่สุดนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของระบบจะเท่ากับค่าสหสัมพันธ์ไขว้หารด้วยค่าสหสัมพันธ์ในตัวเองนั่นเอง

2.3.2 เกณฑ์มาตรฐานค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงการนำเอาเกณฑ์มาตรฐานค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Squared Error: MSE Criterion) มาทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบให้เข้าสู่สถานะที่เหมาะสมที่สุด โดยเริ่มจากพิจารณาบล็อกไดอะแกรมดังแสดงอยู่ในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมโครงสร้างตัวกรองปรับค่าได้ (Adaptive Filter Structure)

จากรูปที่ 2.2 ค่าความผิดพลาดถูกนำมาปรับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบและความสัมพันธ์ของการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบที่ซึ่งอ้างอิงจาก [11] แสดงตั้งสมการที่ 2.15

$$h[n+1] = h[n] - \mu \frac{dJ_{MSE}[n]}{dh[n]} \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $h[n+1]$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของระบบหลังจากถูกปรับค่า (Posteriori coefficient)
 $h[n]$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของระบบก่อนถูกปรับค่า (Prior coefficient)
 μ คือค่าขั้นบันไดในการปรับค่า (Step size) อยู่ในช่วง $[0,1]$
 $J_{MSE}[n]$ คือค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MSE)

ซึ่งค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง $J_{MSE}[n]$ สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการที่ 2.16

$$J_{MSE}[n] = E(e[n]^2) \quad (2.16)$$

จัดรูปสมการที่ 2.16 ตามความสัมพันธ์ในรูปที่ 2.2 ได้สมการที่ 2.17

$$\begin{aligned}
 J_{MSE}[n] &= E((d[n] - \hat{x}[n])^2) \\
 &= E((d[n] - x[n]h[n])^2) \\
 &= E(d[n]^2 - 2d[n]x[n]h[n] + x[n]^2 h[n]^2) \\
 &= R_{dd} - 2h[n]r_{dx} + h[n]^2 R_{xx}
 \end{aligned} \quad (2.17)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง $J_{MSE}[n]$ ต่ำที่สุดนั้น (Least mean squares error) คือการทำอนุพันธ์สมการที่ 2.17 เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบ $h[n]$ เท่ากับ ศูนย์ [12] ได้ดังสมการที่ 2.18

$$\frac{dJ_{MSE}[n]}{dh[n]} = \frac{d(R_{dd} - 2h[n]r_{dx} + h[n]^2 R_{xx})}{dh[n]} = -2r_{dx} + 2h[n]R_{xx} = 0 \quad (2.18)$$

จัดรูปสมการที่ 2.18 ใหม่ได้สมการที่ 2.19

$$h[n] = r_{dx} R_{xx}^{-1} \quad (2.19)$$

จากสมการที่ 2.19 พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะเหมาะสมที่สุดแล้ว ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง $J_{MSE}[n]$ ต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับศูนย์ ส่งผลให้การปรับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบจากสมการที่ 2.15 เป็นค่าใดค่าหนึ่งที่มีค่าเท่ากับค่าสหสัมพันธ์ไขว้หารด้วยค่าสหสัมพันธ์ในตัวเองเพราะเมื่อนำสมการที่ 2.17 ทำอนุพันธ์เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบ $h[n]$ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.20

$$\frac{dJ_{MSE}[n]}{dh[n]} = -2r_{dx} + 2h[n]R_{xx} \quad (2.20)$$

แล้วนำสมการที่ 2.20 แทนกลับเข้าไปในสมการที่ 2.15 ได้ดังสมการที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} h[n+1] &= h[n] - \mu(-2r_{dx} + 2h[n]R_{xx}) \\ &= h[n] + 2\mu r_{dx} - 2\mu h[n]R_{xx} \end{aligned} \quad (2.21)$$

และเมื่อค่าสัมประสิทธิ์ของระบบถูกปรับเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบเป็นค่าค่าหนึ่ง โดยในที่นี้กำหนดให้เป็น $h_{optimal}[n]$ ซึ่งความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.21 จะเปลี่ยนเป็นสมการที่ 2.22

$$h_{optimal}[n] = h_{optimal}[n] + 2\mu r_{dx} - 2\mu h_{optimal}[n]R_{xx} \quad (2.22)$$

จัดรูปสมการที่ 2.22 ใหม่ได้สมการที่ 2.23

$$h_{optimal}[n] = r_{dx} R_{xx}^{-1} \quad (2.23)$$

ซึ่งพบว่าสมการที่ 2.23 นั้นสอดคล้องกับสมการที่ 2.19 นอกจากนี้ผลที่ได้เหมือนกันกับการใช้โครงสร้างตัวกรองปรับค่าได้พื้นฐานในหัวข้อย่อย 2.3.1

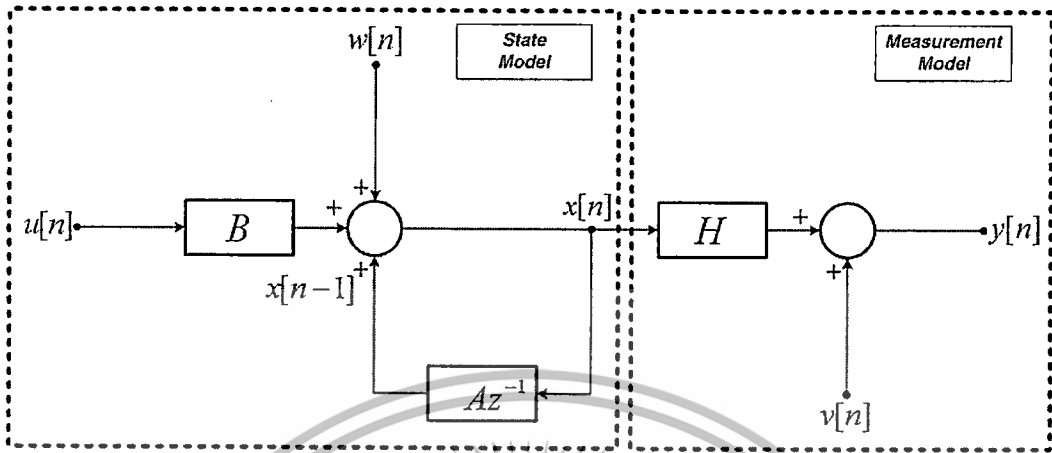
2.4 คาลมานฟิลเตอร์

เบื้องหลังความสำเร็จในการเดินทางจากโลกไปยังดวงจันทร์และเดินทางกลับจากดวงจันทร์มายังโลกของยานอวกาศอพอลโล่ 11 (Apollo 11) นั้นใช้เทคนิคที่ถูกคิดค้นโดยศาสตราจารย์คาลมาน (Rudolf E. Kalman) และทีมงานและต่อมาได้ถูกเรียกว่าคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter) โดยมีหลักการประมาณค่าสถานะปัจจุบันจากสถานะก่อนหน้าซึ่งอาศัยการปรับค่าจากการวัดค่าที่ได้จากเซนเซอร์ เนื่องด้วยค่าสถานะที่แท้จริงไม่สามารถวัดได้โดยตรง กล่าวคือเทคนิคนี้จะประมาณค่าสถานะให้ได้ค่าที่ดีที่สุด (Optimum) จากข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ที่มีสัญญาณรบกวนปะปนอยู่เป็นจำนวนมากโดยการทำให้ค่าความแปรปรวน (Variance) ที่เกิดจากการประมาณค่าสถานะนั้นมีค่าต่ำที่สุด นอกจากการใช้เทคนิคนี้ในการนำร่อง (Navigation) ยานอวกาศแล้วยังสามารถใช้ในการงานประเภทติดตาม (Tracking) ได้อีกด้วย เช่นการติดตามตำแหน่งของรถไฟที่ออกจากสถานีต้นทางไปยังปลายทาง เป็นต้น อย่างไรก็ตามในปัจจุบันวิธีการคาลมานฟิลเตอร์นั้นไม่ได้ถูกใช้อยู่แค่การนำร่อง หรืองานติดตาม เท่านั้นแต่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอีกหลายๆ งาน ซึ่งหัวข้อนี้เป็นการพิสูจน์หลักการทำงานของตัวคาลมานฟิลเตอร์นั้นจะเข้าสู่ภาวะที่ดีที่สุดได้อย่างไร ซึ่งการอธิบายนั้นจะเป็นไปในลักษณะเชิงปริมาณ (Scalar) เพื่อให้เกิดความเข้าใจได้ง่ายขึ้น

2.4.1 ระบบเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่อง

การที่จะใช้เทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ในการกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณของระบบนั้น ตัวกระบวนการของระบบ (Process) เองนั้นต้องถูกอธิบายให้อยู่ในลักษณะของระบบเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่องได้ (Discrete Linear Systems) โดยทั่วไปแล้วกระบวนการทางด้านกายภาพ (Physical Processes) ไม่ว่าจะเป็นการขับขียานพาหนะไปตามท้องถนน หรือแม้แต่สัญญาณคลื่นพาห้ (Carrier Signal) ที่อยู่ในรูปของสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (Sinusoidal Wave) นั้นสามารถทำเอกซารันเป็นเอกซารันที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมาณค่าโดยใช้รูปแบบของระบบเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่องได้ ซึ่งระบบเชิงเส้นดังกล่าวนี้สามารถจำลองได้โดยอาศัยบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 บล็อกไดอะแกรมระบบเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่อง

จากรูปที่ 2.3 ระบบเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่องสามารถเขียนความเป็นความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25 ซึ่งทั้งสองสมการจะถูกนำไปใช้ในการอธิบายการทำงานของคาลมานฟิลเตอร์ต่อไป

สมการสถานะ (State Equation)

$$x[n] = Ax[n-1] + Bu[n] + w[n] \tag{2.24}$$

สมการการวัด (Measurement Equation)

$$y[n] = Hx[n] + v[n] \tag{2.25}$$

โดยที่

- A คือค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนสถานะ (State Transition Weight)
- B คือค่าถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมป้อนเข้า (Control Input Weight)
- H คือค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนสถานะไปเป็นการวัด (Transformation Weight)
- $x[n]$ คือค่าสถานะปัจจุบันหรือสถานะล่าสุด (Posteriori State)
- $x[n-1]$ คือค่าสถานะก่อนหน้า (Prior State)
- $u[n]$ คือค่าสัญญาณควบคุมป้อนเข้าระบบ (Input Signal)
- $y[n]$ คือค่าจากการวัด (Measured Value)
- $w[n]$ คือค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบ (Process Noise) โดยสมมติให้มีค่าเฉลี่ยการรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian Noise) มีค่า Mean เป็นศูนย์ ($\mu_w = 0$) และมีค่าความแปรปรวนเป็น σ_w^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$v[n]$ คือค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการวัด (Measurement Noise) โดยสมมติให้มีค่าเฉลี่ยการรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian Noise) มีค่า Mean เป็นศูนย์ ($\mu_v = 0$) และมีค่าความแปรปรวนเป็น σ_v^2

ซึ่งค่าสัญญาณรบกวน $w[n]$ ที่เกิดขึ้นในระบบและค่าสัญญาณรบกวน $v[n]$ ที่เกิดขึ้นจากการวัดเป็นอิสระต่อกัน กล่าวคือค่าทั้งสองนั้นไม่มีความเกี่ยวข้องกันเลย นอกจากนี้แล้วยังสมมติให้ค่าผลรวมในอดีตจนถึง $x[n-1]$ มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ($\mu_x = 0$) มีค่าความแปรปรวนเป็น σ_x^2 เพื่อให้ง่ายในการอธิบาย ระบบเชิงเส้นแบบไม่ต่อเนื่องที่นำมาพิจารณาในหัวข้อนี้เป็นแบบ 1 มิติ

2.4.2 การทำงานของคาลมานฟิลเตอร์แบบสเกลาร์

เป้าหมายหลักของเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์นั้นปรารถนาที่จะประมาณค่า $x[n]$ (ค่าสถานะปัจจุบัน) โดยอาศัยค่าที่ได้จากการวัด $y[n]$ (ค่าการวัด) หรืออาจจะเรียกว่าค่าที่ได้จากการสังเกต (Observed Value) สามารถใช้สลับกันได้โดยที่สื่อถึงสิ่งเดียวกัน อาจจะกล่าวได้ว่าเป็นการกรอง (Filter) ค่าจากการสังเกตเพื่อผลิตค่า $\hat{x}[n]$ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าโดยทั่วๆ ไปว่าตัวประมาณค่า (Estimator) ของค่า $x[n]$ ที่อาศัยค่าจากการวัด $y[n]$ ถูกเขียนอยู่ในรูป $\hat{x}[n|n]$ และแน่นอนว่าการประมาณค่า (Approximation / Estimate) ให้ได้ค่าที่ดีที่สุดจำเป็นต้องมีเกณฑ์มาตรฐาน (Criterion) เพื่อให้เข้าสู่สภาวะนั้นได้ เทคนิคของคาลมานฟิลเตอร์ใช้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MSE) โดยที่การคำนวณหาค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองของวิธีการนี้ถูกแสดงดังสมการที่ 2.26

$$E\left((x[n] - \hat{x}[n|n])^2\right) \quad (2.26)$$

โดยที่

$\hat{x}[n|n]$ คือค่าประมาณสถานะปัจจุบัน $\hat{x}[n]$ ที่อาศัยค่าจากการวัดครั้งปัจจุบัน $y[n]$ ดังแสดงในสมการที่ 2.27

$$\hat{x}[n|n] = E(x[n] | y[n]) \quad (2.27)$$

ก่อนที่จะอธิบายการทำงานของคาลฟิลเตอร์ขั้นต่อไปนั้น มีคุณสมบัติของตัวประมาณค่าที่ทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด (Minimum MSE Estimator) ที่ต้องกล่าวไว้ ณ ที่นี้เพื่อใช้ในการอธิบายดังนี้ [12]

คุณสมบัติที่ 1

ตัวประมาณค่าที่ทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุดของค่า $x[n]$ ที่อาศัยค่าที่ได้จากการวัดสองค่าที่ $(y_1[n], y_2[n])$ ไม่มีความเกี่ยวข้องกัน (No Correlation) แต่สมมติว่าเกี่ยวข้องกันทางสถิติแบบเกาส์เซียน ดังแสดงในสมการที่ 2.28

$$\begin{aligned}\hat{x}[n] &= E(x[n] | y_1[n], y_2[n]) \\ \hat{x}[n] &= E(x[n] | y_1[n]) + E(x[n] | y_2[n])\end{aligned}\quad (2.28)$$

คุณสมบัติที่ 2

ตัวประมาณค่าที่ทำให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุดมีคุณสมบัติการบวก ดังนั้น $x[n] = x_1[n] + x_2[n]$ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.29

$$\begin{aligned}\hat{x}[n] &= E(x[n] | y[n]) \\ \hat{x}[n] &= E(x_1[n] + x_2[n] | y[n]) \\ \hat{x}[n] &= E(x_1[n] | y[n]) + E(x_2[n] | y[n])\end{aligned}\quad (2.29)$$

ด้วยคุณสมบัติทั้งสองข้อนี้ทำให้สามารถอธิบายต่อไปได้เนื่องด้วยสองคุณสมบัตินี้ถูกนำมาใช้ อยู่หลายขั้นตอนของการอธิบายหลักการของคาสแมนฟิลเตอร์

จากนั้นกำหนดให้ $e[n]$ คือค่าความผิดพลาด (Error) ซึ่งค่าความผิดพลาดนี้เป็นส่วนหนึ่งของค่าจากการวัด $y[n]$ ที่ซึ่งค่านี้ไม่มีความเกี่ยวข้องกับค่าจากการวัดครั้งก่อนหน้า $y[n-1]$ โดยที่ค่าความผิดพลาดนั้นมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.30

$$e[n] = y[n] - \hat{y}[n | n-1] \quad (2.30)$$

จัดรูปสมการที่ 2.30 ใหม่ได้สมการที่ 2.31

$$y[n] = e[n] + \hat{y}[n | n-1] \quad (2.31)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.31 พบว่าค่าจากวัด $y[n]$ นั้นประกอบไปด้วยข้อมูลสองค่าที่ไม่มีความเกี่ยวข้องกันคือ $e[n]$ กับ $\hat{y}[n | n-1]$ ดังนั้นจากคุณสมบัติข้อที่ 1 ที่กล่าวมา นำสมการที่ 2.31 แทนลงในสมการที่ 2.27 ได้สมการที่ 2.32

$$\hat{x}[n | n] = E(x[n] | \hat{y}[n | n-1], e[n]) \quad (2.32)$$

จัดรูปสมการที่ 2.32 ใหม่ตามคุณสมบัติข้อที่ 1 ได้สมการที่ 2.33

$$\hat{x}[n | n] = E(x[n] | \hat{y}[n | n-1]) + E(x[n] | e[n]) \quad (2.33)$$

และพบว่าค่า $E(x[n] | \hat{y}[n | n-1])$ คือการประมาณค่าของ $x[n]$ ที่อาศัยค่าการประมาณค่าก่อนหน้า $\hat{y}[n | n-1]$ นั้นหมายความว่า $E(x[n] | \hat{y}[n | n-1])$ คือค่า $\hat{x}[n | n-1]$ โดยที่มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{x}[n|n-1] = E(x[n]| \hat{y}[n|n-1]) \quad (2.34)$$

$$\hat{x}[n|n-1] = E(Ax[n-1]| \hat{y}[n|n-1] + w[n]\hat{y}[n|n-1]) \quad (2.35)$$

$$\hat{x}[n|n-1] = AE(x[n-1]| \hat{y}[n|n-1]) + E(w[n]\hat{y}[n|n-1]) \quad (2.36)$$

ซึ่งในสมการที่ 2.34 นั้น $x[n]$ เท่ากับ $Ax[n-1] + w[n]$ ออกจากสมการที่ 2.24 โดยที่ไม่มีสัญญาณป้อนเข้าและใช้คุณสมบัติข้อที่ 2 ช่วยในการจัดรูปทำให้ได้สมการที่ 2.35 และใช้การกระจายตามคุณสมบัติข้อที่ 2 ได้ตั้งสมการที่ 2.36 และจะสังเกตเห็นว่าเทอม $E(w[n]\hat{y}[n|n-1])$ เท่ากับศูนย์ เนื่องจากความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.37

$$E(w[n]\hat{y}[n|n-1]) = E(w[n]) = 0 \quad (2.37)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.37 ทำให้จัดรูปสมการที่ 2.36 ใหม่ได้สมการที่ 2.38

$$\begin{aligned} \hat{x}[n|n-1] &= AE(x[n-1]| \hat{y}[n|n-1]) \\ \hat{x}[n|n-1] &= A\hat{x}[n-1|n-1] \end{aligned} \quad (2.38)$$

นำสมการที่ 2.38 แทนกลับเข้าไปในสมการที่ 2.33 ได้สมการที่ 2.39

$$\begin{aligned} \hat{x}[n|n] &= \hat{x}[n|n-1] + E(x[n]|e[n]) \\ \hat{x}[n|n] &= A\hat{x}[n-1|n-1] + E(x[n]|e[n]) \end{aligned} \quad (2.39)$$

จากนั้นทำการหาค่า $E(x[n]|e[n])$ โดยระบบที่ใช้เป็นระบบแบบเชิงเส้นและมีการสมมติให้ค่าเฉลี่ยของ $x[n]$ เป็นศูนย์ $\mu_x = 0$ ส่งผลให้ $E(x[n]|e[n])$ มีค่าเป็นสมการที่ 2.40

$$\begin{aligned} E(x[n]|e[n]) &= K[n]e[n] \\ E(x[n]|e[n]) &= K[n](y[n] - \hat{y}[n|n-1]) \end{aligned} \quad (2.40)$$

โดยที่ $K[n]$ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.41

$$K[n] = \frac{E(x[n]|e[n])}{E(e^2[n])} \quad (2.41)$$

จากสมการที่ 2.25 ใช้คุณสมบัติข้อที่ 2 มาพิจารณาทำให้จัดความสัมพันธ์ใหม่ได้ตั้งสมการที่ 2.42

$$\hat{y}[n|n-1] = H\hat{x}[n|n-1] + \hat{w}[n|n-1] \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\hat{x}[n|n-1]=0$ เพราะว่า $w[n]$ เป็นอิสระไม่ขึ้นกับค่า $y[n-1]$ ดังนั้นนำสมการที่ 2.42 แทนลงในสมการที่ 2.40 ได้สมการที่ 2.43

$$E(x[n]|e[n]) = K[n](y[n] - H\hat{x}[n|n-1]) \quad (2.43)$$

ถึง ณ จุดนี้ได้สมการความสัมพันธ์ในการประมาณค่า $\hat{x}[n|n]$ โดยการนำสมการที่ 2.43 แทนลงในสมการที่ 2.39 ได้สมการที่ 2.44

$$\hat{x}[n|n] = \hat{x}[n|n-1] + K[n](y[n] - H\hat{x}[n|n-1]) \quad (2.44)$$

จัดรูปสมการที่ 2.44 ใหม่ได้สมการที่ 2.45

$$\hat{x}[n|n] = A\hat{x}[n-1|n-1] + K[n](y[n] - H\hat{x}[n|n-1]) \quad (2.45)$$

ต่อไปจะเป็นการอธิบายการปรับค่า $K[n]$ ซึ่งต่อไปจะเรียกว่าอัตราขยายคาลมาน (Kalman Gain) ซึ่งเมื่อนำอัตราขยายคาลมานในสมการที่ 2.41 มาจัดรูปใหม่โดยนำสมการที่ 2.42 แทนลงในสมการที่ 2.30 จากนั้นนำมาแทนลงไป จะได้สมการที่ 2.46

$$K[n] = \frac{E(x[n](y[n] - H\hat{x}[n|n-1]))}{E((y[n] - H\hat{x}[n|n-1])^2)} \quad (2.46)$$

ซึ่งการคำนวณอัตราขยายคาลมานนั้นจำเป็นต้องทำการหาผลลัพธ์ที่ทำให้ 2 ความสัมพันธ์ต่อไปนี้เป็นจริง ดังแสดงในสมการที่ 2.47 และ 2.48

$$E(x[n](y[n] - H\hat{x}[n|n-1])) = E((x[n] - \hat{x}[n|n-1])(y[n] - H\hat{x}[n|n-1])) \quad (2.47)$$

$$E(v[n](y[n] - H\hat{x}[n|n-1])) = 0 \quad (2.48)$$

โดยผลลัพธ์ของสมการที่ 2.47 มาจากที่ได้สมมติให้ผลรวมค่าจากในอดีตจนถึง $x[n-1]$ เท่ากับศูนย์ ซึ่งค่า $\hat{x}[n|n-1]$ ก็คือผลรวมเชิงเส้นของค่า $y[0], y[1], y[2], \dots, y[n-1]$ นั้นหมายความว่า $\hat{x}[n|n-1]$ เท่ากับศูนย์จึงทำให้สมการที่ 2.47 เป็นจริงตามเงื่อนไข และส่วนผลลัพธ์ของสมการที่ 2.48 นั้นได้ว่า $x[n]$ กับค่า $v[n]$ นั้นไม่มีความเกี่ยวข้องกัน และในทำนองเดียวกันนั้น $v[n]$ เป็นสัญญาณรบกวนที่ได้จากการวัด ดังนั้นจึงไม่มีความเกี่ยวข้องกับส่วนของสถานะของระบบ และยิ่งไปกว่านั้น $v[n]$ นั้นไม่มีความเกี่ยวข้องกับค่าในอดีตเช่นกัน ด้วยคุณสมบัติที่กล่าวมานั้นเป็นผลให้ความสัมพันธ์ในสมการที่ 2.47 และ 2.48 เป็นจริง ดังนั้นอัตราขยายคาลมานจึงถูกเขียนใหม่ตามผลลัพธ์ของความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K[n] = \frac{E((x[n] - \hat{x}[n|n-1])(y[n] - H\hat{x}[n|n-1]))}{E((y[n] - H\hat{x}[n|n-1])^2)} \quad (2.49)$$

จากสมการที่ 2.49 นั้นมีพจน์ $y[n]$ ที่สามารถจัดให้อยู่ในพจน์ $x[n]$ ได้ด้วยการใช้สมการที่ 2.25 แทนลงไปดังแสดงในสมการที่ 2.50

$$K[n] = \frac{E((x[n] - \hat{x}[n|n-1])(Hx[n] + v[n] - H\hat{x}[n|n-1]))}{E((Hx[n] + v[n] - H\hat{x}[n|n-1])^2)} \quad (2.50)$$

ทำการคูณกระจายทั้งที่เศษ (Numerator) และที่ส่วน (Denominator) ของสมการที่ 2.50 แล้วจัดรูปใหม่ได้สมการที่ 2.51

$$K[n] = \frac{E((Hx^2[n] - Hx[n]\hat{x}[n|n-1] - Hx[n]\hat{x}[n|n-1] + H(\hat{x}[n|n-1])^2))}{H^2 E(x^2[n] - 2(Hx[n]\hat{x}[n|n-1] + (\hat{x}[n|n-1])^2)) + E(v^2[n])} \quad (2.51)$$

$$K[n] = \frac{HE((x[n] - \hat{x}[n|n-1])^2)}{H^2 E((x[n] - \hat{x}[n|n-1])^2) + E(v^2[n])}$$

จากสมการที่ 2.51 พจน์ $\hat{x}[n|n-1]v[n]$ และ $x[n]v[n]$ ที่ปรากฏในเศษ (Numerator) จะถูกหักล้างไปเพราะว่า $E(\hat{x}[n|n-1]v[n]) = E(v[n]) = 0$ และ $E(x[n]v[n]) = E(v[n]) = 0$ นอกจากนี้แล้ว ยังมีอีก 2 พจน์ที่ปรากฏในส่วน (Denominator) หายไปได้แก่ $2Hx[n]v[n]$ และ $H\hat{x}[n|n-1]v[n]$ ก็ถูกหักล้างไปด้วยเหตุผลเดียวกัน

จะสังเกตได้ว่าตัวเศษ (Numerator) ในสมการที่ 2.51 เป็นค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุดเมื่อ $x[n]$ ที่ถูกประมาณค่าโดยอาศัยข้อมูลในอดีตอย่างน้อย 1 ค่า ดังนั้นจึงกำหนดให้ตัวเศษมีค่าเป็น $M[n|n-1]$ แล้วแทนกลับเข้าไปที่สมการที่ 2.51 ได้สมการที่ 2.52

$$K[n] = \frac{HM[n|n-1]}{H^2 M[n|n-1] + \sigma_v^2} \quad (2.52)$$

โดยที่ $M[n|n-1]$ นั้นมีค่าดังสมการที่ 2.53

$$M[n|n-1] = E((x[n] - \hat{x}[n|n-1])^2) \quad (2.53)$$

ในการคำนวณหาค่าอัตราขยายคาลมานั้น จำเป็นที่จะต้องทำให้ค่า $M[n|n-1]$ เกิดค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด ซึ่ง $x[n]$ ในสมการที่ 2.24 ที่ไม่มีสัญญาณป้อนเข้าเท่ากับ $Ax[n-1] + w[n]$ แทนเข้าไปในสมการที่ 2.53 ได้สมการที่ 2.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
M[n|n-1] &= E((x[n] - \hat{x}[n|n-1])^2) \\
M[n|n-1] &= E((Ax[n-1] + w[n] - \hat{x}[n|n-1])^2) \\
M[n|n-1] &= E((Ax[n-1] - \hat{x}[n|n-1] + w[n])^2)
\end{aligned} \tag{2.54}$$

นำสมการที่ 2.38 แทนลงในสมการที่ 2.54 ได้สมการที่ 2.55

$$M[n|n-1] = E((A(x[n-1] - \hat{x}[n-1|n-1]) + w[n])^2) \tag{2.55}$$

ดังนั้นเมื่อกระจายพจน์กำลังสองในสมการที่ 2.55 ได้สมการที่ 2.56

$$\begin{aligned}
M[n|n-1] &= E((A^2(x[n-1] - \hat{x}[n-1|n-1])^2 \\
&\quad + 2A(x[n-1] - \hat{x}[n-1|n-1])w[n] + w[n]^2)) \\
M[n|n-1] &= E((A^2(x[n-1] - \hat{x}[n-1|n-1])^2) \\
&\quad + E(2A(x[n-1] - \hat{x}[n-1|n-1])w[n]) + E(w[n]^2))
\end{aligned} \tag{2.56}$$

ซึ่งพบว่าพจน์ $E(2A(x[n-1] - H\hat{x}[n-1|n-1])w[n])$ เท่ากับศูนย์ ดังนั้นจัดรูปสมการที่ 2.56 ใหม่ได้สมการที่ 2.57

$$\begin{aligned}
M[n|n-1] &= E((A^2(x[n-1] - \hat{x}[n-1|n-1])^2) + E(w[n]^2)) \\
M[n|n-1] &= A^2 M[n-1|n-1] + \sigma_w^2
\end{aligned} \tag{2.57}$$

และส่วนสุดท้ายในการอธิบายนี้ต้องการให้ค่า $M[n|n]$ เกิดการวนซ้ำ (Recursion) โดยใช้สมการที่ 2.44 ช่วยในการอธิบาย โดยที่ $M[n|n]$ ถูกแสดงอยู่สมการที่ 2.58

$$M[n|n] = E((x[n] - \hat{x}[n|n])^2) \tag{2.58}$$

จัดรูปสมการที่ 2.58 ใหม่ได้สมการที่ 2.59

$$M[n|n] = E((x[n] - \hat{x}[n|n-1] - K[n](y[n] - H\hat{x}[n|n-1]))^2) \tag{2.59}$$

ทำการกระจายพจน์กำลังสองในสมการที่ 2.59 ได้สมการที่ 2.60

$$\begin{aligned}
M[n|n] &= E((x[n] - \hat{x}[n|n-1])^2) \\
&\quad - 2K[n]E((x[n] - \hat{x}[n|n-1])(y[n] - H\hat{x}[n|n-1])) \\
&\quad + K^2[n]E((y[n] - H\hat{x}[n|n-1])^2)
\end{aligned} \tag{2.60}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการที่ 2.60 จะพบว่าค่าคาดหวังในพจน์แรกคือ $M[n|n-1]$ ต่อมาค่าคาดหวังในพจน์ที่สองคือ $HM[n|n-1]$ (ดูสมการที่ 2.49-2.52 ควบคู่กันไป) และพจน์สุดท้ายค่าคาดหวังเท่ากับ $H^2M[n|n-1] + \sigma_v^2$ ดังนั้นเมื่อจัดรูปสมการที่ 2.60 ใหม่ได้สมการที่ 2.61

$$\begin{aligned} M[n|n] &= M[n|n-1] - 2HK[n](M[n|n-1]) + HK[n](M[n|n-1]) \\ M[n|n] &= M[n|n-1] - HK[n](M[n|n-1]) \\ M[n|n] &= (1 - HK[n])(M[n|n-1]) \end{aligned} \quad (2.61)$$

จากการพิสูจน์ข้างต้นนั้นสามารถสรุปออกมาได้ว่าการทำงานของคาลมานฟิลเตอร์นั้นประกอบไปด้วยสองส่วน กล่าวคือ ส่วนการทำนาย (Prediction Update) ซึ่งประกอบไปด้วยสมการที่ 2.38 และ 2.57 และ ส่วนการแก้ไข (Correction Update) ซึ่งประกอบไปด้วยสมการที่ 2.44 2.52 และ 2.61 โดยทั้ง 5 สมการถูกนำมาเขียนเรียงใหม่ได้ดังนี้

ส่วนการทำนาย

การทำนายสถานะครั้งต่อไป

$$\hat{x}[n|n-1] = A\hat{x}[n-1|n-1] \quad (2.62)$$

การทำให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากการทำนายน้อยสุด

$$M[n|n-1] = A^2M[n-1|n-1] + \sigma_w^2 \quad (2.63)$$

ส่วนการแก้ไข

อัตราขยายคาลมาน

$$K[n] = \frac{HM[n|n-1]}{H^2M[n|n-1] + \sigma_v^2} \quad (2.64)$$

การแก้ไขการทำนายให้ถูกต้อง

$$\hat{x}[n|n] = \hat{x}[n|n-1] + K[n](y[n] - H\hat{x}[n|n-1]) \quad (2.65)$$

การแก้ไขให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดน้อยสุด

$$M[n|n] = (1 - HK[n])(M[n|n-1]) \quad (2.66)$$

สมการที่ 2.62 ถึง 2.66 ถูกนำมาใช้เป็นอัลกอริทึมในการทำซ้ำของเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ (Recursive Kalman Algorithm) เพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ค่าจำกัดความทันทานแบบอ่อน

เมื่อกล่าวถึงค่าจำกัดความทันทาน (Threshold) พบว่ามีการใช้งานอย่างมากทางด้านการประมวลผลทางภาพ (Image Processing) เพราะค่าจำกัดความทันทานเป็นเทคนิคที่สำคัญในการแยกสิ่งที่สนใจ ซึ่งอาจจะเป็นการแยกวัตถุในภาพออกจากพื้นหลัง (Image Segmentation) หรือแม้กระทั่งทำให้ภาพชัดขึ้น (Image Enhancement) ซึ่งการที่จะทำให้เทคนิคทำงานได้ตามที่ต้องการนั้น การกำหนดกฎเกณฑ์ (Constraint) จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยทั่วไปแล้วอาจจะใช้ค่าพื้นฐานทางสถิติหรือความน่าจะเป็นเข้ามาเป็นตัวกำหนด [13] ดังนั้นเพื่อให้เกิดความกระจ่างชัดยิ่งขึ้นนั้นลองพิจารณาการสร้างเงื่อนไขค่าจำกัดความทันทานสำหรับแปลงภาพสีให้เป็นภาพขาวดำ (Binary Image) โดยพิจารณาจากภาพแห่งความถี่ความเข้มแสง (Intensity Histogram) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพแห่งความถี่ความเข้มแสง (Intensity) กับปริมาณจุดภาพ (Pixels)

จากรูปที่ 2.4 สมมติให้ค่าเฉลี่ยความเข้มแสงจากจุดภาพทั้งหมดอยู่ที่ตำแหน่ง T ซึ่ง ตำแหน่งนี้จะถูกกำหนดให้เป็นค่าจำกัดความทันทานเพื่อใช้เป็นเงื่อนไขในการแปลงภาพสีให้เป็นภาพขาวดำ ดังแสดงในสมการที่ 2.67

$$New\ Pixel(x, y) = \begin{cases} 1, & Old\ Pixel(x, y) \leq T \\ 0, & Old\ Pixel(x, y) > T \end{cases} \quad (2.67)$$

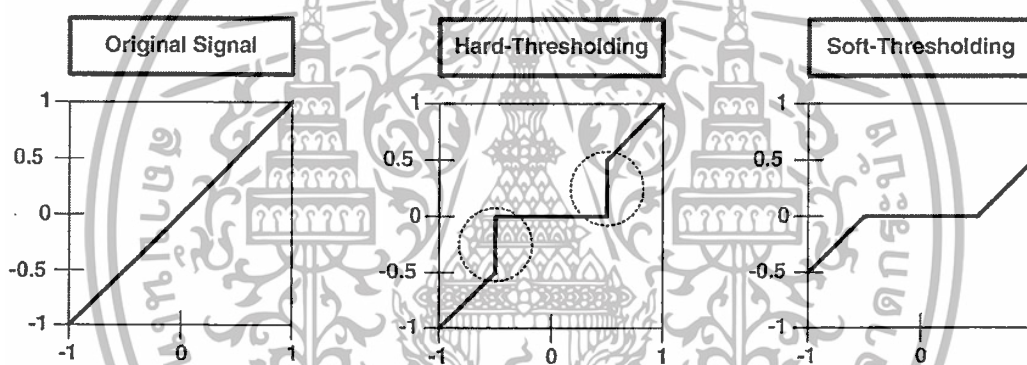
จากสมการที่ 2.67 เมื่อจุดภาพจุดใดถูกเปลี่ยนเป็นหนึ่งหมายความว่าจุดภาพจุดนั้นถูกเปลี่ยนเป็นสีขาว ในทำนองเดียวกันถ้าจุดภาพจุดใดถูกเปลี่ยนเป็นศูนย์จุดภาพจุดนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นสีดำ จากเงื่อนไขในพบว่าจุดภาพเก่า (Old Pixel) ที่มีความเข้มแสงน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าเฉลี่ย T จุดภาพใหม่ (New Pixel) จะมีค่าเท่ากับหนึ่งซึ่งคือการเปลี่ยนจุดภาพจุดนั้นให้เป็นสีขาว และในทางกลับกันถ้ามากกว่าค่าเฉลี่ย T จุดภาพใหม่ (New Pixel) จะมีค่าเท่ากับศูนย์ซึ่งคือการเปลี่ยนจุดภาพจุดนั้นให้เป็นสีดำ ซึ่งการสร้างค่าจำกัดความทันทานแบบนี้เรียกว่าค่าจำกัดความทันทานแบบแข็ง (Hard-Thresholding)

เมื่อนำสัญญาณในรูปที่ 2.5(ก) บ้อนเข้าค่าจำกัดความทันทานแบบแข็งจะทำให้สัญญาณเกิดความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity) เกิดขึ้น (ตรงที่วงกลมเส้นประล้อม) ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข) ซึ่งต่างจากค่าจำกัดความทันทานแบบอ่อน (Soft-Thresholding) เพราะค่าจำกัดความทันทานแบบอ่อนมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยืดหยุ่นในการสร้างเงื่อนไขมากกว่า กล่าวคือแทนที่จะสร้างเงื่อนไขที่มีแค่ 1 กับ 0 ก็สร้างเงื่อนไขที่ไม่ทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องขึ้นดังแสดงในสมการที่ 2.68

$$New\ Pixel(x, y) = \begin{cases} Old\ Pixel(x, y), & Old\ Pixel(x, y) \geq T \\ 0.5, & 0 < Old\ Pixel(x, y) < T \\ 0, & Old\ Pixel(x, y) = 0 \\ -0.5, & -T < Old\ Pixel(x, y) < 0 \\ Old\ Pixel(x, y), & Old\ Pixel(x, y) \leq -T \end{cases} \quad (2.68)$$

นั่นหมายความว่าค่าจำกัดความทนทานแบบอ่อนจะไม่ทำให้สัญญาณหรือภาพเกิดความไม่ต่อเนื่องเพราะการเปลี่ยนค่าจะลดลงเป็นระดับดังแสดงในรูปที่ 2.5(ค) ในทางกลับกันค่าจำกัดความทนทานแบบแข็งนั้นเปลี่ยนค่าจาก 1 เป็น 0 เลยทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่อง แต่จากตัวอย่างที่ยกมานั้นเป็นการแปลงภาพสีเป็นภาพขาวดำจึงสร้างเงื่อนไขให้มีแค่ 1 กับ 0 เพราะต้องการแค่สองสีจึงไม่ต้องการความต่อเนื่องของภาพ



(ก) สัญญาณต้นฉบับ

(ข) สัญญาณหลังป้อนเข้าค่าจำกัดความทนทานแบบแข็ง

(ค) สัญญาณหลังป้อนเข้าค่าจำกัดความทนทานแบบอ่อน

รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบสัญญาณต้นฉบับหลังป้อนเข้าค่าจำกัดความทนทานแบบแข็งและแบบอ่อน

แต่อย่างไรก็ดีการใช้งานค่าจำกัดความทนทานนั้นไม่ได้จำกัดอยู่แค่ในงานการประมวลผลทางภาพเท่านั้น ทั้งนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานประเภทอื่นๆ ได้อีกเช่นกัน อย่างเช่นในงานประเภทควบคุมเครื่องจักร ควบคุมความร้อนในเครื่องยนต์นั้น ค่าจำกัดความทนทานจะถูกนำไปกำหนดเป็นจุดเตือนก่อนถึงจะจุดที่เครื่องจักรหรือเครื่องยนต์จะเสียหรือแตกหัก (Breakdown Point) เป็นต้น ซึ่งค่าจำกัดความทนทานของงานแต่ละประเภทจะมีการกำหนดกฎเกณฑ์ที่ต่างกันอย่างออกไป

2.6 การค้นหาฟังก์ชันเส้นกราฟ

การประยุกต์ใช้เทคนิคเชิงตัวเลข (Numerical techniques) ในงานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ บ่อยครั้งนั้นจำเป็นต้องฟังก์ชันเส้นกราฟ (Curve fitting) ให้สัมพันธ์กับข้อมูลจากการทดลองที่ได้มา เพื่อให้ทราบแนวโน้มของข้อมูลการทดลองชุดนั้นหรือแม้แต่หาค่าของข้อมูล ณ จุดใดจุดหนึ่งที่อยู่นอกเหนือจากการทดลองที่เก็บมานั้น [14] เพราะปกติแล้วการทดลองหนึ่งๆ มักจะ

เอกลักษณะเฉพาะที่บ่งชี้ถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดเหตุการณ์นั้น เมื่อผู้รู้ได้เห็นเพียงเงื่อนไขในการคำนวณว่ากรณิใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บผลการทดลองเป็นช่วงๆ จึงทำให้ข้อมูลไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นการสร้างค่าความโค้งขึ้นมาจึงช่วยให้ผลการทดลองมีความต่อเนื่องและนั่นส่งผลให้สามารถทราบถึงคุณลักษณะ (Characteristic) ของการทดลองได้อีกด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าการสร้างค่าความโค้งคือกระบวนการสร้างความโค้งหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีความพอดีเข้ากับชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลองอย่างเหมาะสม ยิ่งไปกว่านั้นแล้วการสร้างค่าความโค้งนั้นก็ไม่ได้ถูกจำกัดอยู่ในงานทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ ไม่ว่าจะเป็นการวิเคราะห์ยอดขายสินค้า การหาค่าประกอบหลักในชุดข้อมูลขนาดใหญ่ การสร้างสมมติฐานทางจิตวิทยา และอีกหลากหลายสาขา ล้วนแล้วแต่มีการนำเอาการสร้างค่าความโค้งเข้าไปใช้

ในการทดลองใดๆไม่ว่าจะเป็นทางวิทยาศาสตร์หรือสถิติ ผลการทดลองที่ได้อยู่ในรูปของจุดคู่อันดับ (Cartesian coordinate) จนถึงลำดับที่ N ดังแสดงในสมการที่ 2.69

$$(x_1, y_1), \dots, (x_N, y_N) \tag{2.69}$$

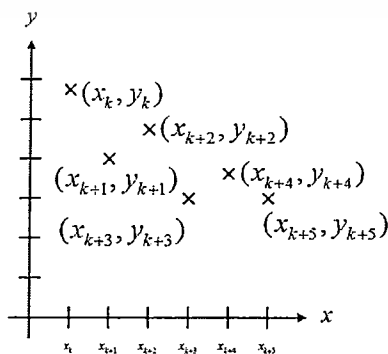
โดยที่ x คือตัวแปรต้น (อินพุต) และ y คือตัวแปรตาม (เอาต์พุต) ที่เป็นผลมาจากตัวแปรต้น x ซึ่งเป้าหมายหลักของการใช้เทคนิคเชิงตัวเลขในหัวข้อนี้ ก็เพื่อต้องการหาความสัมพันธ์ของจุดคู่อันดับในสมการที่ 2.69 ให้ได้ออกมาอยู่ในรูปของสูตรหรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์

2.6.1 การค้นหาฟังก์ชันเส้นโค้งแบบพหุนาม

การค้นหาฟังก์ชันเส้นกราฟแบบพหุนามลำดับที่ N จะใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.70 ในการค้นหาและการค้นหาฟังก์ชันเส้นกราฟแบบอื่นๆ สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ใน [14]

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_Nx^N = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x^i \tag{2.70}$$

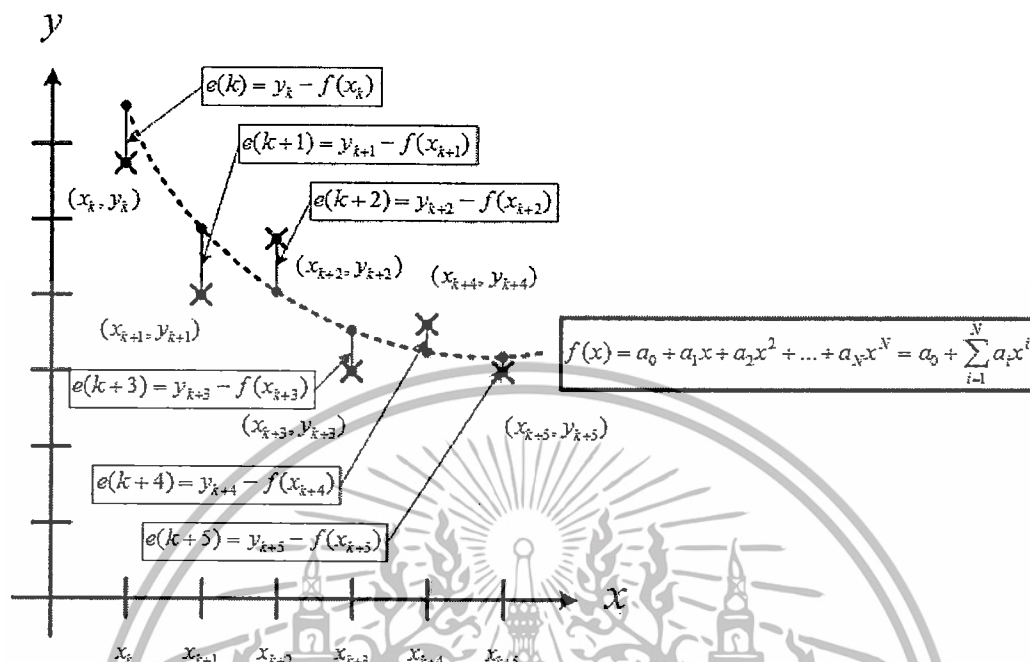
จากสมการที่ 2.70 ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficients) $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$ จำเป็นต้องมีข้อกำหนดกฎเกณฑ์ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$ ที่เหมาะสมและในที่นี้ใช้กฎเกณฑ์ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด (LMS) ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์นั้นๆ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการนำสมการเอาที่ 2.69 และ 2.70 มาเขียนให้อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง $E(e^2(k))$ ต่ำสุดได้ดังสมการที่ 2.71 และเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากยิ่งขึ้นจึงสมมติให้จุดอันดับในสมการที่ 2.69 เป็นผลการทดลองที่ได้จากการทดลองหนึ่งๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 กราฟจุดคู่อันดับของผลการทดลองหนึ่งๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.6 ทำการสร้างเส้นโค้งให้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่สมมติให้สมการที่ 2.70 เป็นฟังก์ชันเส้นโค้งที่สร้างขึ้นมา



รูปที่ 2.7 ฟังก์ชันเส้นโค้งที่ถูกสร้างขึ้นให้สัมพันธ์กับผลการทดลอง

จากรูปที่ 2.7 พบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นคือค่าผลต่างของ y กับฟังก์ชัน $f(x)$ ซึ่งการที่จะทำให้ฟังก์ชันเส้นโค้งที่สร้างขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองที่สุด (Best fit) คือการทำให้ค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ศูนย์หรือเท่ากับศูนย์โดยการใช้เทคนิคค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองต่ำสุดตามที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้

$$E(e^2(k)) = E((y_k - f(x_k))^2) = \sum_{k=1}^n \left(y_k - \left(a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_k^i \right) \right)^2 \quad (2.71)$$

จากนั้นทำอนุพันธ์กับสมการที่ 2.71 เทียบกับ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$ ตามลำดับแล้วกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ดังแสดงสมการที่ 2.72 ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด

$$\begin{aligned} \frac{dE((y_k - f(x_k))^2)}{da_0} &= -2 \sum_{k=1}^n \left(y_k - \left(a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_k^i \right) \right) = 0 \\ \frac{dE((y_k - f(x_k))^2)}{da_1} &= -2 \sum_{k=1}^n \left(y_k - \left(a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_k^i \right) \right) x_k = 0 \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2.72)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.72 นำสมการย่อยที่เกิดขึ้นใหม่จำนวน $N+1$ สมการมาเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ดังสมการที่ 2.73 และลดรูปสมการที่ 2.73 ให้อยู่ในรูปสมการที่ 2.74 ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_k & \sum x_k^2 & \dots & \sum x_k^N \\ \sum x_k & \sum x_k^2 & \sum x_k^3 & \dots & \sum x_k^{N+1} \\ \sum x_k^2 & \sum x_k^3 & \sum x_k^4 & \dots & \sum x_k^{N+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum x_k^N & \sum x_k^{N+1} & \sum x_k^{N+2} & \dots & \sum x_k^{N+N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_k \\ \sum x_k y_k \\ \sum x_k^2 y_k \\ \vdots \\ \sum x_k^N y_k \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_k & \sum x_k^2 & \dots & \sum x_k^N \\ \sum x_k & \sum x_k^2 & \sum x_k^3 & \dots & \sum x_k^{N+1} \\ \sum x_k^2 & \sum x_k^3 & \sum x_k^4 & \dots & \sum x_k^{N+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum x_k^N & \sum x_k^{N+1} & \sum x_k^{N+2} & \dots & \sum x_k^{N+N} \end{bmatrix} = A, \quad \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_3 \end{bmatrix} = X, \quad \begin{bmatrix} \sum y_k \\ \sum x_k y_k \\ \sum x_k^2 y_k \\ \vdots \\ \sum x_k^N y_k \end{bmatrix} = B \quad (2.74)$$

$$AX = B$$

จากสมการที่ 2.78 สามารถใช้เทคนิคการกำจัดแบบเกาส์เซียน (Gaussian Elimination) [15] แก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$ เพราะทราบค่าของตัวแปร x_k และ y_k จากความสัมพันธ์ที่ได้จากผลการทดลอง

จากสมการที่ 2.74 พบว่าเมตริกซ์ A เป็นเมตริกซ์ที่สามารถกลับรูปได้ (Invertible matrix) [15] เพราะว่าผลคูณ A กับ A^{-1} ได้เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity matrix) I จากการพิสูจน์โดยใช้พหุนามลำดับที่ 2 หรือ $N=2$ เพื่อความกระชับ ดังแสดงในสมการที่ 2.75

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_k \\ \sum x_k & \sum x_k^2 \end{bmatrix} = A$$

$$\frac{1}{n \sum x_k^2 - \sum x_k \sum x_k} \begin{bmatrix} \sum x_k^2 & -\sum x_k \\ -\sum x_k & n \end{bmatrix} = A^{-1}$$

$$\frac{1}{n \sum x_k^2 - \sum x_k \sum x_k} \begin{bmatrix} n & \sum x_k \\ \sum x_k & \sum x_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sum x_k^2 & -\sum x_k \\ -\sum x_k & n \end{bmatrix} = AA^{-1} \quad (2.75)$$

$$\frac{1}{n \sum x_k^2 - \sum x_k \sum x_k} \begin{bmatrix} n \sum x_k^2 - \sum x_k \sum x_k & n \sum x_k - n \sum x_k \\ n \sum x_k - n \sum x_k & -\sum x_k \sum x_k + n \sum x_k^2 \end{bmatrix} = AA^{-1}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = I = AA^{-1}$$

ดังนั้นการแก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$ สามารถทำได้ด้วยการนำเอาเมตริกซ์ผกผัน (Inverse matrix) A^{-1} ของเมตริกซ์ A คูณทั้งสองข้างของสมการที่ 2.74 ได้สมการที่ 2.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} A^{-1}AX &= A^{-1}B \\ IX &= A^{-1}B \\ X &= A^{-1}B \end{aligned} \tag{2.76}$$

ซึ่งการแก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ $a_0, a_1, a_2, \dots, a_N$ ด้วยการใช้สมการที่ 2.76 นั้นง่าย สะดวกและรวดเร็วกว่าการใช้เทคนิคการกำจัดแบบเกาส์เขียน

2.6.2 การค้นหาฟังก์ชันเส้นโค้งแบบเอกซ์โพเนนเชียล

วิทยานิพนธ์นี้เน้นไปในการค้นหาฟังก์ชันเส้นกราฟแบบพหุนามลำดับที่ N ดังนั้นการค้นหาฟังก์ชันเส้นกราฟแบบเอกซ์โพเนนเชียลจะอธิบายอย่างคร่าวๆ การค้นหาฟังก์ชันเส้นกราฟแบบนี้จะใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.77

$$f(x) = Ce^{Ax} \tag{2.77}$$

ทำการใส่ลอการิทึมธรรมชาติ (Natural Logarithm) ทั้งสองข้างของสมการที่ 2.77 ได้สมการที่ 2.78

$$\begin{aligned} \ln(f(x)) &= \ln(Ce^{Ax}) \\ \ln(f(x)) &= \ln(C) + \ln(e^{Ax}) \\ \ln(f(x)) &= \ln(C) + Ax \end{aligned} \tag{2.78}$$

กำหนดให้ $\ln(f(x))$ x และ $\ln(C)$ จากสมการที่ 2.78 เท้ากับตัวแปร Y X และ B ตามลำดับ ดังนั้นแทนค่าตัวแปรกลับไปในสมการที่ 2.78 ได้สมการที่ 2.79 ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า การทำชุดข้อมูลที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเชิงเส้น (Data Linearization) กล่าวคือการแปลงคู่อันดับความสัมพันธ์ (x_N, y_N) ที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้อยู่ในรูป $(X_N, Y_N) = (x_N, \ln(y_N))$ ที่เป็นเชิงเส้น

$$Y = AX + B \tag{2.79}$$

จากสมการที่ 2.79 พบว่าเป็นสมการเชิงเส้นตัวแปรเดียวหรืออาจจะเรียกว่าสมการพหุนามลำดับที่ 1 เพราะฉะนั้นค่า A และ B สามารถหาได้โดยใช้วิธีเดียวกันกับหัวข้อย่อย 2.6.1 โดยเริ่มจากการจัดรูปสมการที่ 2.79 ให้อยู่ในรูปของสมการที่ 2.71 ได้สมการที่ 2.80

$$E(e^2(k)) = E((Y_k - f(X_k))^2) = \sum_{k=1}^n (Y_k - (B + AX_k))^2 \tag{2.80}$$

ทำอนุพันธ์กับสมการที่ 2.80 เทียบกับ A และ B ตามลำดับแล้วกำหนดให้เท่ากับศูนย์ ดังแสดงสมการที่ 2.81 ซึ่งจะได้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dE((Y_k - f(X_k))^2)}{dB} = -2 \sum_{k=1}^n (Y_k - (B + AX_k)) = 0$$

$$\frac{dE((Y_k - f(X_k))^2)}{dA} = -2 \sum_{k=1}^n (Y_k - (B + AX_k)) X_k = 0$$
(2.81)

จากสมการที่ 2.81 นำสมการย่อยที่เกิดขึ้นมาเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ 2.82 และลดรูปสมการที่ 2.82 ให้อยู่ในรูปสมการที่ 2.83 ตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_k \\ \sum x_k & \sum x_k^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum Y_k \\ \sum X_k Y_k \end{bmatrix}$$
(2.82)

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_k \\ \sum x_k & \sum x_k^2 \end{bmatrix} = R, \begin{bmatrix} B \\ A \end{bmatrix} = S, \begin{bmatrix} \sum Y_k \\ \sum X_k Y_k \end{bmatrix} = T$$
(2.83)

$$RS = T$$

ดังนั้นการแก้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ A และ B สามารถทำได้ด้วยการนำเอาเมตริกซ์ผกผัน (Inverse matrix) R^{-1} ของเมตริกซ์ R คูณทั้งสองข้างของสมการที่ 2.83 ได้สมการที่ 2.84

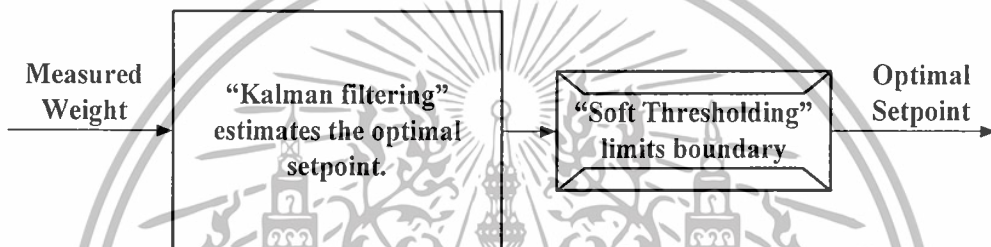
$$S = R^{-1}T$$
(2.84)

ซึ่งในเมตริกซ์ S จะประกอบไปด้วยค่าสัมประสิทธิ์ A และ B ดังนั้นนำเอาค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณมาได้แทนกลับเข้าไปในสมการที่ 2.79 ก็จะได้คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ C ในสมการที่ 2.77 ได้

บทที่ 3

การสร้างแบบจำลองการวัด

ในบทนี้เป็นการอธิบายรายละเอียดการออกแบบจำลองการวัด การชดเชยของเทคนิคนี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบเต็มทีกล่าวไว้ในบทที่ 1 เพื่อประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งการออกแบบการชดเชยค่าเซ็ทพอยท์สำหรับเทคนิคนี้ถูกแสดงอยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบไปด้วยค่าน้ำหนักที่ได้จากการวัด (Measured value) ป้อนเข้าสู่เทคนิคที่ทำการออกแบบเพื่อทำการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่เหมาะสมที่สุดและยังมีการใช้ตัวจำกัดความหนาแน่นแบบอ่อนเพื่อป้องกันค่าเซ็ทพอยท์ที่อาจคำนวณผิดพลาดจากค่าน้ำหนักที่ได้จากการวัดที่ผิดปกติ



รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบการชดเชยค่าเซ็ทพอยท์น้ำหนัก

3.1 การออกแบบจำลองการวัด

ตั้งแต่ที่เทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลายๆ ประเภท [12] เช่น การทำนายตำแหน่งดาวเทียมในระบบสุริยะ การประมาณค่าระดับน้ำ การลดสัญญาณรบกวนในเครื่องกำเนิดสัญญาณ และอื่นๆ อีกมากมาย ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของคาลมานฟิลเตอร์มีการตั้งสมมติฐานว่าสถานะของระบบที่เวลา n เกิดจากค่าสถานะของระบบที่เวลา $n-1$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือค่าปัจจุบันเกิดขึ้นจากค่าในอดีต ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกนำมาใช้กับปัญหาการชดเชยค่าเซ็ทพอยท์น้ำหนักดังแสดงในสมการที่ 3.1 (อ้างอิงจากสมการที่ 2.24)

$$x[n] = Ax[n-1] + Bu[n] + w[n] \quad (3.1)$$

โดยที่

- A คือค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนค่าเซ็ทพอยท์ก่อนหน้าเป็นค่าเซ็ทพอยท์ปัจจุบัน
- B คือค่าถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมป้อนเข้า
- $x[n]$ คือค่าเซ็ทพอยท์ปัจจุบันที่จะถูกนำไปใช้ในการชั่งครั้งต่อไป
- $x[n-1]$ คือค่าเซ็ทพอยท์ก่อนหน้า
- $u[n]$ คือค่าสัญญาณควบคุมป้อนเข้าระบบ (Input signal)
- $w[n]$ คือค่าสัญญาณรบกวนในระบบได้แก่การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร การแกว่งตัวของอัตรการไหลของวัตถุดิบที่ถูกชั่ง และรอบการทำงานในการอ่านค่าน้ำหนักของระบบที่ไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้สมการสถานะที่แสดงในสมการที่ 3.1 แล้วนั้น เทคนิคของคาลมานยังอาศัยค่าที่ได้จากการวัดเนื่องจากการที่อ่านค่าสถานะโดยตรงนั้นทำได้ยาก ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การวัดของเทคนิคนี้ถูกแสดงอยู่ในสมการที่ 3.2 (อ้างอิงจากสมการที่ 2.25)

$$z[n] = Hx[n] + v[n] \quad (3.2)$$

โดยที่

- H คือค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนค่าเซ็ทพอยท์ปัจจุบัน $x[n]$ ไปเป็นการวัด
- $z[n]$ คือค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์
- $v[n]$ คือค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดการวัดของตัวเซ็นเซอร์

การใช้สมการความสัมพันธ์ของสถานะ (3.1) และการวัด (3.2) ให้ได้ประสิทธิภาพจึงสมมติให้สัญญาณรบกวน $w[n]$ และ $v[n]$ เป็นแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์โดยที่มีค่าความแปรปรวน Q และ R ตามลำดับ

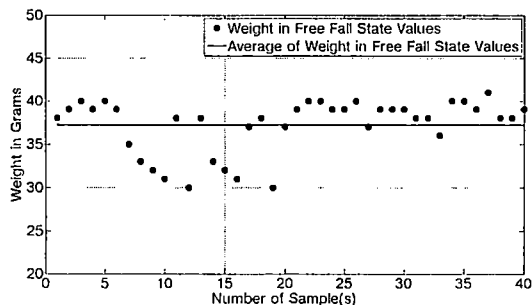
การนำคาลมานฟิลเตอร์มาประยุกต์ใช้ต้องออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีความสัมพันธ์กับระบบ ซึ่งในบทนี้จะทำการสร้างแบบจำลองการวัด (ค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนค่าเซ็ทพอยท์ไปเป็นการวัด) เพื่อประมาณค่าเซ็ทพอยท์ปัจจุบันที่อยู่บนพื้นฐานของค่าเซ็ทพอยท์ในอดีตเพียงอย่างเดียว และกำหนดให้แบบจำลองกระบวนการ (ค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนค่าเซ็ทพอยท์ก่อนหน้านี้เป็นค่าเซ็ทพอยท์ปัจจุบัน) เป็นค่าคงที่เท่ากับหนึ่ง

การชั่งน้ำหนักแต่ละครั้งไม่มีการใช้สัญญาณควบคุมป้อนเข้า ดังนั้น $u[n]$ เท่ากับศูนย์จึงทำให้ไม่มีความจำเป็นต้องทราบค่าถ่วงน้ำหนักสัญญาณควบคุมป้อนเข้า B

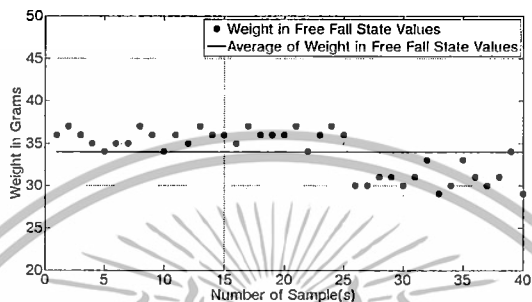
3.1.1 การออกแบบจำลองการวัด

ในงานวิจัยนี้ค่าน้ำหนักเป้าหมายตัวอย่างที่ถูกนำมาใช้ทดลองคือ 3005 กรัม 3305 กรัม 3505 กรัม 4005 กรัม และ 5005 กรัม รวมทั้งหมด 200 ตัวอย่าง (แบ่งเป็นค่าน้ำหนักเป้าหมายละ 40 ตัวอย่าง) ซึ่งค่าน้ำหนักเป้าหมายเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นค่าเซ็ทพอยท์เพื่อหาค่าน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศหลังจากสั่งปิดปากปล่อยวัตถุ การเก็บตัวอย่างค่าน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศทำโดยการตั้งโปรแกรมเครื่องชั่งแบบเต็ม (รูปที่ 1.16) ให้เปิดปากปล่อยวัตถุเพียงลำดับเดียว (เปิดปากแคบอย่างเดียวโดยกำหนดมุมการเปิดปากปล่อยวัตถุขนาด 60 องศา) จนน้ำหนักวัตถุเท่ากับค่าเซ็ทพอยท์แล้วสั่งปิดปากปล่อยวัตถุและเมื่อการชั่งน้ำหนักเข้าสู่สภาวะคงตัวน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศก็คือส่วนที่เกินจากค่าเซ็ทพอยท์ที่ตั้งเอาไว้

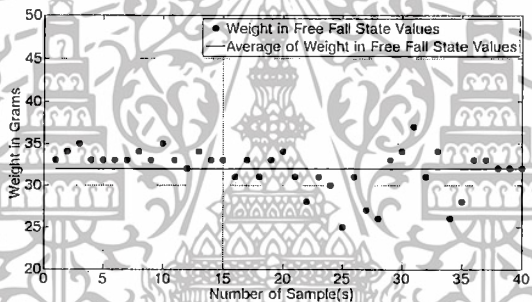
จากการทดลองข้างต้นและเก็บตัวอย่างครบทั้ง 200 ตัวอย่าง ค่าน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศของแต่ละน้ำหนักเป้าหมายถูกนำมาพล็อตเพื่อให้เห็นแนวโน้มดังแสดงในรูปที่ 3.2



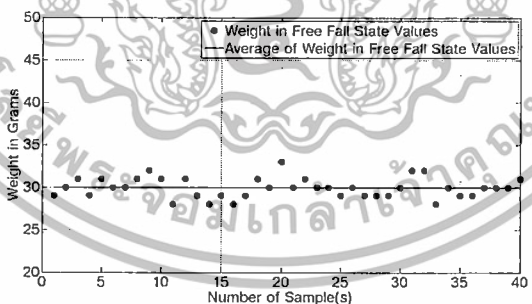
(ก) น้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม



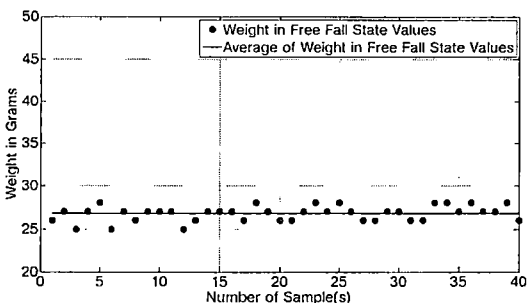
(ข) น้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่น้ำหนักเป้าหมาย 3305 กรัม



(ค) น้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่น้ำหนักเป้าหมาย 3505 กรัม



(ง) น้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่น้ำหนักเป้าหมาย 4005 กรัม



(จ) น้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัม

รูปที่ 3.2 น้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่น้ำหนักเป้าหมายต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในรูปที่ 3.2 น้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม 3305 กรัม 3505 กรัม 4005 กรัม และ 5005 กรัม ถูกนำมาสรุปเป็นข้อมูลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลทางสถิติน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ

	น้ำหนักเป้าหมาย (กรัม)				
	3005	3305	3505	4005	5005
ค่าเฉลี่ยน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ (กรัม)	37	34	32	30	27
ค่าความแปรปรวนน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ (กรัม ²)	9.9077	7.1769	6.8917	1.4333	0.7429
ค่าความแปรปรวนรวมของน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ (กรัม ²)	17.6567				

เมื่อได้ค่าเฉลี่ยน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศแล้วค่าเฉลี่ยเหล่านี้จะไม่ได้ถูกไปใช้ในการชดเชยค่าเซ็ทพอยท์โดยตรงได้ทันที (น้ำหนักเป้าหมายลบด้วยค่าเฉลี่ยน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ) แต่ค่าเฉลี่ยเหล่านี้จะถูกนำไปแปลงเพื่อให้สามารถใช้กับสมการที่ 3.2 ได้

จากสมการที่ 3.2 พบว่าค่า $x[n]$ (ค่าเซ็ทพอยท์ในครั้งปัจจุบัน) คูณกับค่า H (ค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนค่าเซ็ทพอยท์ปัจจุบันไปเป็นการวัด) ซึ่งผลคูณนี้รวมกับค่า $n[n]$ (ค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดการวัดของตัวเซ็นเซอร์) จะทำให้ได้ค่าการประมาณน้ำหนักที่จะวัดได้ การสร้างค่า H จึงสร้างด้วยการนำค่าน้ำหนักเป้าหมายของแต่ละเป้าหมายลบด้วยค่าเฉลี่ยวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศของน้ำหนักเป้าหมายนั้นๆ จะได้ค่าเซ็ทพอยท์ที่เป็นค่ากลางของแต่ละน้ำหนักเป้าหมายและเมื่อเอาค่าน้ำหนักเป้าหมายหารด้วยค่าเซ็ทพอยท์ค่ากลางนี้จะได้อัตราส่วน (Ratio) ออกมาซึ่งค่าอัตราส่วนนี้ถูกนำไปใช้เป็นค่า H

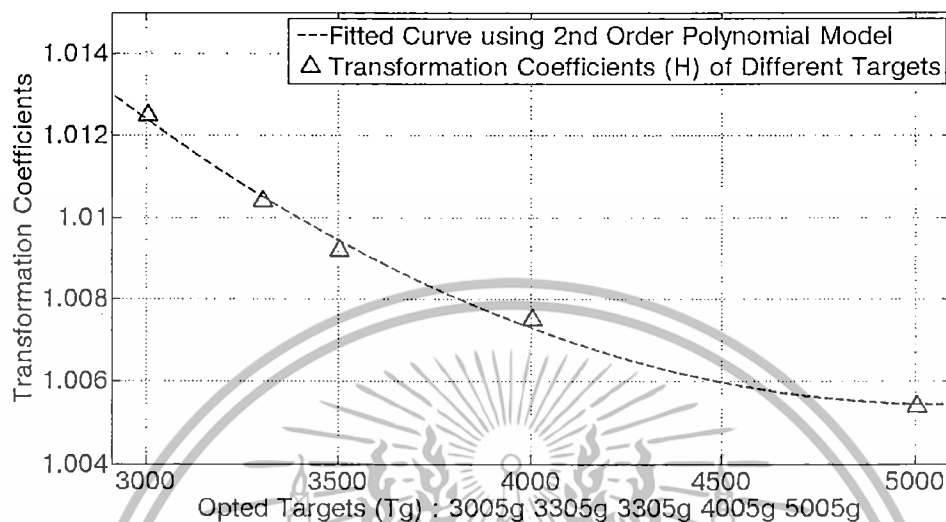
จากการอธิบายวิธีการสร้างค่า H ข้างต้นทำให้ได้ค่าเซ็ทพอยท์กลางและค่าอัตราส่วนของแต่ละน้ำหนักเป้าหมายดังแสดงในตารางที่ 3.2 ซึ่งต่อไปจะเรียกอัตรส่วนนี้ว่าค่า H

ตารางที่ 3.2 ค่าเซ็ทพอยท์กลางและค่าอัตราส่วนของแต่ละน้ำหนักเป้าหมาย

	น้ำหนักเป้าหมาย (กรัม)				
	3005	3305	3505	4005	5005
ค่าเซ็ทพอยท์กลาง	2968	3271	3473	3975	4978
ค่าอัตราส่วน (H)	1.0125	1.0104	1.0092	1.0075	1.0054

จากตารางที่ 3.2 พบเห็นว่าค่า H มีหลายค่าส่งผลให้สิ้นเปลืองหน่วยความจำเพื่อบันทึกค่า H เหล่านี้ เพื่อความยืดหยุ่นในการใช้งาน (รองรับค่าน้ำหนักเป้าหมายที่อาจเปลี่ยนแปลงไป แต่ยังคงอยู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปเผยแพร่ในสื่อใดๆ) ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วง 3000 กรัม ถึง 5000 กรัม) จึงนำค่า H เหล่านี้มาสร้างเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยการนำเอาค่าน้ำหนักเป้าหมายและค่า H มาพล็อตเป็นเส้นกราฟหาความสัมพันธ์ โดยกำหนดให้แกนนอนเป็นค่าน้ำหนักเป้าหมายและแกนตั้งเป็นค่า H ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักเป้าหมายกับค่า H

จากรูปที่ 3.3 รูปสัญลักษณ์สามเหลี่ยม (Δ) คือความสัมพันธ์ของค่าน้ำหนักเป้าหมายกับค่า H และเมื่อลากเส้นประเชื่อมต่อกันจะมีลักษณะลดลงเป็นเส้นโค้ง จึงใช้เทคนิคการค้นหาค่าฟังก์ชันเส้นกราฟแบบพหุนามลำดับที่ 2 โดยมีสมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.3

$$H(T_g) = a_0 + a_1 T_g + a_2 T_g^2 \quad (3.3)$$

ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1, a_2 โดยใช้สมการที่ 2.71 ถึง 2.76 คำนวณ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของเส้นประ (รูปที่ 3.3) ดังแสดงในสมการที่ 3.4

$$H(T_g) = 1.047 - (1.638 \times 10^{-5}) T_g + (1.613 \times 10^{-9}) T_g^2 \quad (3.4)$$

ในอนาคตหากมีการเปลี่ยนน้ำหนักเป้าหมายที่ไม่ใช่ 3005 กรัม 3305 กรัม 3505 กรัม 4005 กรัม และ 5005 กรัม ก็สามารถป้อนน้ำหนักเป้าหมายใหม่เข้าไปในสมการที่ 3.4 แล้วนำค่า H ไปใช้ได้เลย

3.2 กระบวนการประมวลผลของคาลมานฟิลเตอร์

เพื่อที่จะให้ระบบลู่เข้าสู่ค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุด คาลมานฟิลเตอร์ประมาณค่าด้วยการใช้ระบบควบคุมการป้อนกลับโดยที่ค่าที่ป้อนกลับที่ได้นั้นได้มาจากการวัด นอกจากนี้แล้วคาลมานฟิลเตอร์เกี่ยวข้องกับสองขั้นตอนกล่าวคือ การทำนาย (Prediction Update) และการแก้ไขให้ถูกต้อง (Correction Update) โดยทั่วไปแล้วการทำนายและการแก้ไขให้ถูกต้องนั้น สามารถอธิบายได้โดยใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการทางคณิตศาสตร์ดังต่อไปนี้ (อ้างอิงจากสมการที่ 2.62-2.66) เพียงแต่มีการสมมติค่าสัญญาณรบกวนในระบบเพิ่มเติมเข้ามาด้วยในสมการที่ 3.5

3.2.1 การทำนาย

$$\hat{x}[n|n-1] = A\hat{x}[n-1|n-1] + w[n] \quad (3.5)$$

$$P[n|n-1] = A^2 P[n-1|n-1] + Q \quad (3.6)$$

โดยที่

A คือค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนค่าเซตพอยท์ก่อนหน้าเป็นค่าเซตพอยท์ปัจจุบัน

$\hat{x}[n|n-1]$ คือค่าเซตพอยท์ที่ถูกทำนายที่เวลา n ซึ่งได้มาจากค่าเซตพอยท์ที่ถูกแก้ไขให้ถูกต้องที่เวลา $n-1$ หรือ $\hat{x}[n-1|n-1]$

$w[n]$ คือค่าสัญญาณรบกวนในระบบได้แก่การสั่นสะเทือนของเครื่องจักร การแกว่งตัวของอัตรการไหลของวัตถุดิบที่ถูกซัง และรอบการทำงานในการอ่านค่าน้ำหนักของระบบที่ไม่เท่ากัน

Q คือค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในระบบ

$P[n|n-1]$ คือค่าความแปรปรวนผิดพลาดที่ถูกทำนายที่เวลา n ซึ่งได้มาจากค่าความแปรปรวนผิดพลาดที่ถูกแก้ไขให้ถูกต้องที่เวลา $n-1$ หรือ $P[n-1|n-1]$

3.2.2 การแก้ไขให้ถูกต้อง

$$K[n] = \frac{H[T_g]P[n|n-1]}{H^2[T_g]P[n|n-1] + R} \quad (3.7)$$

$$\hat{x}[n|n] = \hat{x}[n|n-1] + K[n](z[n] - H[T_g]\hat{x}[n|n-1]) \quad (3.8)$$

$$P[n|n] = (1 - K[n]H[T_g])P[n|n-1] \quad (3.9)$$

โดยที่

$K[n]$ คือค่าอัตรขยายคาลมานนั้นจะปรับให้ค่าความผิดพลาดนั้นต่ำสุด

$\hat{x}[n|n]$ คือค่าเซตพอยท์ที่ถูกแก้ไขให้ถูกต้องที่เวลา n

$H[T_g]$ คือค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนค่าเซตพอยท์เป็นการวัด

R คือค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากการวัด

$P[n|n]$ คือค่าความแปรปรวนผิดพลาดที่ถูกแก้ไขให้ถูกต้องที่เวลา n

จากสมการที่ 3.5 - 3.7 เป็นกระบวนการของเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ในการปรับให้ค่าเซตพอยท์เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือกระบวนการทำงานนี้จะเป็นกระบวนการวนซ้ำ (Recursion) จนกระทั่งการปรับค่าความแปรปรวนของระบบต่ำที่สุด ซึ่งการปรับในแบบนี้เป็นการปรับอยู่บนเกณฑ์มาตรฐานค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองน้อยสุดตามที่พิสูจน์ไว้ในหัวข้อที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบค่าจำกัดความหนาแน่นแบบอ่อนที่รับได้

เพื่อป้องกันไม่ให้ค่าเซ็ทพอยท์ที่ทำนายมีค่าผิดเพี้ยนจากค่าน้ำหนักส่วนเกินที่สูงหรือต่ำเกินไป การออกแบบค่าจำกัดความหนาแน่นแบบอ่อนที่รับได้จึงถูกนำมาใช้ควบคู่กับแบบจำลองการวัดที่สร้างขึ้น โดยการสร้างเซตขอบเขตและเงื่อนไขที่รับได้จะอยู่บนพื้นฐานของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานร่วม (แปลงจากค่าความแปรปรวนร่วมในตารางที่ 3.1) ของน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่น้ำหนักเป้าหมายต่างๆ เพื่อให้ขอบเขตและเงื่อนไขนี้ใช้ได้กับทุกน้ำหนักเป้าหมาย

ขอบเขตและเงื่อนไขถูกแจกแจงดังนี้

#ขอบเขตที่ 1 – ขอบเขตด้านบน

ขอบเขตบน = ค่าน้ำหนักเป้าหมาย - $(4.5 \times \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานร่วม})$

#ขอบเขตที่ 2 – ขอบเขตด้านล่าง

ขอบเขตล่าง = ค่าน้ำหนักเป้าหมาย + $(13.5 \times \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานร่วม})$

#เงื่อนไขที่ 1

ถ้า เซ็ทพอยท์ \geq ขอบเขตบน แล้ว

เซ็ทพอยท์ = ขอบเขตบน

จบเงื่อนไข

#เงื่อนไขที่ 2

ถ้า เซ็ทพอยท์ \leq ขอบเขตล่าง แล้ว

เซ็ทพอยท์ = ขอบเขตล่าง

จบเงื่อนไข

จากขอบเขตและเงื่อนไขที่กำหนดจะทำให้ค่าเซ็ทพอยท์ที่เหมาะสมที่สุดอยู่แค่ในช่วงของขอบเขตบนและขอบเขตล่างซึ่งทำให้ผลการทำนายค่าเซ็ทพอยท์ไม่ผิดเพี้ยน

3.4 ลำดับขั้นตอนที่ใช้ในโปรแกรมเพื่อแก้ปัญหา

ในหัวข้อนี้จะเป็นการอธิบายรายละเอียดลำดับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมที่ถูกสร้างขึ้นจากหัวข้อที่ 3.1-3.3 การอธิบายในส่วนนี้จะเป็นไปในลักษณะโค้ดเสมือน (Pseudo Code) สำหรับนำไปใช้ในการเขียนโปรแกรมสำหรับการทดสอบด้วยการจำลองและการทดลองจริง โดยออกแบบโค้ดเสมือนออกเป็นสองแบบ แบบที่หนึ่งใช้สำหรับการจำลองการทดลอง (Simulation) โดยโปรแกรม MATLAB และแบบที่สองใช้สำหรับการทดลองจริงกับเครื่องจักร (Real Experiment) โดยใช้ภาษาเสมือนจาวา (Pseudo-Java) บนโปรแกรม SoMachine

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 โค้ดเสมือนสำหรับการจำลองการทดลอง

โค้ดเสมือนสำหรับการจำลองการทดลองถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.4

```

C:\Users\Plu\Desktop\thesis_figure_chapter3\1x\pseudo_Kalman_algorithm_for_simulation.txt
Saturday, July 25, 2015 01:45 AM
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% DEFINE Weight Target -----> (Tg)
% DEFINE State Transition Weight -----> (A)
% DEFINE Transformation Weight -----> (H)
% DEFINE Measurement Noise Variance -----> (R)
% DEFINE Process Noise Variance -----> (Q)
% DEFINE Sample Dimension -----> (m)
% DEFINE Sample Size -----> (n)
% DEFINE Pointer -----> (i = 1)
% DEFINE Initial Setpoint -----> (isp)
% DEFINE Initial Predicted Error Variance -----> (iev)
% DEFINE Predicted Setpoint -----> (xprior)
% DEFINE Predicted Error Variance -----> (pprior)
% DEFINE Corrected Setpoint -----> (xpost)
% DEFINE Corrected Error Variance -----> (ppost)
% GENERATE a First Set of Gaussian Noise for "n" Sample(s) -----> (GNS1 = randn(m,n))
% GENERATE a Second Set of Gaussian Noise for "n" Sample(s) -----> (GNS2 = randn(m,n))
% GENERATE Process Noise from the 1st Set of Gaussian Noise -----> (w = sqrt(Q)*GNS1)
% GENERATE Measurement Noise from the 2nd Set of Gaussian Noise ----> (v = sqrt(R)*GNS2)
% GENERATE Measured Weight for "n" Sample(s) -----> (z = Tg+v)
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Run Kalman Algorithm n Iterations -----
% IF pointer = 1,
%     ### Start Kalman Algorithm ###
%     === Do Prediction Update ===
%     SET Predicted Setpoint EQUAL TO Initial Setpoint
%     SET Predicted Error Variance EQUAL TO Initial Predicted Error Variance
%     === Do Correction Update ===
%     CALCULATE Kalman Gain
%     CORRECT the Predicted Setpoint
%     CORRECT the Predicted Error Variance
%     ### Finish Kalman Algorithm ###
%     IF the Corrected Setpoint is NOT in the Boundary,
%     SET the Corrected Setpoint EQUAL TO Boundary
%     END IF
%     ADD 1 TO pointer FOR next iteration
% ELSE
%     ### Run Kalman Algorithm n-1 Iterations ###
%     WHILE (pointer < sample size)
%         ### Start Kalman Algorithm ###
%         === Do Prediction Update ===
%         PREDICT the Predicted Setpoint FROM the previous Corrected Setpoint
%         PREDICT the Predicted Error Variance FROM the previous Corrected Error Variance
%         === Do Correction Update ===
%         CALCULATE Kalman Gain
%         CORRECT the Predicted Setpoint
%         CORRECT the Predicted Error Variance
%         ### Finish Kalman Algorithm ###
%         IF the Corrected Setpoint is NOT in the Boundary,
%         SET the Corrected Setpoint EQUAL TO Boundary
%         END IF
%         ADD 1 TO pointer FOR next iteration
%     END WHILE
% END IF
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% End Iterations -----
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% End Kalman Algorithm -----

```

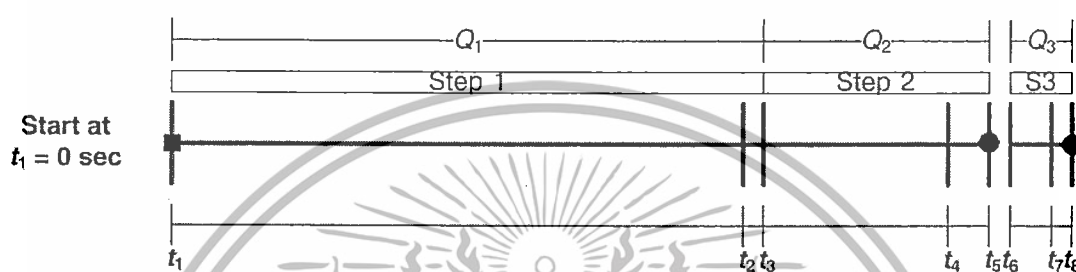
รูปที่ 3.4 โค้ดเสมือนสำหรับการจำลองการทดลองโดยใช้โปรแกรม MATLAB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

- Z คือค่าน้ำหนักวัตถุที่ชั่งได้
- Q_1 คืออัตราการไหลของวัตถุที่ปากปล่อยวัตถุถูกเปิดกว้าง
- Q_2 คืออัตราการไหลของวัตถุที่ปากปล่อยวัตถุถูกเปิดแคบ
- Q_3 คืออัตราการไหลของวัตถุที่ปากปล่อยวัตถุถูกเปิดแคบมาก
- $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7, t_8$ คือเวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบการชั่ง (วินาที) เริ่มต้นที่ t_1 และเสร็จสิ้นที่ t_8

เวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบการชั่งสามารถแสดงเป็นไดอะแกรมทางเวลาดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ไดอะแกรมทางเวลาของแบบจำลองการเปิดปากปล่อยวัตถุ

จากรูปที่ 3.6 การเปิดปากปล่อยวัตถุลงไปซึ่งเริ่มต้นที่ $t_1 = 0$ ที่อัตราการไหล Q_1 จนถึงเวลา t_2 โดยจากเวลา t_2 ไปถึงเวลา t_3 เป็นช่วงเวลาสั้นๆ ของการเปลี่ยนอัตราการไหลจาก Q_1 มาเป็น Q_2 และจาก t_3 เป็นการจ่ายวัตถุด้วยอัตราการไหล Q_2 จนถึง t_4 ซึ่งที่เวลา t_4 ปากปล่อยวัตถุจะถูกปิดและถูกหน่วงเวลาจาก t_4 จนถึง t_5 เพื่อให้น้ำหนักเข้าสู่สภาวะคงตัวและถ้าน้ำหนักวัตถุที่วัดได้มากกว่าหรือเท่ากับค่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมายแล้ว จึงทำการเก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้มาใช้ในการคำนวณค่าเช็ทพอยท์ครั้งต่อไป แต่ถ้าหากน้ำหนักวัตถุที่วัดได้ยังต่ำกว่าค่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมายปากปล่อยวัตถุจะถูกเปิดเพื่อเติมวัตถุด้วยอัตราการไหล Q_1 โดยเริ่มจากเวลา t_6 จนถึง t_7 และเมื่อถึงเวลา t_7 ปากปล่อยวัตถุจะถูกปิด ซึ่งการปิดปากปล่อยวัตถุที่เวลา t_7 น้ำหนักที่วัดได้จะมากกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักเป้าหมายเสมอ ดังนั้นจึงหน่วงเวลาจาก t_7 จนถึง t_8 เพื่อให้น้ำหนักเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วเก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้มาใช้ในการคำนวณค่าเช็ทพอยท์ครั้งต่อไป

จากแบบจำลองการเติมวัตถุลงไปซึ่งจะมีการเก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้มาทำการคำนวณค่าเช็ทพอยท์ครั้งต่อไปอยู่ 2 จุดเวลาคือที่จุดเวลา t_5 และ t_8 ดังแสดงในรูปที่ 3.6 กล่าวคือถ้าการชั่งเสร็จสิ้นที่ t_5 ก็เก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้ ณ ที่เวลา t_5 ไปใช้ในการคำนวณ แต่ถ้าการชั่งเสร็จสิ้นที่ t_8 ก็เก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้ ณ ที่เวลา t_8 ไปใช้ในการคำนวณ

3.5.2 การทดสอบหาค่าเช็ทพอยท์ในกรณีน้ำหนักที่ชั่งได้พอดีหรือมากกว่าค่าที่รับได้

การทดสอบนี้ค่าน้ำหนักที่วัดได้โดยใช้แบบจำลองในสมการที่ 3.10 จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมายเมื่อการชั่งเสร็จสิ้นที่เวลา t_5 โดยที่ทำการทดสอบที่น้ำหนักเป้าหมาย 3505 กรัมจำนวน 50 ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้แบบจำลองการวัดที่สร้างขึ้นร่วมกับเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์ ค่าพารามิเตอร์ R Q $H[T_g]$ \hat{x}_{00} (ค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้น) และ P_{00} (ค่าความแปรปรวนผิดพลาดเริ่มต้น) จะถูกกำหนดขึ้นมาก่อนโดยอาศัยข้อมูลจากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 นอกจากค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมา ยังมี การกำหนดค่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมาย (กำหนดตามที่โรงงานใช้) และค่าขอบเขต สำหรับค่าเซ็ทพอยท์ที่ต้องกำหนดด้วย โดยที่ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการทดสอบประมาณค่าเซ็ทพอยท์

พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด	พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด
$H[T_g]$	1.0094	\hat{x}_{00}	3473 กรัม
Q	1	P_{00}	1
R (ความแปรปรวนร่วม)	$17.6567 \approx 18$ กรัม ²	ค่าขอบเขตล่างที่รับได้ ของน้ำหนักเป้าหมาย	3498 กรัม
ขอบเขตบนสำหรับ เซ็ทพอยท์	3487 กรัม	ขอบเขตล่างสำหรับ เซ็ทพอยท์	3451 กรัม

จากตารางที่ 3.3 ค่าความแปรปรวนน้ำหนักวัดถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ R ของแต่ละ น้ำหนักเป้าหมายแตกต่างกัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานไม่ต้องทำการเปลี่ยนค่า R ทุกครั้ง ที่เปลี่ยนน้ำหนักเป้าหมายจึงใช้ค่าความแปรปรวนร่วมของน้ำหนักวัดถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศแทน นอกจากนี้ค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้นถูกกำหนดให้ใช้ 3473 กรัม เพราะค่าได้มาจากการคำนวณในข้อที่ 3.1.1 โดยจะใช้เป็นค่ากลางสำหรับการเริ่มต้น

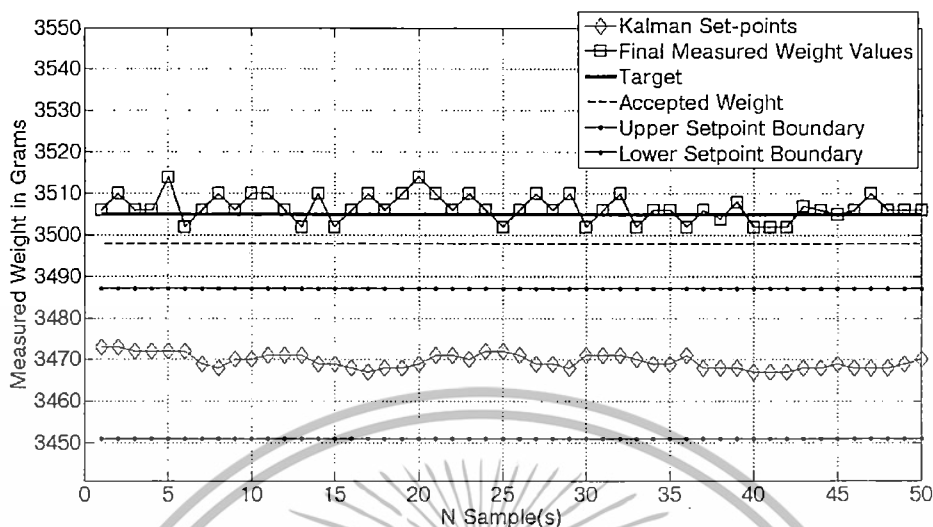
เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าเซ็ทพอยท์แล้ว ต่อมาจะเป็นการกำหนด ค่าพารามิเตอร์สำหรับลำดับการเติมวัตถุดิบดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับลำดับการเติม

พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด	พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด
Q_1	520 กรัมต่อวินาที	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักวัดถุดิบ ที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ	32 กรัม
Q_2	36 กรัมต่อวินาที	ค่าเซ็ทพอยท์การ เปลี่ยนลำดับการเปิดที่ 1 มาลำดับการเปิดที่ 2	3150 กรัม
Q_3	12 กรัมต่อวินาที		

จากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่กล่าวมาเรียบร้อยแล้วจึงเริ่มทำการทดสอบด้วยข้อมูลจำลองที่สร้างขึ้น ได้ผลการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



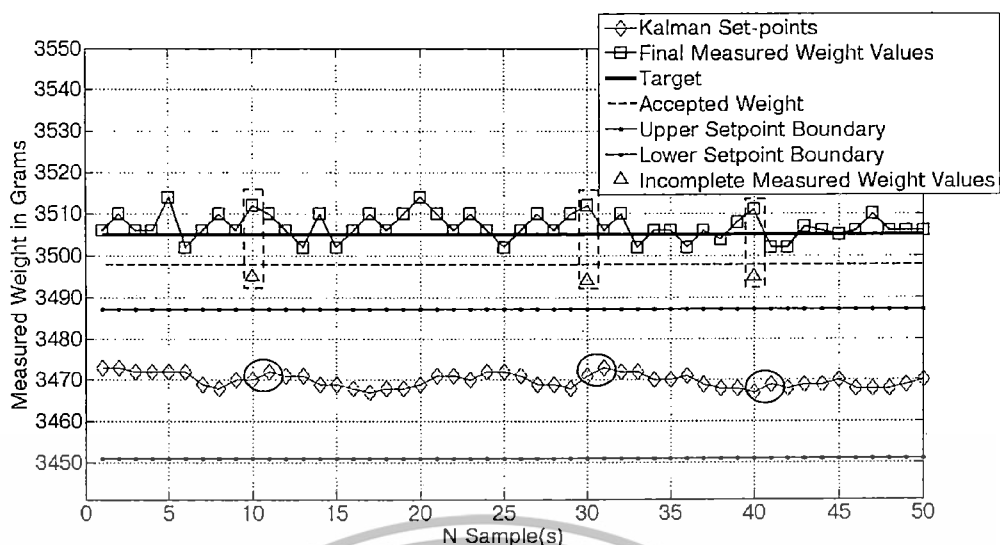
รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบหาค่าเซ็ทพอยท์เมื่อน้ำหนักที่ชั่งได้พอดีหรือมากกว่าค่าที่รับได้

จากรูปที่ 3.7 พบว่าการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการที่สร้างทำการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ (สัญลักษณ์รูปเพชรเชื่อมต่อกัน) ได้สอดคล้องกับน้ำหนักวัดตุ้บที่ลอยค้างอยู่ในอากาศเพราะคือค่าเซ็ทพอยท์ถูกปรับไปตามค่าน้ำหนักที่ชั่งได้ที่เปลี่ยนไป (สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยมเชื่อมต่อกัน) และค่าเซ็ทพอยท์ที่ประมาณค่าไม่มีค่าใดไปอยู่ที่ขอบเขตบนและล่างของเซ็ทพอยท์ (สัญลักษณ์จุดเชื่อมต่อกัน) นั้นหมายความว่าค่าการประมาณค่าไม่เกิดการคำนวณที่ผิดเพี้ยนขึ้น โดยที่น้ำหนักเป้าหมายคือเส้นทึบและเส้นประคือค่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมาย

3.5.3 การทดสอบหาค่าเซ็ทพอยท์ในกรณีน้ำหนักที่ชั่งได้ต่ำกว่าค่าที่รับได้

การทดสอบนี้ค่าน้ำหนักที่วัดได้โดยใช้แบบจำลองในสมการที่ 3.10 จะมีต่ำกว่าค่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมายเมื่อการชั่งเสร็จสิ้นที่เวลา t_s ดังนั้นจึงมีการเปิดปากปล่อยวัตถุบิลด์ที่ 3 (เปิดแคบมาก) และการชั่งจะเสร็จสิ้นที่เวลา t_e ซึ่งน้ำหนักที่วัดได้จะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมาย โดยที่ทำการทดสอบที่น้ำหนักเป้าหมาย 3505 กรัมจำนวน 50 ตัวอย่าง

การทดสอบนี้มีการกำหนดค่าพารามิเตอร์เหมือนกันทุกประการกับการทดสอบในหัวข้อ 3.5.2 เพียงแต่น้ำหนักที่วัดได้จะมีค่าต่ำกว่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมายเมื่อการชั่งเสร็จสิ้นที่เวลา t_s ในบางตัวอย่าง ซึ่งผลการทดสอบถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.8 โดยที่ความหมายของสัญลักษณ์ในรูปมีความหมายเหมือนกับรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบหาค่าเซ็ทพอยท์เมื่อน้ำหนักที่วัดได้ต่ำกว่าค่าที่รับได้

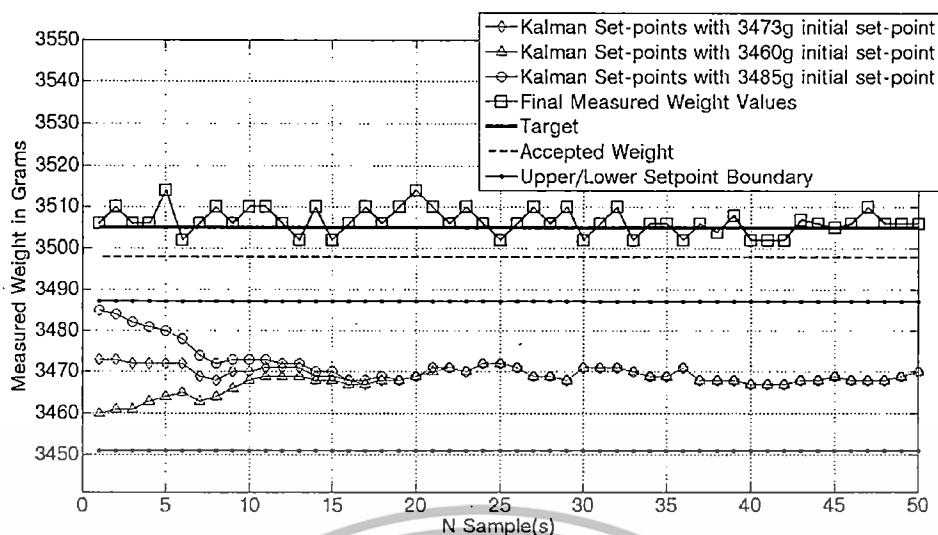
จากรูปที่ 3.8 พบว่าในการทดสอบนี้มีค่าน้ำหนักที่วัดได้ที่ตัวอย่างที่ 10 30 และ 40 (ดูรอบเส้นประสีเหลี่ยม) มีน้ำหนักต่ำกว่าค่าที่รับได้จึงต้องมีการเปิดปากปล่อยวัตถุดิบในลำดับที่ 3 เพื่อเติมน้ำหนักไม่ต่ำกว่าค่าที่รับได้ เพราะฉะนั้นจะเก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้มาทำการประมาณค่าเซ็ทพอยท์หลังจากเสร็จสิ้นการชั่งที่เวลา t_s และยังพบอีกว่าการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ในครั้งต่อไปของทั้งสามตัวอย่าง (ตัวอย่าง 11 31 และ 41) ปรับขึ้น (ดูเส้นประวงกลม) เนื่องจากว่าในครั้งก่อนหน้า 10 30 และ 40 มีค่าต่ำกว่าค่าที่รับได้ แต่ในกรณีตัวอย่างอื่นๆ ก็ทำงานปกติ กล่าวค่าน้ำหนักที่วัดได้มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่รับได้ เมื่อเสร็จสิ้นการชั่งที่เวลา t_s น้ำหนักที่วัดได้ ณ เวลา t_s ก็นำไปใช้ในการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ครั้งต่อไปตามปกติ ซึ่งการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่ได้มีสัมพันธ์กับค่าน้ำหนักที่วัดได้เป็นอย่างดี

จากการทดสอบในหัวข้อนี้ ถ้าในการชั่งน้ำหนักครั้งใดที่ค่าเซ็ทพอยท์ถูกประมาณค่าไม่สอดคล้องกับค่าน้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศทำให้น้ำหนักที่วัดได้ ณ เวลา t_s ต่ำกว่าค่าที่รับได้ จะส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการชั่งครั้งนั้นเพิ่มขึ้นเพราะต้องเติมวัตถุดิบให้ได้เท่ากับหรือมากกว่าค่าที่รับได้นั้นหมายถึงต้องใช้เวลารั้ง t_s

3.5.4 การทดสอบประมาณค่าเซ็ทพอยท์โดยใช้ค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้นที่แตกต่างกัน

จากการทดสอบในหัวข้อ 3.5.2 และ 3.5.3 ค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้นถูกกำหนดให้เท่ากับ 3473 กรัม แต่ในการทดสอบนี้จะทำการเปลี่ยนค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้นให้มีค่าสูงและต่ำกว่าค่า 3473 กรัม ตามลำดับดังนี้ 3485 กรัม และ 3460 กรัม

ค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดสอบนี้จะเหมือนกันกับหัวข้อ 3.5.2 และค่าน้ำหนักที่วัดได้หลังเสร็จสิ้นเวลา t_s มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่รับได้ โดยผลการทดสอบถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ผลการทดสอบหาค่าเซ็ทพอยท์เมื่อค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้นแตกต่างกัน

จากรูปที่ 3.9 พบว่าภายใต้การทดสอบที่ระบบมีคุณสมบัติเหมือนกัน การประมาณค่าเซ็ทพอยท์ไม่ว่าจะใช้ค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้นค่าใด สุดท้ายแล้วค่าเซ็ทพอยท์ก็จะลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมที่สุดค่าหนึ่งที่เป็นค่าเดียวกัน จากรูปน้ำหนักที่วัดได้คือสัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยมและค่าเซ็ทพอยท์ที่ได้จากการประมาณโดยใช้ค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้น 3473 กรัม 3460 กรัม และ 3485 กรัม แทนด้วยสัญลักษณ์รูปเพชร สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยม และสัญลักษณ์รูปวงกลมตามลำดับ

3.6 การทดลองจริงกับเครื่องชั่งแบบเติม

จากการทดสอบในหัวข้อที่ 3.5.2 ถึง 3.5.4 พบว่าค่าเซ็ทพอยท์มีการปรับค่าไปตามค่าน้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่เกิดขึ้นจริงโดยอาศัยน้ำหนักที่ได้จากการวัดมาทำการประมาณค่า ทำให้มีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้จริงกับเครื่องชั่งแบบเติม ในหัวข้อนี้จะนำเอาแบบจำลองการวัดที่สร้างขึ้นสำหรับใช้กับเทคนิคคาลมานฟิลเตอร์มาทำการทดลองจริงกับเครื่องชั่งแบบเติม (รูปที่ 1.16) ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัม ตามลำดับและทำการเก็บตัวอย่างละ 200 ตัวอย่าง

การทดลองจริงจะทำการวัดประสิทธิภาพของวิธีการที่สร้างด้วยกฎเกณฑ์ดังนี้ วัดความถูกต้องของน้ำหนักที่วัดได้ วัดเวลาที่ใช้ในการชั่งน้ำหนัก และ วัดจำนวนรอบการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติ กล่าวคือเมื่อเสร็จสิ้นการชั่งที่เวลา t_s แล้วน้ำหนักที่วัดได้มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าค่าที่รับได้ (เซ็ทพอยท์สัมพันธ์กับน้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ) ถือว่าการชั่งน้ำหนักรอบนี้ปกติ (Matched Weighing) แต่หากเมื่อเสร็จสิ้นการชั่งที่เวลาที่ t_s แล้วน้ำหนักที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่รับได้ แล้วต้องทำการเติมจนน้ำหนักได้เท่ากับหรือมากกว่าค่าที่รับได้ที่เวลา t_s (เซ็ทพอยท์ไม่สัมพันธ์กับน้ำหนักที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ) ถือว่าการชั่งน้ำหนักรอบนี้ไม่ปกติ (Unmatched Weighing)

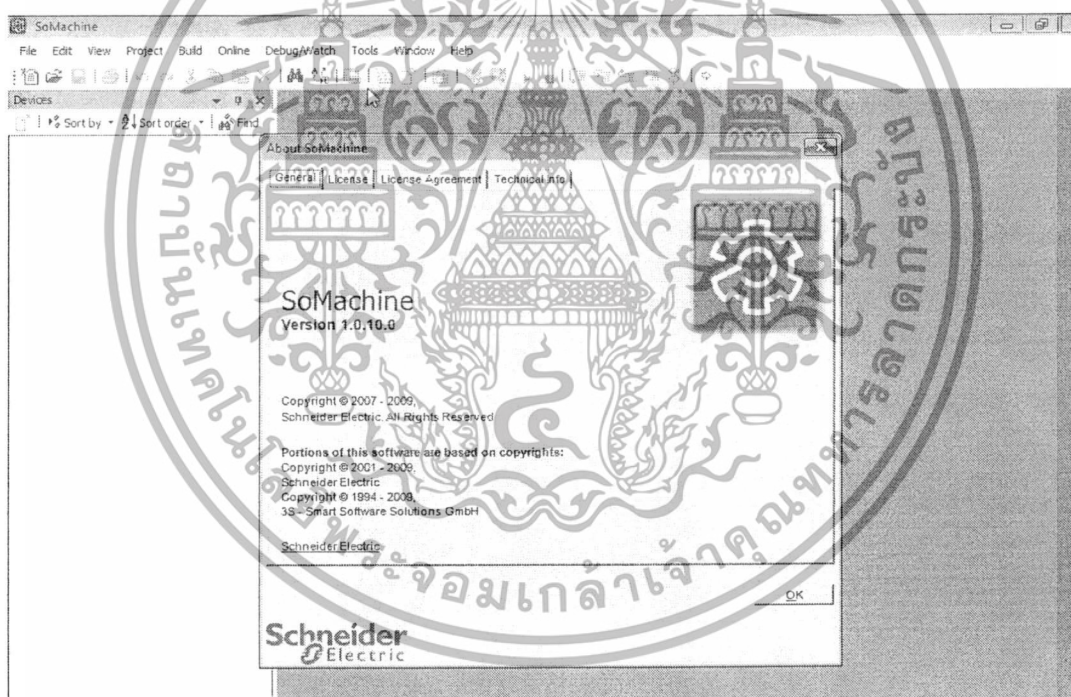
เนื่องจากเครื่องชั่งแบบเติมที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ใช้เทคนิคการหาค่าเซ็ทพอยท์คล้ายคลึงกับเทคนิคที่ใช้ใน [3] ดังนั้นจึงเก็บผลที่ได้จากเทคนิคที่ใช้อยู่บนเครื่องชั่งนี้มาทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการที่สร้างขึ้นด้วย ต่อไปจะเรียกเทคนิคที่ใช้อยู่บนเครื่องชั่งแบบเติมว่าเทคนิคเสมือน [3] โดยลำดับการเปิดปากปล่อยวัตถุติดของเทคนิคเสมือน [3] มีลักษณะเดียวกันกับแบบจำลองการเปิดปากปล่อยวัตถุติดในสมการที่ 3.10 (เปิดปากปล่อยวัตถุติด 3 ลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.1 การนำเอาแบบจำลองการวัดที่สร้างไปใช้กับเครื่องชั่งแบบเต็ม

เครื่องชั่งแบบเต็มที่นำมาใช้ในการทดลองมีระบบการควบคุมโดยใช้โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller: PLC) หรือเรียกว่าพีแอลซี ควบคุมการทำงานทั้งหมดของตัวเครื่องชั่ง ซึ่งพีแอลซีที่ใช้อยู่บนเครื่องชั่งใช้ยี่ห้อ Schneider รุ่น Modicon M238 ดังนั้นการโปรแกรมลงบนตัวพีแอลซีจึงทำผ่านซอฟต์แวร์ SoMachine (ดูรูปที่ 3.10) ที่ทางบริษัท Schneider พัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้เขียนโปรแกรมควบคุมเครื่องจักร ในงานวิทยานิพนธ์ใช้ซอฟต์แวร์ SoMachine เวอร์ชัน 1.0.10.0 ซึ่งรองรับภาษาที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมสำหรับเครื่องจักรตามมาตรฐาน IEC 61131-3 ได้แก่

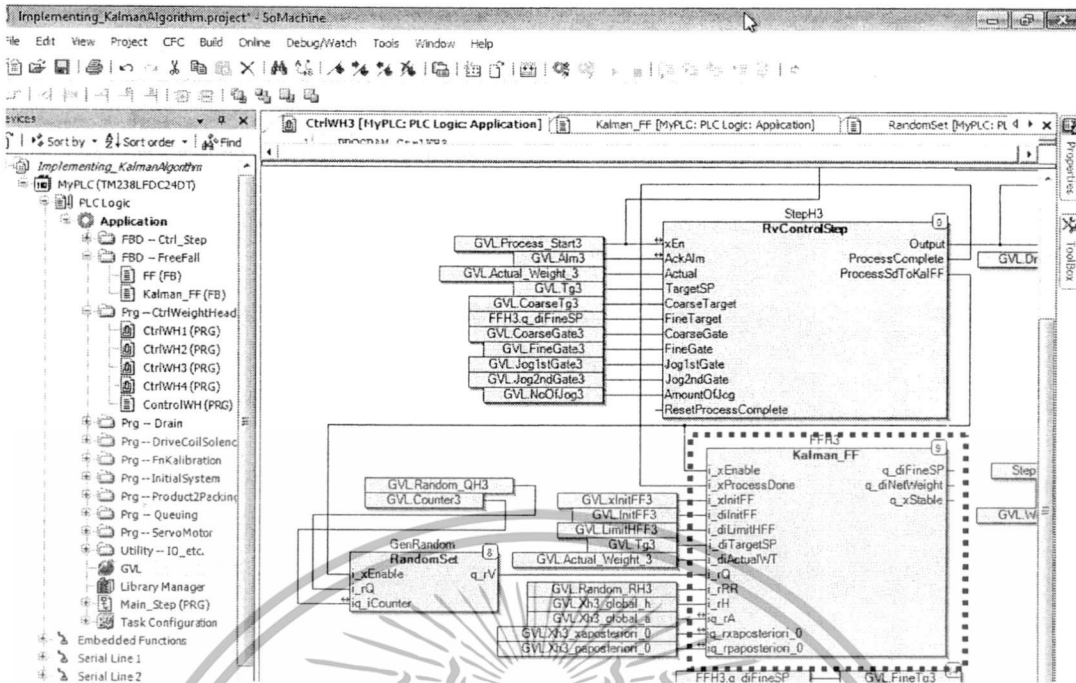
- Ladder Diagram (LD)
- Sequential Function Charts (SFCs)
- Function Block Diagram (FBD)
- Structured Text (ST) มีลักษณะคล้ายคลึงภาษาจาวา
- Instruction List (IL) และ
- Continuous Function Charts (CFCs)



รูปที่ 3.10 ซอฟต์แวร์ SoMachine

การนำเอาแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาใช้บนซอฟต์แวร์ SoMachine ในงานวิจัยนี้ใช้ 2 ภาษาในการนำเอาโค้ดเสมือนในรูปที่ 3.5 มาเขียนโปรแกรมได้แก่ Function Block Diagram และ Structured Text โดยเริ่มจากการสร้างขาป้อนเข้า (Input Pins) ขาป้อนออก (Output Pins) และขาป้อนเข้าออก (Input and Output Pins) สำหรับ Function Block Diagram อยู่รอบเส้นประสี่เหลี่ยมดังแสดงในรูปที่ 3.11 และตั้งชื่อ Function Block Diagram ว่า “Kalman_FF”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 ขากรใช้งานสำหรับ Kalman_FF Function Block Diagram

เมื่อได้ Function Block Diagram มาแล้ว ทำการแปลงโค้ดเสมือนให้เป็นโค้ดที่ตัวแปลภาษา (Compiler) ของซอฟต์แวร์ SoMachine เข้าใจ แล้วเขียนชุดคำสั่งเข้าไปในตัว Function Block Diagram ซึ่งโค้ดเสมือนที่ถูกแปลงเสร็จเรียบร้อยแล้วพร้อมใช้งานถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 3.12

```

1  IP i_InitFF = FALSE THEN
2  q_dFineSP := i_dTargetSP - i_dInitFF; init_pr := (i_dTargetSP - i_dInitFF) * h; i_rh;
3  Act_xposteriori_0 := DINT_TO_REAL(i_dTargetSP - i_dInitFF); sDRR := Sqrt(i_rRR);
4  END IF
5  IF i_InitFF = TRUE AND i_xEnable = FALSE AND justime = 0 THEN
6  //Calculate the state and the output
7  //Predictor equations
8  xpriori_1 := a * i_xposteriori_0 + i_rQ;
9  ppriori_1 := a * i_qposteriori_0 + i_rR; //Q=1;
10 //Corrector equations
11 h * h * ppriori_1 / (h * h * ppriori_1 + i_rRR);
12 pposteriori_1 := ppriori_1 * (1 - h * h);
13 xposteriori_1 := xpriori_1 + h * h * xpriori_1;
14 //To prevent the setpoint get overshoot SDRR/2_rRR roughly equal to 6
15 IF xposteriori_1 >= DINT_TO_REAL(i_dTargetSP) - (sDRR * 4.5) THEN
16 xposteriori_1 := DINT_TO_REAL(i_dTargetSP) - (sDRR * 4.5);
17 END IF
18 IF xposteriori_1 <= DINT_TO_REAL(i_dTargetSP) - (sDRR * 13.5) THEN
19 xposteriori_1 := DINT_TO_REAL(i_dTargetSP) - (sDRR * 13.5);
20 END IF
21 //Map a predicted setpoint to FineSP
22 q_dFineSP := REAL_TO_DINT(xposteriori_1); justime := 1;
23 END IF
24 IF i_xProcessDone = FALSE AND justime = 1 THEN
25 i_q_xposteriori_0 := xposteriori_1; i_q_rposteriori_0 := pposteriori_1;
26 i_q_dNetWeight := i_dActualWT; q_xStable := TRUE;
27 END IF
28 IF i_xProcessDone = FALSE AND justime = 1 THEN
29 justime := 0; update_time := 0; q_xStable := FALSE;
30 END IF
    
```

รูปที่ 3.12 โค้ดสำหรับการประมาณค่าเซ็ทพอยท์อาศัยแบบจำลองการวัด

โค้ดในรูปที่ 3.12 ส่วนที่เป็นหัวใจหลักของการประมาณค่าเซ็ทพอยท์อยู่กรอบเส้นประสี่เหลี่ยม ในกรอบเริ่มด้วยการใช้เทคนิคคาลมานฟิลเตอร์และตามด้วยการกำหนดขอบเขตเซ็ทพอยท์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในหัวข้อต่อไปจะเป็นการทดลองจริงกับเครื่องชั่งแบบเดิมโดยใช้โค้ดที่สร้างขึ้น

3.6.2 การนำเอาแบบจำลองการวัดที่สร้างไปใช้กับเครื่องชั่งแบบเดิม

การทดลองต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับทั้งแบบจำลองการวัดและค่าที่ต้องใช้สำหรับเครื่องชั่งแบบเดิมดังแสดงในตารางที่ 3.5 โดยในตารางจะประกอบไปด้วยการกำหนดค่าของน้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 3.5 การกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นสำหรับการทดลองจริง

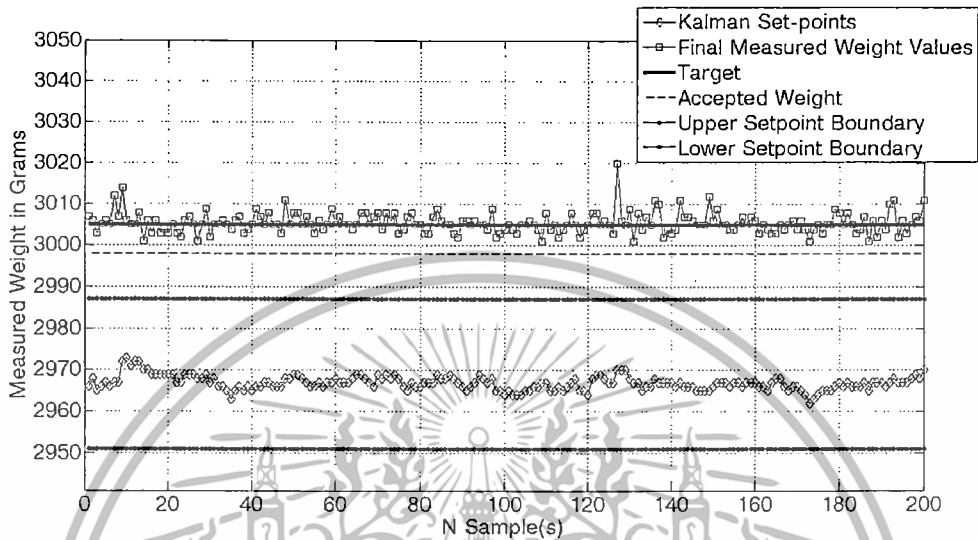
ค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม			
พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด	พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด
$H[T_g]$	1.0124	\hat{x}_{opt}	2968 กรัม
Q	1	$P_{0 0}$	1
R (ความแปรปรวนร่วม)	$17.6567 \approx 18$ กรัม ²	ค่าขอบเขตล่างที่รับได้ ของน้ำหนักเป้าหมาย	2998 กรัม
ขอบเขตบนสำหรับ เซ็ทพอยท์	2987 กรัม	ขอบเขตล่างสำหรับ เซ็ทพอยท์	2951 กรัม
ค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัม			
พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด	พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด
$H[T_g]$	1.0054	\hat{x}_{opt}	4978 กรัม
Q	1	$P_{0 0}$	1
R (ความแปรปรวนร่วม)	$17.6567 \approx 18$ กรัม ²	ค่าขอบเขตล่างที่รับได้ ของน้ำหนักเป้าหมาย	4998 กรัม
ขอบเขตบนสำหรับ เซ็ทพอยท์	4987 กรัม	ขอบเขตล่างสำหรับ เซ็ทพอยท์	4951 กรัม
ค่าพารามิเตอร์สำหรับเครื่องชั่งแบบเดิมที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัม			
พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด	พารามิเตอร์	ค่าที่ถูกกำหนด
สำหรับแบบจำลองการวัดที่ออกแบบ		สำหรับเทคนิคเสมือน [3]	
Q_1	138 องศา	Q_1	138 องศา
Q_2	60 องศา	Q_2	60 องศา
Q_3	35 องศา	Q_3	35 องศา
ค่าเซ็ทพอยท์การ เปลี่ยนลำดับการเปิดที่ 1 มาลำดับการเปิดที่ 2	เป้าหมาย 3005 กรัม	ค่าเซ็ทพอยท์การ เปลี่ยนลำดับการเปิดที่ 1 มาลำดับการเปิดที่ 2	เป้าหมาย 3005 กรัม
	2600 กรัม		2600 กรัม
ค่าเซ็ทพอยท์การ เปลี่ยนลำดับการเปิดที่ 1 มาลำดับการเปิดที่ 2	เป้าหมาย 5005 กรัม	ค่าเซ็ทพอยท์การ เปลี่ยนลำดับการเปิดที่ 1 มาลำดับการเปิดที่ 2	เป้าหมาย 5005 กรัม
	4250 กรัม		4250 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

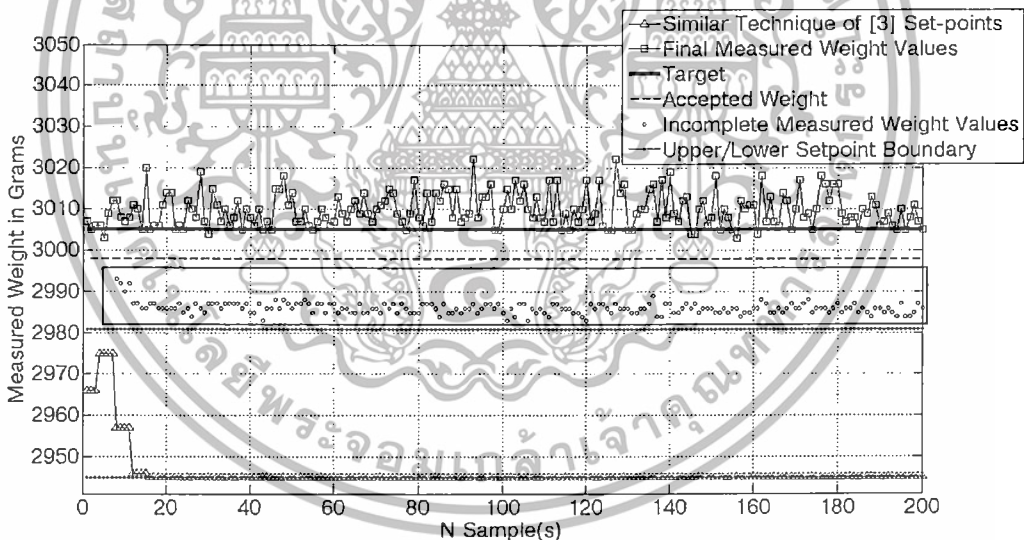
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้กำหนดให้ค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้นที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัม ของเทคนิคเสมือน [3] ที่ใช้อยู่บนเครื่องชั่งเป็น 2966 กรัม และ 4978 กรัม ตามลำดับ

ผลการทดลองกับเครื่องชั่งแบบเต็มที่น้ำหนัก 3005 กรัม และ 5005 กรัม ของทั้ง วิธีถูก แสดงอยู่ในรูปที่ 3.13 และ 3.14



(ก) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยแบบจำลองการวัด



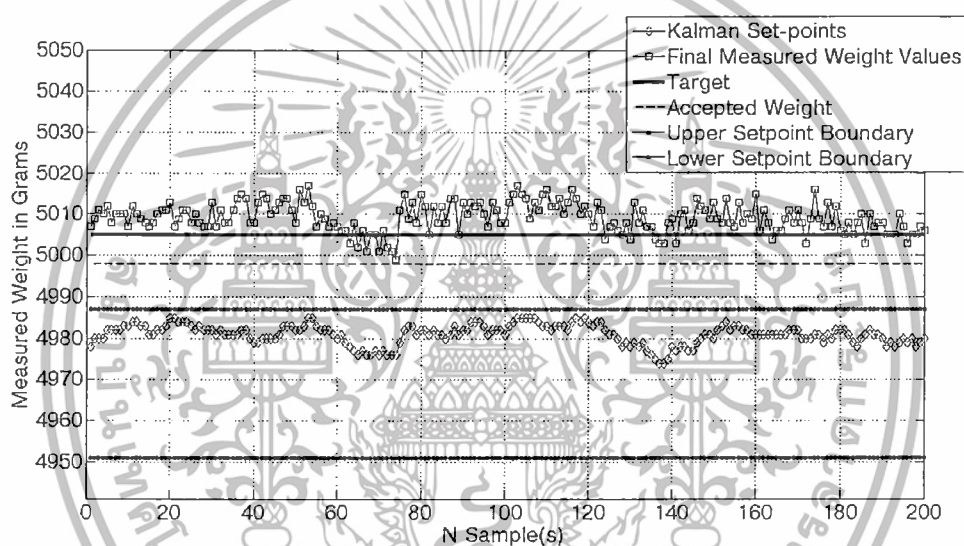
(ข) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยเทคนิคเสมือน [3]

รูปที่ 3.13 ค่าเซ็ทพอยท์จากแบบจำลองการวัดและเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 3005 กรัม

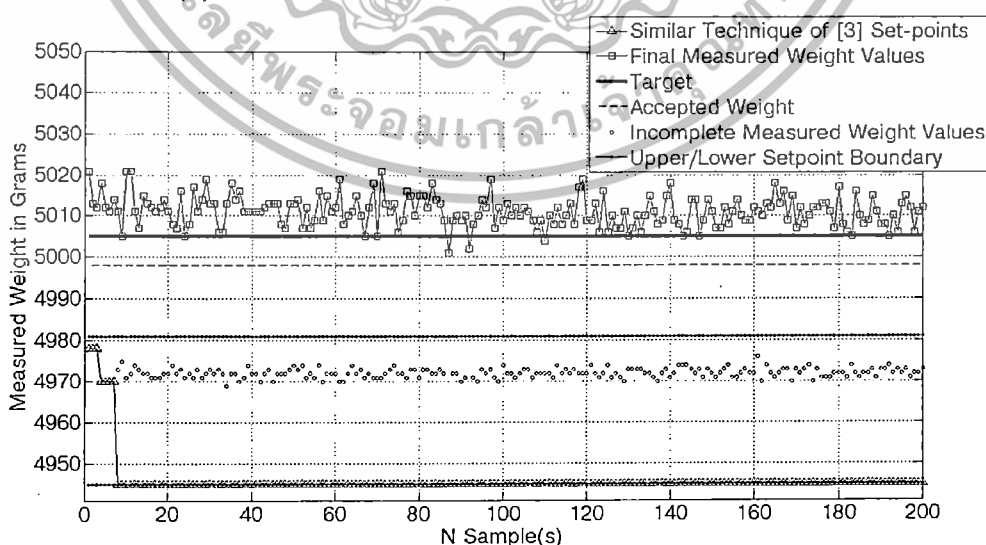
จากรูปที่ 3.13(ก) พบว่าการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ (สัญลักษณ์รูปเพชร) สัมพันธ์กับน้ำหนักวัดดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศเพราะค่าน้ำหนักที่วัดได้ (สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยม) ในแต่ละครั้งไม่ต่ำกว่ากว่าค่าที่รับได้ (เส้นประ) และเกาะกลุ่มอยู่ที่น้ำหนักเป้าหมายที่ 3005 กรัม (เส้นทึบ) นอกจากนี้ค่าเซ็ทพอยท์ที่ได้ไม่มีค่าใดไปอยู่บนขอบเขตบนและขอบเขตล่าง (สัญลักษณ์จุดเล็กเชื่อมต่อกัน) ดังนั้นทำให้การชั่งน้ำหนักในแต่ละครั้งปกติไม่ต้องการเปิดปากปล่อยวัตถุดิบลำดับที่ 3 ซึ่งในการทดลองที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัมก็ให้ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในทางกลับกันด้วยการใช้เทคนิคเสมือน [3] ประมาณหาค่าเซ็ทพอยท์ (สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยม) ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม เริ่มมีปัญหาในการปรับค่าเซ็ทพอยท์ตั้งแต่ตัวอย่างที่ 8 ถึงตัวอย่างสุดท้าย (รูปที่ 3.13(ข)) เนื่องจากการชดเชยน้ำหนักเริ่มผิดพลาดในช่วงตัวอย่างที่ 4 ถึงตัวอย่างที่ 7 ทำค่าเซ็ทพอยท์ที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นเมื่อนำไปรวมกับน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศน้ำหนักที่วัดได้ย่อมต่ำกว่าค่าที่รับได้แน่นอน (แสดงในกรอบสี่เหลี่ยมสัญลักษณ์รูปวงกลม) ทำให้ต้องเปิดปากปล่อยวัตถุกลับลำดับที่ 3 เติมน้ำหนักที่วัดได้เท่ากับหรือมากกว่าน้ำหนักเป้าหมาย แต่การชดเชยค่าเซ็ทพอยท์ไม่ได้ใช้ค่าน้ำหนักก่อนการเปิดปากปล่อยวัตถุกลับลำดับที่ 3 มาทำการชดเชย กลับใช้น้ำหนักที่วัดได้หลังการชั่งเสร็จสิ้นที่เวลา t_s ตามแบบจำลองการเติมในสมการที่ 3.10 ทำให้การชดเชยค่าเซ็ทพอยท์ต่ำลงไปอีกเพราะน้ำหนักที่วัดได้ (สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยม) หลังเสร็จสิ้นที่เวลา t_s มีค่าเท่ากับหรือมากกว่าน้ำหนักเป้าหมายเสมอ ซึ่งการทดลองที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัมใช้เทคนิคเสมือน [3] ผลการทดลองที่ได้ก็มีปัญหาในลักษณะนี้เช่นกัน



(ก) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยแบบจำลองการวัด



(ข) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยเทคนิคเสมือน [3]

รูปที่ 3.14 ค่าเซ็ทพอยท์จากแบบจำลองการวัดและเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 5005 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัม (รูปที่ 3.13 และ 3.14) ค่าเซ็ทพอยท์ที่ประมาณค่าได้ถูกนำมาสรุปเป็นข้อมูลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 3.6 รวมทั้งนำเอาข้อมูลผลการทดลองมาวัดประสิทธิภาพด้วยเกณฑ์ต่อไปนี้ได้แก่ วัดความถูกต้องโดยใช้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ดังแสดงในสมการที่ 3.11 วัดเวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักทั้งหมด 200 ตัวอย่าง และวัดความถี่จำนวนการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติ (ทำแค่สองลำดับการเปิดปากปล่อยวัตถุ) ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ถึง 3.9

$$\%M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Tg - MW_i}{Tg} \right| \times 100 \quad (3.11)$$

โดยที่

$\%M$ คือค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย

Tg คือค่าน้ำหนักเป้าหมาย

MW คือค่าน้ำหนักที่วัดได้ (Final Measured Weight)

n คือจำนวนตัวอย่างที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 3.6 ค่าเซ็ทพอยท์ที่ได้จากการทดลองจริง

	แบบจำลองการวัดที่สร้าง		เทคนิคเสมือน [3]	
	น้ำหนักเป้าหมาย	น้ำหนักเป้าหมาย	น้ำหนักเป้าหมาย	น้ำหนักเป้าหมาย
	3005 กรัม	5005 กรัม	3005 กรัม	5005 กรัม
จำนวนตัวอย่างที่ทดลอง	200 ตัวอย่าง	200 ตัวอย่าง	200 ตัวอย่าง	200 ตัวอย่าง
ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่วัดได้	3505.5 กรัม	5009.3 กรัม	3009.8 กรัม	5011.1 กรัม
ค่าเฉลี่ยเซ็ทพอยท์	2967 กรัม	4982 กรัม	2946 กรัม	4946 กรัม
ความแปรปรวนของเซ็ทพอยท์	2.8606 กรัม ²	5.7485 กรัม ²	26.0502 กรัม ²	28.1665 กรัม ²
ค่าเฉลี่ยน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ	39 กรัม	27 กรัม	64 กรัม	65 กรัม

จากตารางที่ 3.6 เป็นการสรุปข้อมูลทางสถิติของการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีทั้งสองที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัม พบว่าค่าเซ็ทพอยท์และค่าน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่ได้จากการประมาณค่าด้วยวิธีการที่สร้างมีค่าใกล้เคียงกับที่ได้คำนวณไว้ในหัวข้อที่ 3.1 แสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการที่สร้างสามารถปรับค่าเซ็ทพอยท์ให้เปลี่ยนไปตามค่าน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่เกิดขึ้นจริง แต่ขณะที่ในเทคนิคเสมือน [3] ไม่สามารถปรับให้ค่าเซ็ทพอยท์ให้เปลี่ยนไปตามน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่เกิดขึ้นจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ความถูกต้องของน้ำหนักที่วัดได้จากการทดลอง

	แบบจำลองการวัดที่สร้าง		เทคนิคเสมือน [3]	
	น้ำหนักเป้าหมาย	น้ำหนักเป้าหมาย	น้ำหนักเป้าหมาย	น้ำหนักเป้าหมาย
	3005 กรัม	5005 กรัม	3005 กรัม	5005 กรัม
จำนวนตัวอย่างที่ทดลอง	200 ตัวอย่าง	200 ตัวอย่าง	200 ตัวอย่าง	200 ตัวอย่าง
ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่วัดได้	3505.5 กรัม	5009.3 กรัม	3009.8 กรัม	5011.1 กรัม
ความแปรปรวนของน้ำหนักที่วัดได้	6.2814 กรัม ²	12.7562 กรัม ²	17.0629 กรัม ²	14.4884 กรัม ²
ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย	0.0569%	0.0935%	0.1631%	0.1234%

ตารางที่ 3.8 เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการชั่งน้ำหนัก

น้ำหนักเป้าหมาย	จำนวนตัวอย่าง	แบบจำลองการวัดที่สร้าง	จำนวนตัวอย่าง	เทคนิคเสมือน [3]
		เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการชั่ง (นาทีก)		เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการชั่ง (นาทีก)
3005 กรัม	200	≈ 29	200	≈ 41
5005 กรัม	200	≈ 34	200	≈ 52

ตารางที่ 3.9 ความถี่จำนวนการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติและไม่ปกติ

น้ำหนักเป้าหมาย	จำนวนตัวอย่าง	แบบจำลองการวัดที่สร้าง		จำนวนตัวอย่าง	เทคนิคเสมือน [3]	
		จำนวนครั้งที่ชั่งปกติ	จำนวนครั้งที่ชั่งไม่ปกติ		จำนวนครั้งที่ชั่งปกติ	จำนวนครั้งที่ชั่งไม่ปกติ
3005 กรัม	200	200	0	200	7	193
5005 กรัม	200	200	0	200	9	191

จากตารางที่ 3.7 ถึง 3.9 พบว่าการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่ใช้กับแบบจำลองการวัดที่สร้างขึ้นมีความสัมพันธ์กับค่าน้ำหนักวัดดูดิบที่ลอยค้ำงอยู่ในอากาศ (แต่ค่าน้ำหนักวัดดูดิบที่ลอยค้ำงอยู่ในอากาศนี้ไม่ได้ถูกนำมาใช้ตรงๆ แต่จะถูกแปลงไปให้อยู่ในรูปของค่าน้ำหนักที่วัดได้ตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่ 3.1) เพราะค่าความถูกต้องที่ได้ก็ต่ำกว่าวิธีที่ใช้ชั่งก่อนทั้งสองน้ำหนักเป้าหมาย รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการชั่งทั้งหมดสำหรับ 200 ตัวอย่างของสองน้ำหนักเป้าหมายก็ต่ำกว่า และสุดท้ายเมื่อพิจารณาความถี่จำนวนการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติ วิธีการที่นำมาประยุกต์ใช้เหนือกว่าเทคนิคที่ใช้อยู่เดิม ถึงแม้จะใช้แบบจำลองการเปิดปากปลอ่ยวัดดูดิบเหมือนกันแต่วิธีการชดเชยค่าเซ็ทพอยท์เมื่อการชั่งทำงานไม่ปกติ (ต่ำกว่าค่าที่รับได้) พบว่าวิธีการที่สร้างขึ้นมานี้ปรับค่าเซ็ทพอยท์ได้ดีกว่าดังที่ได้ทดสอบในหัวข้อที่ 3.5.3 ซึ่งต่างกันอย่างเห็นได้ชัดกับเทคนิคเสมือน [3] ที่ไม่สามารถปรับค่าเซ็ทพอยท์ให้เหมาะสมได้ กล่าวคือเทคนิคเสมือน [3] ไม่ควรใช้ค่าน้ำหนักที่วัดได้เป็นเวลา t_4 มาทำการ

ชดเชยค่าเซ็ทพอยท์ควรจะใช้ค่าน้ำหนักที่วัดได้เป็นเวลา t_5 มาทำการชดเชยค่าเซ็ทพอยท์จะโยชน์ด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากการทดลองข้างต้นก็เป็นการยืนยันได้ว่าวิธีการที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้กับเครื่องชั่งแบบเดิมได้

แต่อย่างไรก็ดีแบบการจำลองการวัดที่สร้างขึ้นก็ยังมีปัญหาที่ต้องทำการแก้ไขอยู่ ซึ่งปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นในการทดลองจริงกับเครื่องชั่งแบบเดิมที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัม จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าเซ็ทพอยท์มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงขึ้นเกือบขนขอบเขตเซ็ทพอยท์ด้านบน ทั้งๆ ที่ควรจะปรับค่าเซ็ทพอยท์ลดลงเพราะน้ำหนักที่วัดได้มากกว่าน้ำหนักเป้าหมายอยู่ ซึ่งจากปัญหาดังกล่าวเป็นผลทำให้น้ำหนักที่วัดได้มีค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 5009.3 กรัม (เพิ่มขึ้นมา 4.3 กรัม) และในทำนองเดียวกันถ้าน้ำหนักที่วัดได้มีแนวโน้มลดลง การปรับค่าเซ็ทพอยท์ของแบบจำลองการวัดที่สร้างจะปรับลงตามทั้งๆ ที่ควรจะปรับขึ้นเพื่อให้น้ำหนักพอดีกับน้ำหนักเป้าหมาย ดังนั้นในบทถัดไปจะทำการออกแบบจำลองกระบวนการเพื่อแก้ปัญหาข้างต้น

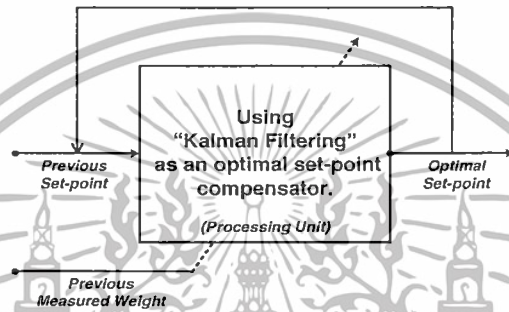


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การสร้างแบบจำลองกระบวนการ

ในบทนี้เป็นการอธิบายรายละเอียดการออกแบบจำลองกระบวนการเพื่อแก้ปัญหาของแบบจำลองการวัดที่ได้กล่าวไว้ที่ท้ายบทก่อนหน้า การทำงานของแบบจำลองกระบวนการถูกแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งการออกแบบนี้ทำการตัดส่วนตัวจำกัดความหนานแบบอ่อนเพื่อลดกระบวนการประมวลผลลง โดยใช้เพียงแค่น้ำหนักที่วัดได้มาช่วยในการปรับค่าเซ็ทพอยท์



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการประมาณค่าเซ็ทพอยท์

4.1 การออกแบบจำลองกระบวนการ

การออกแบบจำลองกระบวนการจะออกแบบให้สอดคล้องกับสมการที่ 3.1 ซึ่งสมการนี้ใช้ในการเปลี่ยนสถานะครั้งก่อนหน้ามาเป็นสถานะครั้งปัจจุบัน กล่าวคือการเปลี่ยนเซ็ทพอยท์ครั้งก่อนหน้ามาเป็นเซ็ทพอยท์ครั้งปัจจุบัน โดยที่ค่าถ่วงน้ำหนักการเปลี่ยนค่าเซ็ทพอยท์ก่อนหน้าเป็นค่าเซ็ทพอยท์ปัจจุบันจะเป็นตัวปรับให้ค่าเซ็ทพอยท์ A ขึ้นหรือลง แต่การนำไปใช้ในแบบจำลองการวัดค่า A ถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่เท่ากับหนึ่งทำให้การปรับค่าเซ็ทพอยท์ยังไม่ได้มีดัดกัน ดังนั้นในบทนี้จะทำการสร้างค่า A ให้แปรเปลี่ยนไปตามค่าน้ำหนักที่วัดได้ด้วยสมมติฐานดังต่อไปนี้

“ถ้าค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ในครั้งนั้นมีค่ามากกว่าค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้แล้วนั้น ค่าเซ็ทพอยท์ในครั้งต่อไปจะต้องปรับให้ต่ำลง แต่ในทางกลับกันถ้าค่าน้ำหนักที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ในครั้งนั้นมีค่าต่ำกว่าค่าเป้าหมายที่กำหนดไว้แล้วนั้น ค่าเซ็ทพอยท์ในครั้งต่อไปจะต้องปรับขึ้น”

การทำให้ค่า A แปรเปลี่ยนไปตามสมมติฐานที่ออกแบบทำให้ A เป็น $A[n]$ และจัดรูปสมการที่ 3.1 ใหม่ได้สมการที่ 4.1

$$x[n] = A[n]x[n-1] + Bu[n] + w[n] \quad (4.1)$$

การออกแบบค่า $A[n]$ อาศัยแนวความคิดของตัวกรองปรับค่าได้ (Adaptive Filter) มาประยุกต์ใช้กับสมมติฐานที่ต้องการ ปกติแล้วเทคนิคตัวกรองปรับค่าได้จะใช้กับระบบที่มีสัญญาณเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป้าหมาย (Desired Signal) ที่มีลักษณะตายตัว (Deterministic Signal) และสัญญาณที่ได้จากการวัดที่มีสัญญาณรบกวนปะปน (Noisy Measurement Signal) ที่มีลักษณะเป็นสัญญาณแบบสุ่ม (Random Signal) ที่ไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก (Stationary Sense) แต่สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเอาแนวความคิดของตัวกรองปรับค่าได้มาใช้เพื่อตอบสนองสมมติฐานที่ตั้งขึ้นเท่านั้น เพราะการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองจะอาศัยการหาค่าความต่างกัน (เชิงสหสัมพันธ์) ของสัญญาณเป้าหมายกับสัญญาณที่ได้จากการวัดที่มีสัญญาณรบกวนปะปนมาด้วยและเมื่อการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองเข้าสู่สถานะที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 2.23 ดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$h_{optimal}[n] = r_{dx} R_{xx}^{-1} \quad (4.1)$$

โดยที่

$h_{optimal}[n]$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของระบบที่เข้าสู่สถานะที่เหมาะสมที่สุด
 $r_{dx} h[n]$ คือค่าสหสัมพันธ์ไขว้ของสัญญาณเป้าหมายกับสัญญาณที่ได้จากการวัด
 R_{xx} คือค่าสหสัมพันธ์ในตัวเองของสัญญาณที่ได้จากการวัดกับสัญญาณที่ได้จากการวัด

ทำการจัดรูปสมการที่ 4.1 ใหม่โดยให้ค่าสหสัมพันธ์ไขว้และค่าสหสัมพันธ์ในตัวเองอยู่ในรูปของค่าคาดหวังตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ โดยที่เป็นการหาค่าคาดหวังของสัญญาณครั้งปัจจุบันและสัญญาณครั้งก่อนหน้า 1 ค่าดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$h_{optimal}[n] = \frac{E(x[n]d[n-1])}{E(x[n]x[n-1])} \quad (4.2)$$

ซึ่งพบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนค่าสัญญาณเป้าหมายครั้งก่อนหน้า ($d[n-1]$) ให้เป็นค่าน้ำหนักเป้าหมายครั้งก่อนหน้า ($Tg[n-1]$) แต่ค่าน้ำหนักเป้าหมายมีค่าคงที่ตลอดดังนั้นจึงใช้เป็น Tg และค่าสัญญาณที่ได้จากการวัด ($x[n], x[n-1]$) เป็นค่าน้ำหนักวัดติดบัพที่วัดได้ ($z[n], z[n-1]$) จะมีลักษณะการปรับค่า $A[n]$ ตามที่ตั้งสมมติฐานแต่ยังนำเอาไปใช้ไม่ได้ดังสมการที่ 4.3

$$A[n] = \frac{E(z[n]Tg)}{E(z[n]z[n-1])} \quad (4.3)$$

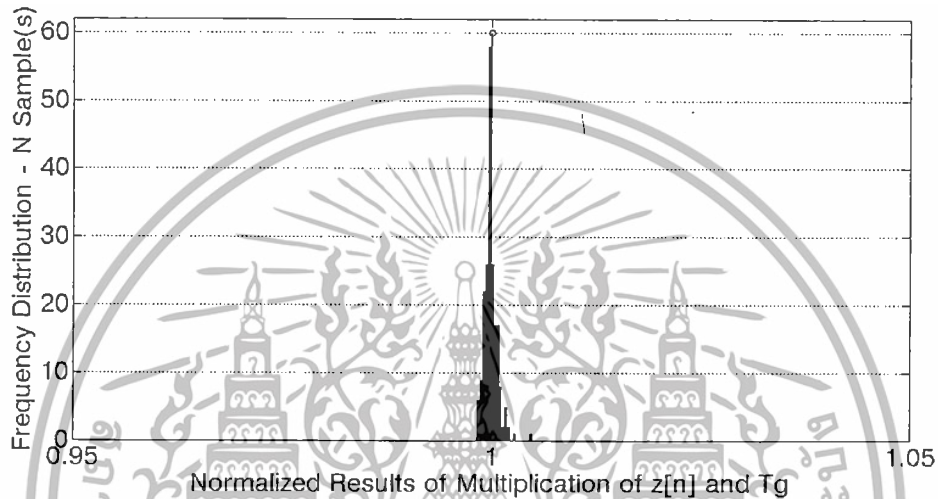
เนื่องจากค่า $E(z[n]Tg)$ และค่า $E(z[n]z[n-1])$ เป็นค่าเฉลี่ยเมื่อหารกันออกมาก็จะเป็นค่าเฉลี่ยค่าเฉลี่ยค่าหนึ่งจึงทำให้การปรับค่า $A[n]$ ไม่เปลี่ยนไปตามค่าน้ำหนักที่วัดได้ทุกครั้ง ดังนั้นเพื่อให้ค่า $A[n]$ เปลี่ยนไปตามค่าน้ำหนักที่วัดได้ทุกครั้ง จึงทำการพิสูจน์ว่าค่า $z[n]Tg$ มีค่าใกล้เคียงกับค่า $E(z[n]Tg)$ และค่า $z[n]z[n-1]$ มีค่าใกล้เคียงกับค่า $E(z[n]z[n-1])$ เพื่อที่จะนำไปใช้แทนกัน

การพิสูจน์ทำได้โดยการหาค่า $E(z[n]Tg)$ และเปรียบเทียบกับผลของการคูณของ $z[n]Tg$ ถ้าค่า $z[n]Tg$ มีค่าเข้าใกล้ค่า $E(z[n]Tg)$ ก็จะสามารถหาค่า $E(z[n]Tg)$ คือค่า $z[n]Tg$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่า $E(z[n]z[n-1])$ และค่า $z[n]z[n-1]$ ก็จะทำในทำนองเดียวกัน โดยที่ค่า $z[n]Tg$ ค่า $E(z[n]Tg)$ ค่า $z[n]z[n-1]$ และค่า $E(z[n]z[n-1])$ จะถูกคำนวณโดยใช้ผลการทดลองจริงที่ได้ ในบทที่ 3 ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัม (ดูภาคผนวก)

ผลการคำนวณหาค่า $E(z[n]Tg)$ ค่า $z[n]Tg$ ค่า $E(z[n]z[n-1])$ และค่า $z[n]z[n-1]$ ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัมถูกแสดงอยู่ในรูปแบบภาพแท่งความถี่ (Histogram) ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ถึง 4.5 ตามลำดับ โดยที่ค่าทั้งหมดถูกทำให้เป็นมาตรฐาน (Normalization) เดียวกันหมด ซึ่งค่า $E(z[n]Tg)$ และค่า $E(z[n]z[n-1])$ จะเท่ากับหนึ่ง

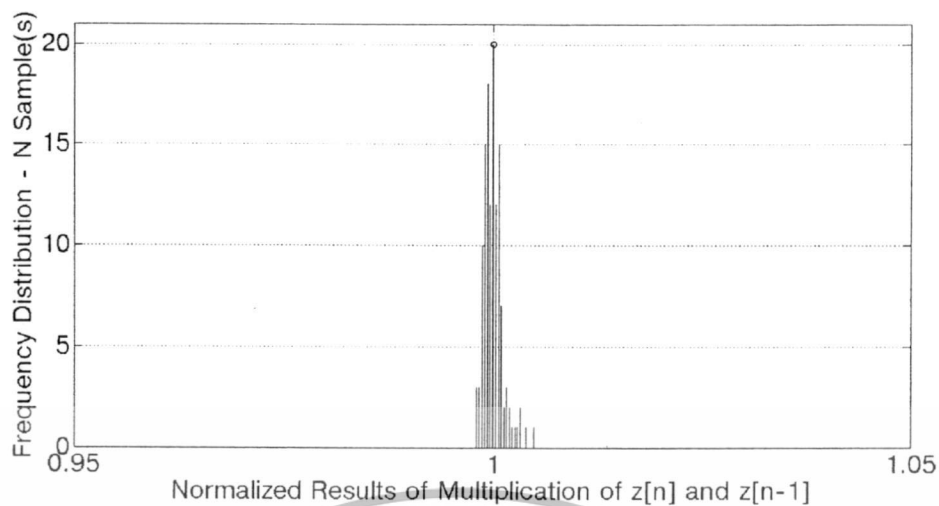


รูปที่ 4.2 ภาพแท่งความถี่ของค่า $E(z[n]Tg)$ และค่า $z[n]Tg$ ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม

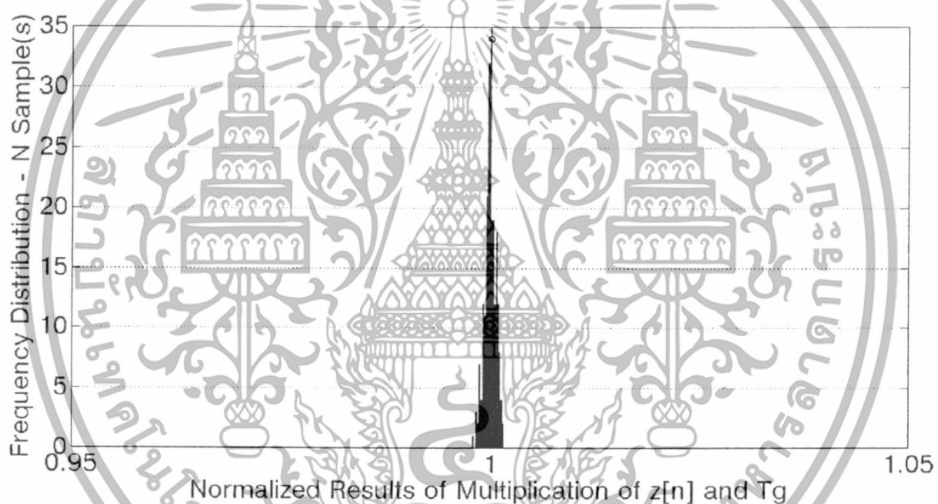
จากรูปที่ 4.2 ค่า $E(z[n]Tg)$ จะเป็นค่าๆ เดียว (แท่งดำที่บัพห้วงกลม) เพราะเป็นค่าเฉลี่ย ส่วนค่า $z[n]Tg$ จะมีหลายค่าเนื่องจากค่า $z[n]$ จากการทดลองมีจำนวน 200 ตัวอย่าง จะพบว่าผลคูณของ $z[n]Tg$ ที่ได้เกาะอยู่กับเส้นค่า $E(z[n]Tg)$ จึงทำให้สามารถประมาณค่า $E(z[n]Tg)$ ให้เป็นค่า $z[n]Tg$ ได้เพราะมีค่าใกล้เคียงกัน และผลที่ได้ในรูปที่ 4.2 ถึง 4.5 ก็มีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นค่า $E(z[n]z[n-1])$ จึงถูกประมาณค่าให้เป็น $z[n]z[n-1]$ ด้วยเช่นกัน ดังนั้นสมการที่ 4.3 จึงสามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 4.4

$$A[n] \approx \frac{z[n]Tg}{z[n]z[n-1]} \quad (4.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

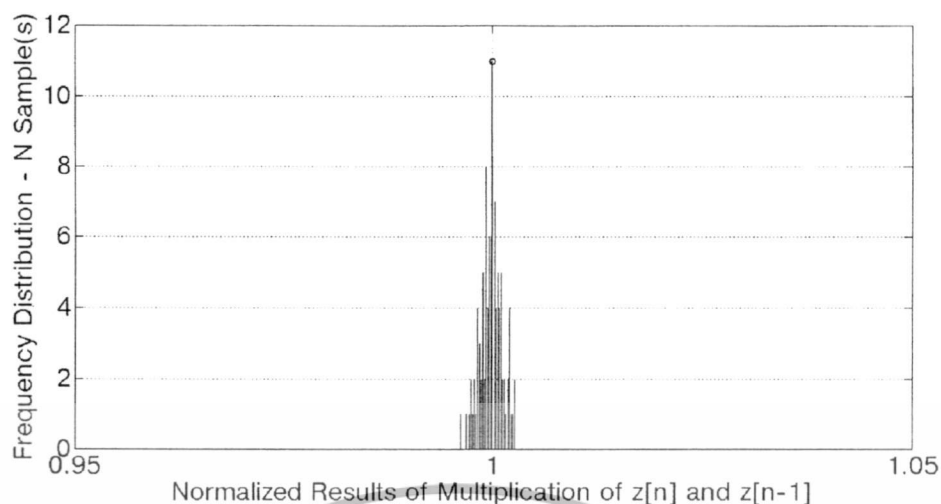


รูปที่ 4.3 ภาพแท่งความถี่ของค่า $E(z[n]z[n-1])$ และค่า $z[n]z[n-1]$
ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม



รูปที่ 4.4 ภาพแท่งความถี่ของค่า $E(z[n]Tg)$ และค่า $z[n]Tg$ ที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ภาพแท่งความถี่ของค่า $E(z[n]z[n-1])$ และค่า $z[n]z[n-1]$
ที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัม

จากสมการที่ 4.4 เมื่อค่าน้ำหนักที่วัดได้ต่ำกว่าค่าน้ำหนักเป้าหมายจะทำให้ค่า $A[n]$ เพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าค่าเซ็ทพอยท์จะถูกปรับขึ้นให้สัมพันธ์กับน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้ำอยู่ในอากาศ ในทำนองเดียวกันเมื่อค่าน้ำหนักที่วัดได้สูงกว่าค่าน้ำหนักเป้าหมายจะทำให้ค่า $A[n]$ ลดลง ค่าเซ็ทพอยท์ก็จะลดลงตามไปด้วย ดังนั้นความสัมพันธ์จึงตอบสนองสมมติฐานที่ตั้งขึ้น ในหัวข้อถัดไปจะเป็นการทดสอบด้วยข้อมูลจำลอง

4.2 การทดสอบด้วยข้อมูลจำลองโดยใช้วิธีการใหม่

ในการทดสอบนี้จะใช้แบบจำลองการเติมวัตถุดิบลงไปซึ่งแบบเดียวกันกับในบทที่ 3 เพียงแต่มีการเงื่อนไขการเก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้ จากการก่อนหน้านี้ถ้าการชั่งน้ำหนักทำงานปกติจะเก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลา t_5 และถ้าการชั่งน้ำหนักทำงานไม่ปกติจะเก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลา t_8 จากเงื่อนไขเดิมข้างต้นที่กล่าวมาถูกเปลี่ยนเป็นไม่ว่าการชั่งน้ำหนักจะทำงานปกติหรือไม่ปกติก็ตาม ให้ทำการเก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้เมื่อเวลา t_5 เท่านั้นในการนำไปประมาณค่าเซ็ทพอยท์สำหรับการชั่งครั้งต่อไป

ในส่วนของโค้ดเสมือนสำหรับการจำลองมีการแทรกส่วนที่เป็นการปรับค่า $A[n]$ เข้าไปก่อนหน้าส่วน “Do Prediction Update” (ตรงกรอบสี่เหลี่ยมในรูปที่ 4.6) และตัดส่วนที่เป็นตัวจำกัดความหนานแบบอ่อนออก ดังแสดงในรูปที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

C:\Users\Plu\Desktop\thesis_figure_chapter3\text\pseudo_Kalman_algorithm_for_simulation.txt
Monday, July 27, 2015 12:03 AM
%*****"Kalman Algorithm for Simulating in MATLAB"*****%
%
% DEFINE Weight Target -----> (Tg)
% DEFINE State Transition Weight -----> (A)
% DEFINE Transformation Weight -----> (H)
% DEFINE Measurement Noise Variance -----> (R)
% DEFINE Process Noise Variance -----> (Q)
% DEFINE Sample Dimension -----> (m)
% DEFINE Sample Size -----> (n)
% DEFINE Pointer -----> (i = 1)
% DEFINE Initial Setpoint -----> (isp)
% DEFINE Initial Predicted Error Variance -----> (iev)
% DEFINE Predicted Setpoint -----> (xprior)
% DEFINE Predicted Error Variance -----> (pprior)
% DEFINE Corrected Setpoint -----> (xpost)
% DEFINE Corrected Error Variance -----> (ppost)
% GENERATE a First Set of Gaussian Noise for "n" Sample(s) -----> (GNS1 = randn(m,n))
% GENERATE a Second Set of Gaussian Noise for "n" Sample(s) -----> (GNS2 = randn(m,n))
% GENERATE Process Noise from the 1st Set of Gaussian Noise -----> (u = sqrt(Q)*GNS1)
% GENERATE Measurement Noise from the 2nd Set of Gaussian Noise ----> (v = sqrt(R)*GNS2)
% GENERATE Measured Weight for "n" Sample(s) -----> (z = Tg+v)
%
%*****--Run Kalman Algorithm n Iterations--*****%
% IF pointer = 1,
%   ### Start Kalman Algorithm ###
%   === Do Prediction Update ===
%   %%% No Need to Adjust State Transition Weight Here %%%
%   SET Predicted Setpoint EQUAL TO Initial Setpoint
%   SET Predicted Error Variance EQUAL TO Initial Predicted Error Variance
%   === Do Correction Update ===
%   CALCULATE Kalman Gain
%   CORRECT the Predicted Setpoint
%   CORRECT the Predicted Error Variance
%   ### Finish Kalman Algorithm ###
%
%   ADD 1 TO pointer FOR next iteration
% ELSE
%   ### Run Kalman Algorithm n-1 Iterations ###
%   WHILE (pointer < sample size)
%     ### Start Kalman Algorithm ###
%     === Do Prediction Update ===
%     ADJUST State Transition Weight FROM the previous Measured Weight
%     PREDICT the Predicted Setpoint FROM the previous Corrected Setpoint
%     PREDICT the Predicted Error Variance FROM the previous Corrected Error Variance
%     === Do Correction Update ===
%     CALCULATE Kalman Gain
%     CORRECT the Predicted Setpoint
%     CORRECT the Predicted Error Variance
%     ### Finish Kalman Algorithm ###
%
%     ADD 1 TO pointer FOR next iteration
%   END WHILE
% END IF
%*****--End Iterations--*****%
%*****"End Kalman Algorithm"*****%

```

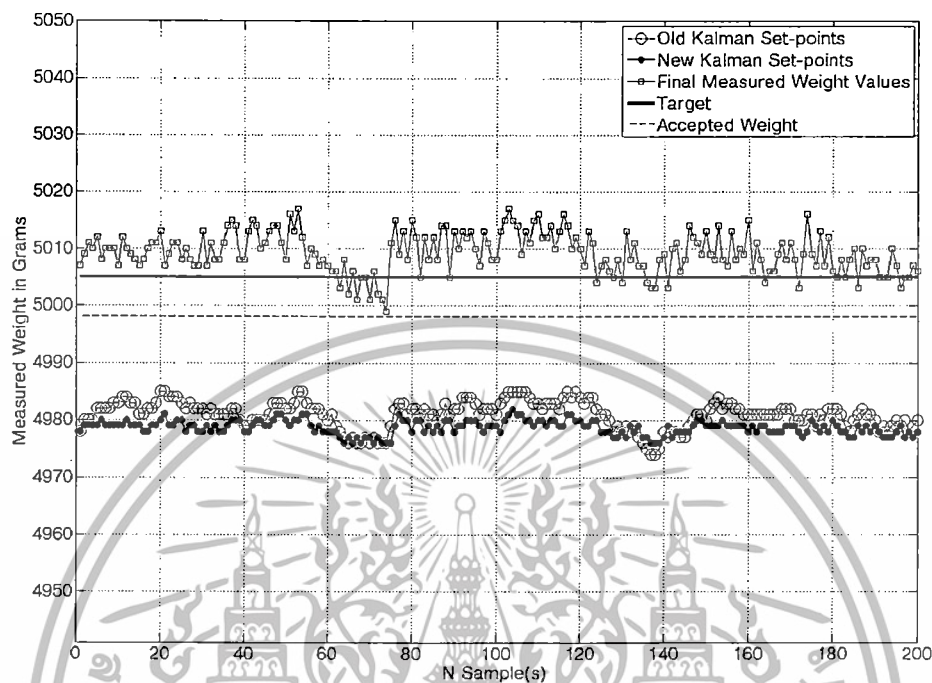
รูปที่ 4.6 โค้ดเสมือนสำหรับการจำลองที่ถูกแก้ไข

4.2.1 การทดสอบหาค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการที่ออกแบบเพิ่มเติม

ในการทดสอบด้วยข้อมูลจำลองจะเอาผลที่ได้จากการทดลองจริงที่น้ำหนักเป้าหมาย 5005 กรัมมาทำการทดสอบเพราะในการทดลองนี้เกิดปัญหาดังที่กล่าวไว้ท้ายบทที่ 3 ดังนั้นการทดสอบจะเป็นการเปรียบเทียบการหาค่าเซ็ทพอยท์ของแบบการใช้แบบจำลองการวัดอย่างเดียว เทียบกับวิธีการที่ใช้แบบจำลองกระบวนการร่วมกับแบบจำลองการวัดเพื่อแก้ไขปัญหา ในการทดสอบค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมดถูกกำหนดให้เหมือนกันกับการทดลองจริงกับเครื่องชั่งแบบเดิมเพียงแต่ค่า $A[m]$ จะไม่ถูกกำหนดให้คงที่แต่จะแปรเปลี่ยนไปตามค่าน้ำหนักที่วัดได้และค่า R ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะการปรับค่าเซ็ทพอยท์แบบใหม่จะอาศัยการปรับจากค่า $A[n]$ โดยผลการทดสอบการประมาณค่าเซ็ทพอยท์แบบใหม่ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบหาค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีใหม่

จากรูปที่ 4.7 พบว่าการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการใหม่นี้พยายามขจัดเซ็ทพอยท์ให้ต่ำลงเพื่อให้สัมพันธ์กับน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่เพิ่มขึ้น โดยผลการทดสอบข้างต้นถูกสรุปเป็นข้อมูลสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าเซ็ทพอยท์ที่ได้จากการทดสอบ

	แบบจำลองการวัดที่สร้าง	แบบจำลองกระบวนการที่สร้าง
	น้ำหนักเป้าหมาย	น้ำหนักเป้าหมาย
	5005 กรัม	5005 กรัม
จำนวนตัวอย่างที่ทดลอง	200 ตัวอย่าง	200 ตัวอย่าง
ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่วัดได้	5009.3 กรัม	5009.3 กรัม
ค่าเฉลี่ยเซ็ทพอยท์	4982 กรัม	4979 กรัม
ความแปรปรวนของเซ็ทพอยท์	5.7485 กรัม ²	1.4984 กรัม ²

จากข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 4.1 เป็นการยืนยันว่าการปรับค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการใหม่สามารถปรับค่าเซ็ทพอยท์ได้สอดคล้องมากกว่าวิธีการที่อาศัยแบบจำลองการวัดเพียงอย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับค่าเซ็ทพอยท์ของวิธีการใหม่จะมีลักษณะคล้ายๆ กับแบบเดิมแต่แก้ปัญหาเรื่องที่ได้กล่าวไว้ ดังนั้นการทดสอบด้วยการใช้โดยใช้ค่าเซ็ทพอยท์เริ่มต้นที่แตกต่างกัน การทดสอบหาค่าเซ็ทพอยท์ในกรณีน้ำหนักที่ซั่งได้ต่ำกว่าค่าที่รับได้ และการทดสอบหาค่าเซ็ทพอยท์ในกรณีน้ำหนักที่ซั่งได้พอดีหรือมากกว่าค่าที่รับได้ จะให้ผลการทดสอบไปในทิศทางเดียวกันจึงไม่ได้ทำการทดสอบในบทนี้

4.3 การนำแบบจำลองกระบวนการไปทดลองจริงกับเครื่องซั่งแบบเดิม

ในการทดลองจริงจะคล้ายๆ กับ การทดลองจริงในบทที่แล้ว เพียงเงื่อนไขการเก็บค่าน้ำหนักที่วัดได้มาทำประมาณค่าเซ็ทพอยท์จะใช้เงื่อนไขใหม่ตามที่ได้กล่าวไว้ใน การทดสอบแล้วทั้งวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] นอกจากนี้ยังได้กำหนดค่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมายใหม่ลดลงจาก 7 กรัมเหลือเพียง 5 กรัม

ในส่วนของโค้ดที่ใช้สำหรับการทดลองมีการแทรกการปรับค่า $A[n]$ เพิ่มเข้าไป (อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยม) ตัดส่วนที่เป็นตัวจำกัดความหนาแน่นแบบอ่อนออกดังแสดงในรูปที่ 4.8

การทดลองจริงแบ่งการออกเป็น 2 การทดลอง ดังนี้ การทดลองที่หนึ่งจะทดลองกับวัตถุดิบที่มีความชื้นปกติ (อัตราการไหลดี) และการทดลองที่สองจะทดลองกับวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง (อัตราการไหลแย)

น้ำหนักเป้าหมายที่ใช้ในการทดลองคือ 3005 กรัม 3505 กรัม และ 5005 กรัม และเก็บตัวอย่างต่อเนื่องอย่างละ 50 ตัวอย่าง และการทดลองนี้จะทำการทดลองเทคนิคเสมือน [3] เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการประมาณค่าเซ็ทพอยท์

```

1 IF i_InitFF = FALSE THEN
2   q_diFineSP:=i_diTargetSP - i_diInitFF ;init_sp*(0.1*i_diTargetSP - i_diInitFF );
3   hi:=10.047 - (1.635*BXMPT(10,-3)*i_diTargetSP) + (1.613*BXMPT(10,-3)*BXMPT(i_diTargetSP,2) );
4   iq_xaposteriori_0:= DINT_TO_REAL(i_diTargetSP - i_diInitFF);
5 END_IF
6
7 IF i_InitFF = TRUE AND i_xEnable = TRUE AND justitime = 0 THEN
8   z:=( i_diActualWT );
9   IF (updateTime = 0) THEN iq_xA:=((DINT_TO_REAL(i_diTargetSP)*0.1)/(z)*10;updateTime
10  q:= iq_xA;
11
12
13
14 xapriori_1:=iq_xaposteriori_0+q;
15 papriori_1:=xapriori_1; //Q=1;
16 //Corrector equations
17 k:=xapriori_1/(h+h*xapriori_1+PRR);
18 paposteriori_1:=papriori_1*(1-h*k);
19 xaposteriori_1:=xapriori_1+(z-h*xapriori_1);
20 //Map a predicted setpoint to FineSP
21 q_diFineSP:=REAL_TO_DINT(xaposteriori_1);justitime:=1;
22 END_IF
23
24 IF i_xProcessDone = TRUE AND justitime = 1 THEN
25   iq_xaposteriori_0:= xaposteriori_1; iq_xpaposteriori_0:= paposteriori_1;
26   q_diNetWeight := i_diActualWT; q_xStable:= TRUE;
27 END_IF
28
29 IF i_xProcessDone = FALSE AND justitime = 1 THEN
30   justitime:=0;updateTime := 0;q_xStable:=FALSE;
31 END_IF
  
```

รูปที่ 4.8 โค้ดสำหรับการทดลองที่เพิ่มการปรับการค่า $A[n]$

ในการทดลองค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมดถูกกำหนดให้เหมือนกันกับการทดลองจริงกับเครื่องซั่งแบบเดิม (เหมือนบทที่ 3) เพียงแต่ค่า $A[n]$ จะไม่ถูกกำหนดให้คงที่แต่จะแปรเปลี่ยนไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

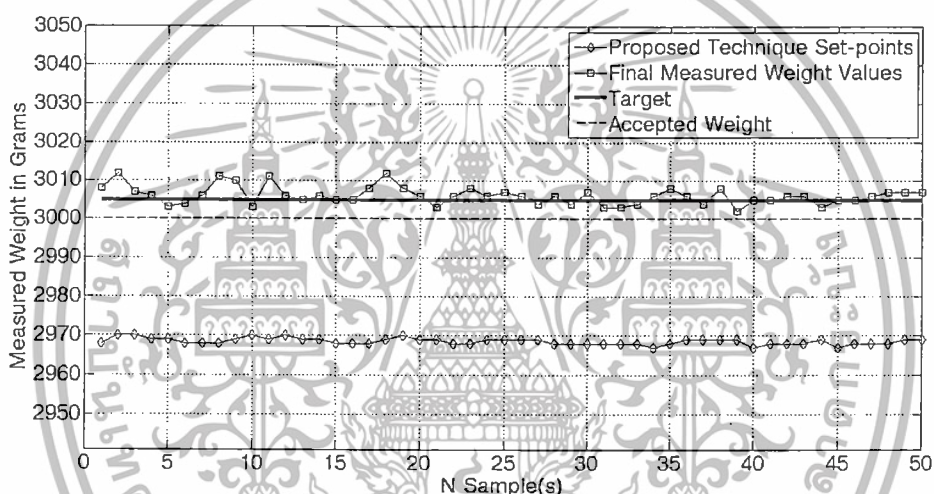
ค่าน้ำหนักที่วัดได้ ค่า R ถูกกำหนดให้เท่ากับหนึ่ง และค่าขอบเขตล่างที่รับได้ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม 3505 กรัม และ 5005 กรัม ถูกกำหนดเงื่อนไขใหม่ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าขอบเขตล่างที่รับได้ตามเงื่อนไขใหม่

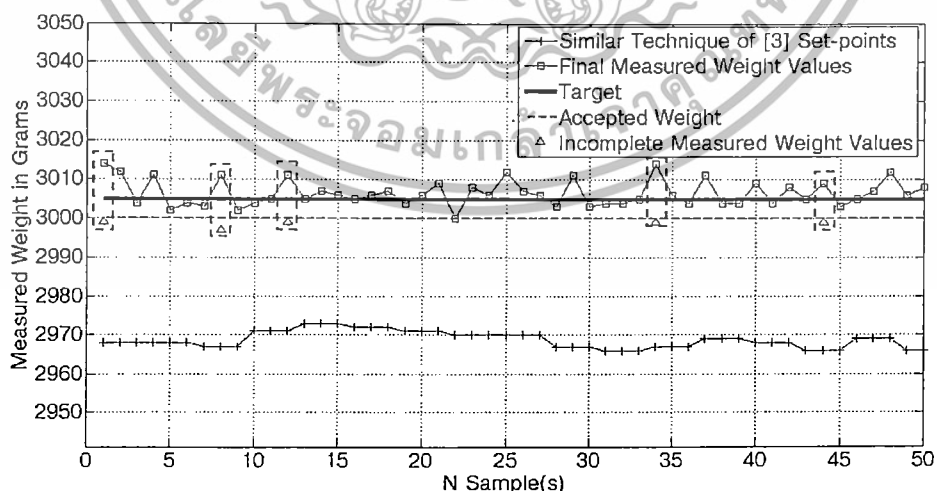
	น้ำหนักเป้าหมาย		
	3005 กรัม	3505 กรัม	5005 กรัม
ค่าขอบเขตล่างที่รับได้	3000 กรัม	3500 กรัม	5000 กรัม

4.3.1 ผลการทดลองการหาค่าเซ็ทพอยท์กับการชั่งน้ำหนักวัตถุที่มีความชื้นปกติ

ผลการทดลองการหาค่าเซ็ทพอยท์ของวิธีการใหม่กับเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม 3505 กรัม และ 5005 กรัม ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.9 ถึง 4.11 ตามลำดับ



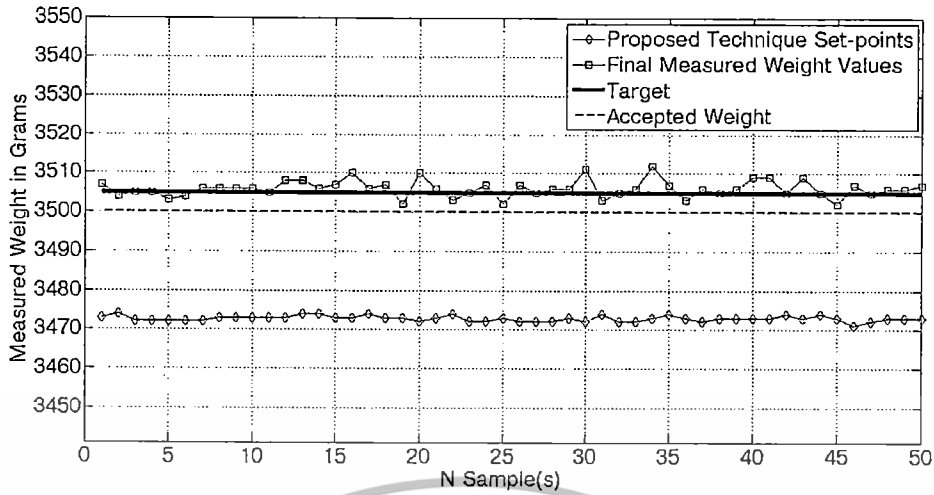
(ก) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการใหม่



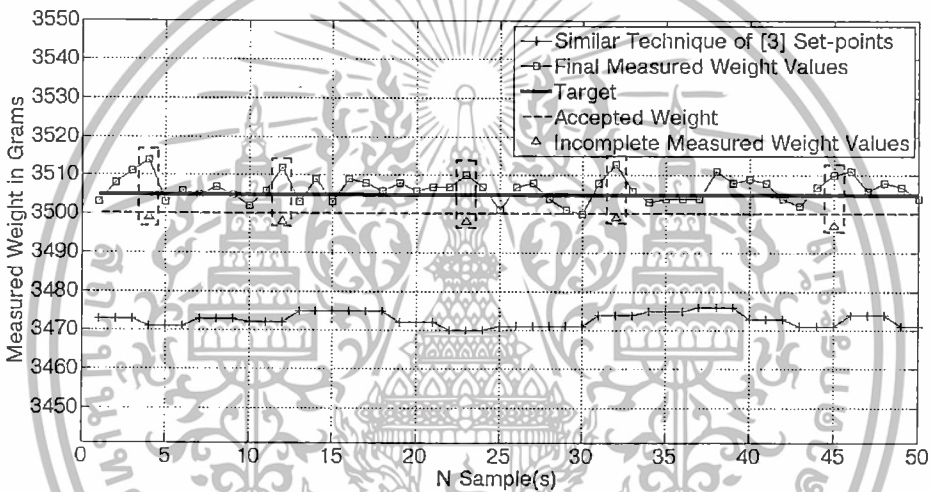
(ข) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยเทคนิคเสมือน [3]

รูปที่ 4.9 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 3005 กรัม (ความชื้นปกติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



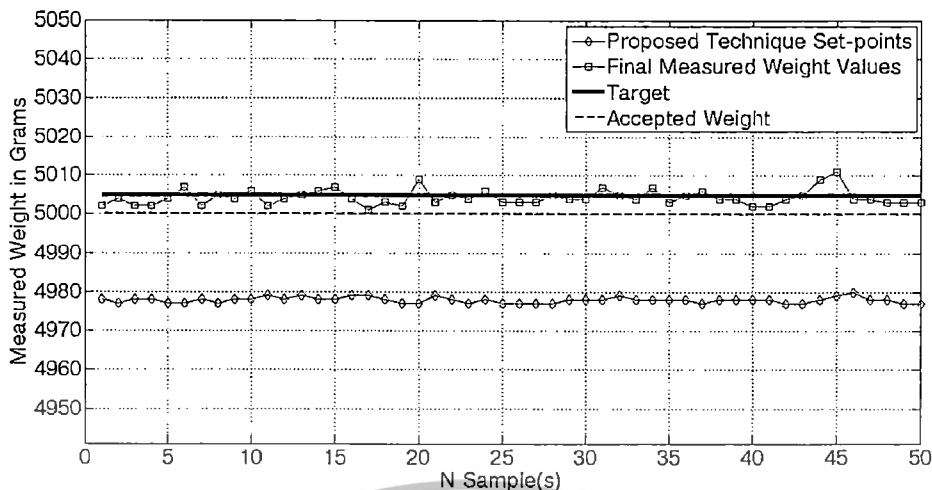
(ก) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการใหม่



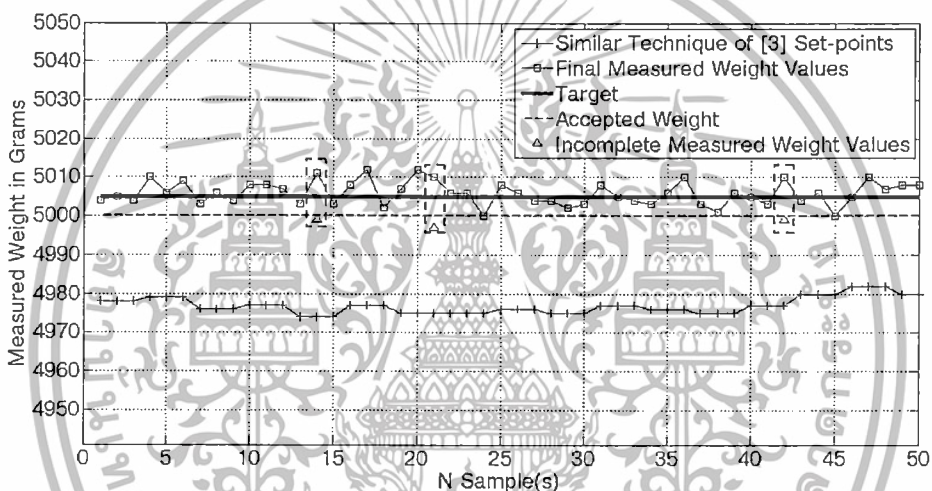
(ข) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยเทคนิคเหมือน [3]

รูปที่ 4.10 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเหมือน [3] ที่น้ำหนัก 3505 กรัม (ความชื้นปกติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการใหม่



(ข) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยเทคนิคเสมือน [3]

รูปที่ 4.11 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 5005 กรัม (ความชื้นปกติ)

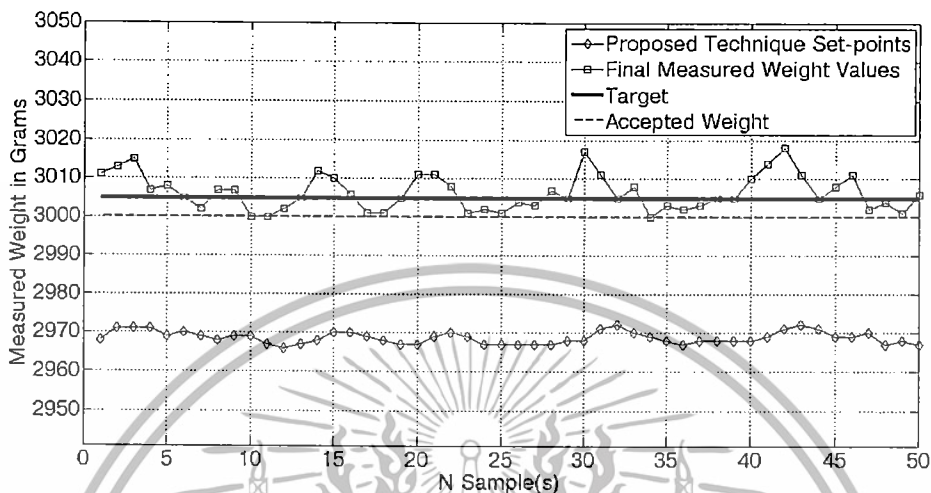
จากรูปที่ 4.9 ถึง 4.11 สัญลักษณ์รูปสี่เหลี่ยมแทนน้ำหนักสุดท้ายที่วัดได้ สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยมแทนน้ำหนักที่วัดได้เมื่อเสร็จสิ้นเวลา t_s สัญลักษณ์รูปเพชรคือเซ็ทพอยท์ที่ได้จากวิธีการใหม่ สัญลักษณ์รูปเครื่องหมายบวกคือเซ็ทพอยท์ที่ได้จากเทคนิคเสมือน [3] เส้นประคือค่าขอบเขตล่างที่รับได้ของน้ำหนักเป้าหมาย และสุดท้ายเส้นทึบคือค่าน้ำหนักเป้าหมาย

จากทดลองทั้ง 3 น้ำหนักเป้าหมายพบว่าการชดเชยค่าเซ็ทพอยท์ของเทคนิคเสมือน [3] เมื่อใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นปกติดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้เงื่อนไขการอ่านค่าน้ำหนักที่วัดได้ใหม่ แต่อย่างไรก็ดีในการปรับค่าเซ็ทพอยท์ของเทคนิคเสมือน [3] ในบางครั้งไม่สัมพันธ์กับค่าน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศ ทำให้น้ำหนักที่วัดได้เมื่อเสร็จสิ้นเวลา t_s ยังต่ำกว่าค่าที่รับได้ (กรอบเส้นประสี่เหลี่ยม) จึงต้องทำการเปิดปากลำดับที่ 3 เพื่อเติมให้น้ำหนักได้เท่ากับหรือน้ำหนักเป้าหมาย

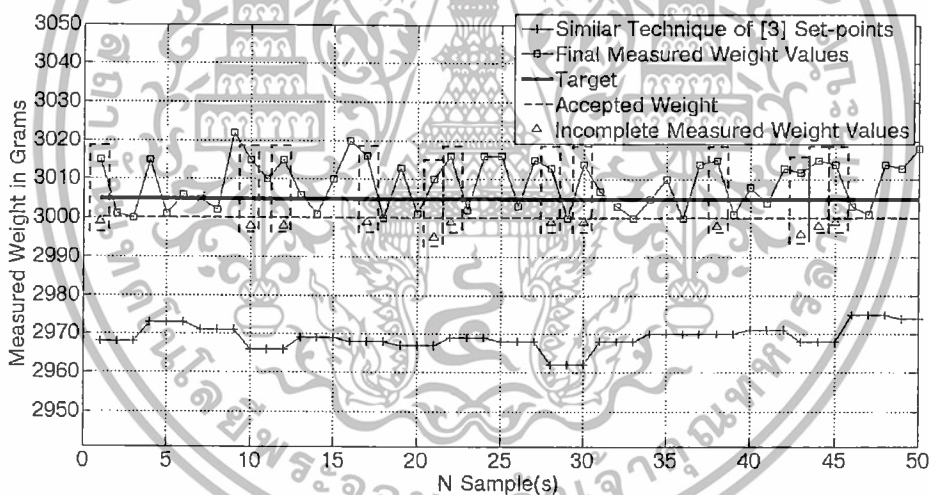
แต่สำหรับวิธีการใหม่การประมาณค่าเซ็ทพอยท์เมื่อใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นปกติในการชั่งน้ำหนัก ผลการทดลองของทั้งสามน้ำหนักเป้าหมายก็ไม่แตกต่างจากผลการทดลองที่ได้จากการใช้แบบจำลองการวัดเพียงอย่างเดียว เพราะค่าน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศเปลี่ยนแปลงไม่

เอกสารนี้ยังไม่เห็นผลเท่าไรสำหรับก่อสร้างแบบจำลองกระบวนการอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่าการณ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการทดลองการหาค่าเซ็ทพอยท์กับการชั่งน้ำหนักวัตถุที่มีความชื้นสูง
 ผลการทดลองการหาค่าเซ็ทพอยท์ของวิธีการใหม่กับเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนักเป้าหมาย
 3005 กรัม 3505 กรัม และ 5005 กรัม ถูกแสดงอยู่ในรูปที่ 4.12 ถึง 4.14 ตามลำดับ



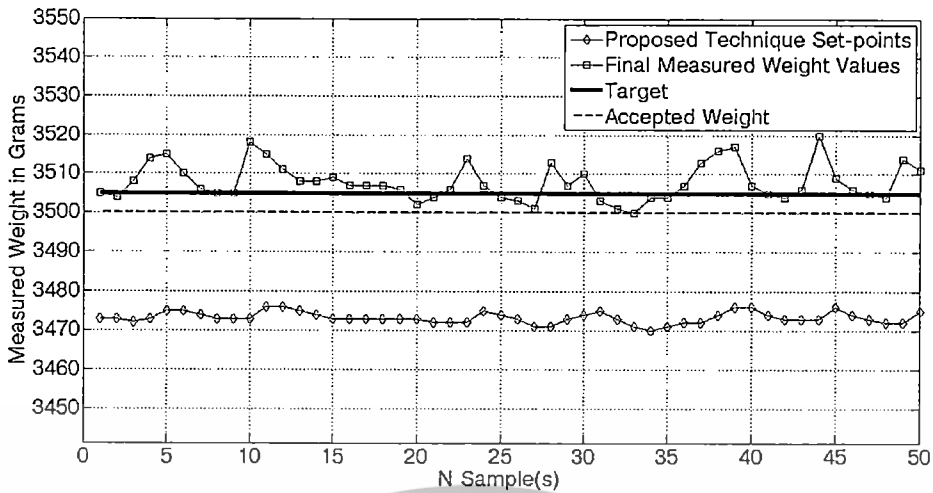
(ก) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการใหม่



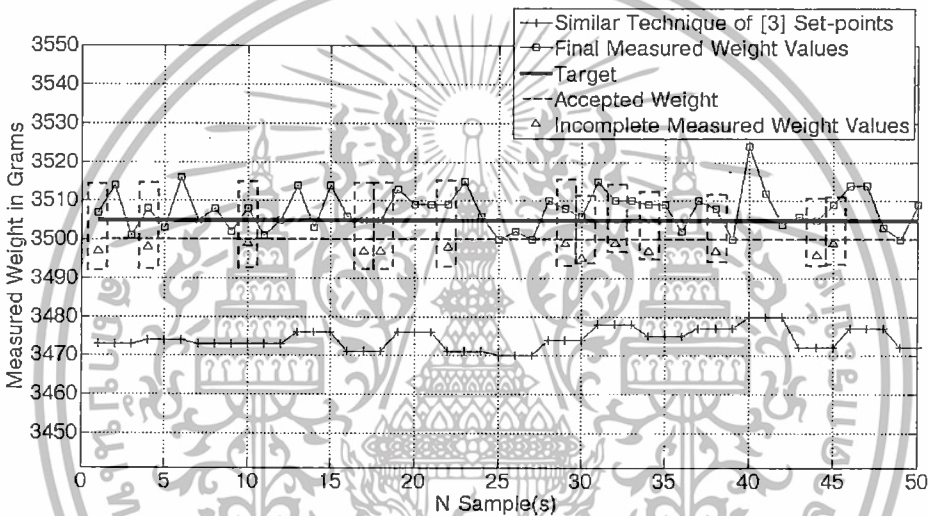
(ข) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยเทคนิคเสมือน [3]

รูปที่ 4.12 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 3005 กรัม (ความชื้นสูง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



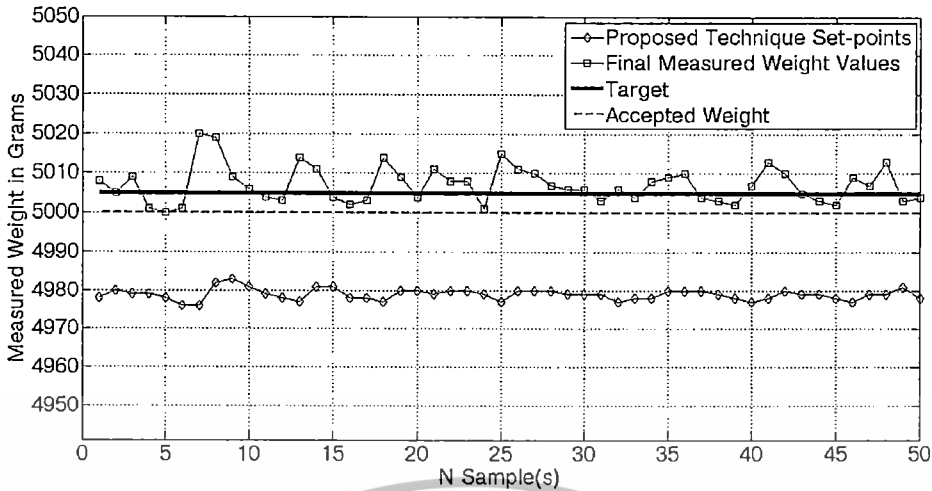
(ก) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการใหม่



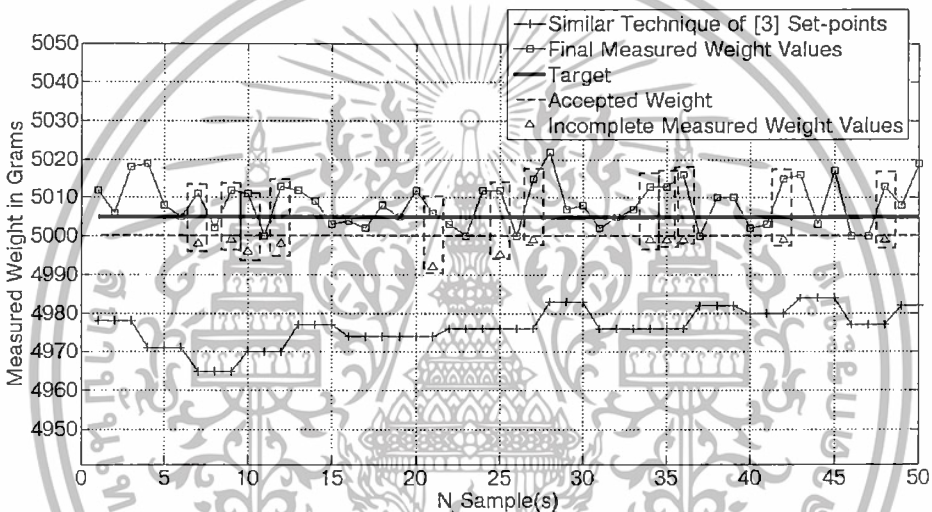
(ข) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยเทคนิคเสมือน [3]

รูปที่ 4.13 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเสมือน [3] ที่น้ำหนัก 3505 กรัม (ความชื้นสูง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยวิธีการใหม่



(ข) ผลการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ด้วยเทคนิคเหมือน [3]

รูปที่ 4.14 ค่าเซ็ทพอยท์จากวิธีการใหม่และเทคนิคเหมือน [3] ที่น้ำหนัก 5005 กรัม (ความชื้นสูง)

จากการใช้วัตถุดิบที่มีความชื้นสูงพบว่าเทคนิคเหมือน [3] ไม่สามารถปรับค่าเซ็ทพอยท์ให้สัมพันธ์กับน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศได้ทำให้ในหลายๆ ครั้งค่าน้ำหนักที่วัดได้หลังเสร็จสิ้นเวลา t_s ยังคงต่ำกว่าค่าที่รับได้ของทั้งสามน้ำหนักเป้าหมาย แต่ในทางกลับกันวิธีการใหม่ยังคงรักษาเสถียรภาพในการปรับค่าเซ็ทพอยท์ให้สอดคล้องกับน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศทั้งสามน้ำหนักเป้าหมาย ทำให้ค่าน้ำหนักที่วัดได้หลังเสร็จสิ้นเวลา t_s สูงกว่าค่าที่รับได้ ซึ่งถ้าใช้แบบจำลองการวัดมาทำการทดลองจะพบว่าค่าเซ็ทพอยท์จะถูกปรับขึ้น นั่นหมายความว่าน้ำหนักสุดท้ายที่วัดได้จะสูงมากทำให้เกิดการสูญเสีย ดังนั้นการใช้แบบจำลองกระบวนการจะเห็นผลชัดเจนเมื่อน้ำหนักวัตถุดิบที่ลอยค้างอยู่ในอากาศมีความแปรปรวนสูงแล้วมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น

4.3.3 สรุปผลการทดลองเชิงสถิติของการทดลองทั้งสอง

จากผลการทดลองที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม 3505 กรัม และ 5005 กรัม (รูปที่ 4.9 ถึง 4.14) ค่าเซ็ทพอยท์ที่ประมาณค่าได้ถูกนำมาสรุปเป็นข้อมูลทางสถิติดังแสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4 รวมทั้งนำเอาข้อมูลผลการทดลองมาวัดประสิทธิภาพด้วยเกณฑ์ต่อไปนี้ได้แก่ วัดความถูกต้องโดยใช้เอกสารเป็นเอกสารที่ส่งวันเวาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ดังแสดงในสมการที่ 3.11 วัดเวลารวมทั้งหมดที่ใช้ในการชั่งน้ำหนักทั้งหมด 50 ตัวอย่าง และวัดความถี่จำนวนการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติ (ทำแค่สองลำดับการเปิดปากปล่อยวัตถุ) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ถึง 4.7 สำหรับการทดลองกับวัตถุที่มีความขึ้นปกติ และ ตารางที่ 4.8 ถึง 4.11 สำหรับการทดลองกับวัตถุที่มีความขึ้นสูง

ตารางที่ 4.3 ค่าเซ็ทพอยท์ที่ได้จากการทดลองจริง (ความขึ้นปกติ)

เทคนิคการชดเชย	น้ำหนักเป้าหมาย	จำนวนตัวอย่างที่ทดลอง	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่วัดได้	ค่าเฉลี่ยเซ็ทพอยท์	ความแปรปรวนของเซ็ทพอยท์
	กรัม	ตัวอย่าง	กรัม	กรัม	กรัม ²
วิธีการที่นำเสนอ	3005	50	3006.1	2969	0.6102
เทคนิคเสมือน [3]		50	3006.5	2969	4.4718
วิธีการที่นำเสนอ	3505	50	3506.0	3473	0.5749
เทคนิคเสมือน [3]		50	3506.5	3473	3.1837
วิธีการที่นำเสนอ	5005	50	5004.3	4978	0.5349
เทคนิคเสมือน [3]		50	5005.9	4977	4.4657

ตารางที่ 4.4 ค่าเซ็ทพอยท์ที่ได้จากการทดลองจริง (ความขึ้นสูง)

เทคนิคการชดเชย	น้ำหนักเป้าหมาย	จำนวนตัวอย่างที่ทดลอง	ค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่วัดได้	ค่าเฉลี่ยเซ็ทพอยท์	ความแปรปรวนของเซ็ทพอยท์
	กรัม	ตัวอย่าง	กรัม	กรัม	กรัม ²
วิธีการที่นำเสนอ	3005	50	3006.4	2969	2.2596
เทคนิคเสมือน [3]		50	3009.0	2969	8.8984
วิธีการที่นำเสนอ	3505	50	3507.9	3473	2.1467
เทคนิคเสมือน [3]		50	3507.7	3474	7.4302
วิธีการที่นำเสนอ	5005	50	5007.1	4979	2.1365
เทคนิคเสมือน [3]		50	5008.6	4976	23.3914

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ความถูกต้องของน้ำหนักที่วัดได้จากการทดลอง (ความชื้นปกติ)

เทคนิคการชดเชย	น้ำหนัก เป้าหมาย	จำนวน ตัวอย่างที่ ทดลอง	ค่าเฉลี่ย น้ำหนักที่ วัดได้	ความ แปรปรวนของ น้ำหนักที่วัดได้	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด สัมบูรณ์เฉลี่ย
	กรัม	ตัวอย่าง	กรัม	กรัม ²	%
วิธีการที่นำเสนอ	3005	50	3006.1	5.3980	0.0632
เทคนิคเสมือน [3]		50	3006.5	11.0302	0.0892
วิธีการที่นำเสนอ	3505	50	3506.0	4.8555	0.0514
เทคนิคเสมือน [3]		50	3506.5	10.2127	0.0816
วิธีการที่นำเสนอ	5005	50	5004.3	4.1404	0.0344
เทคนิคเสมือน [3]		50	5005.9	8.9800	0.0500

ตารางที่ 4.6 เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการชั่งน้ำหนัก (ความชื้นปกติ)

น้ำหนัก เป้าหมาย	จำนวน ตัวอย่าง	วิธีการที่นำเสนอ	จำนวน ตัวอย่าง	เทคนิคเสมือน [3]
		เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการชั่ง (นาที)		เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการชั่ง (นาที)
3005 กรัม	50	≈ 7	50	≈ 8
3505 กรัม	50	≈ 7	50	≈ 8
5005 กรัม	50	≈ 8	50	≈ 10

ตารางที่ 4.7 ความถี่จำนวนการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติและไม่ปกติ (ความชื้นปกติ)

น้ำหนัก เป้าหมาย	จำนวน ตัวอย่าง	วิธีการที่นำเสนอ		จำนวน ตัวอย่าง	เทคนิคเสมือน [3]	
		จำนวนครั้ง ที่ชั่งปกติ	จำนวนครั้ง ที่ชั่งไม่ปกติ		จำนวนครั้ง ที่ชั่งปกติ	จำนวนครั้ง ที่ชั่งไม่ปกติ
3005 กรัม	50	50	0	50	45	5
5005 กรัม	50	50	0	50	45	5
5005 กรัม	50	50	0	50	47	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ความถูกต้องของน้ำหนักที่วัดได้จากการทดลอง (ความชื้นสูง)

เทคนิคการชดเชย	น้ำหนัก เป้าหมาย	จำนวน ตัวอย่างที่ ทดลอง	ค่าเฉลี่ย น้ำหนักที่ วัดได้	ความ แปรปรวนของ น้ำหนักที่วัดได้	ค่าเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด สัมบูรณ์เฉลี่ย
	กรัม	ตัวอย่าง	กรัม	กรัม ²	%
วิธีการที่นำเสนอ	3005	50	3006.4	21.3424	0.1231
เทคนิคเสมือน [3]		50	3009.0	42.2649	0.2150
วิธีการที่นำเสนอ	3505	50	3507.9	22.5408	0.1136
เทคนิคเสมือน [3]		50	3507.7	25.9694	0.1272
วิธีการที่นำเสนอ	5005	50	5007.1	21.2180	0.0767
เทคนิคเสมือน [3]		50	5008.6	35.3506	0.1123

ตารางที่ 4.9 เวลาที่ใช้ทั้งหมดในการชั่งน้ำหนัก (ความชื้นสูง)

น้ำหนัก เป้าหมาย	จำนวน ตัวอย่าง	วิธีการที่นำเสนอ	จำนวน ตัวอย่าง	เทคนิคเสมือน [3]
		เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการชั่ง (นาที)		เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการชั่ง (นาที)
3005 กรัม	50	≈ 7	50	≈ 12
3505 กรัม	50	≈ 7	50	≈ 10
5005 กรัม	50	≈ 8	50	≈ 12

ตารางที่ 4.10 ความถี่จำนวนการชั่งน้ำหนักที่ทำงานปกติและไม่ปกติ (ความชื้นสูง)

น้ำหนัก เป้าหมาย	จำนวน ตัวอย่าง	วิธีการที่นำเสนอ		จำนวน ตัวอย่าง	เทคนิคเสมือน [3]	
		จำนวนครั้งที่ชั่งปกติ	จำนวนครั้งที่ชั่งไม่ปกติ		จำนวนครั้งที่ชั่งปกติ	จำนวนครั้งที่ชั่งไม่ปกติ
3005 กรัม	50	50	0	50	38	12
5005 กรัม	50	50	0	50	37	13
5005 กรัม	50	50	0	50	38	12

จากข้อมูลทางสถิติในตารางที่ 4.5 ถึง 4.10 เมื่อพิจารณาตามเป้าหมายการพัฒนาเครื่องชั่งแบบเดิม จึงทำการสรุปประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการที่นำเสนอและเทคนิคเสมือน [3] ดังแสดงในตารางที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน

เทคนิคการชดเชย	น้ำหนักเป้าหมาย	เป้าหมายการพัฒนาเครื่องชั่งแบบเดิม	
		ความถูกต้องของน้ำหนักที่ชั่งได้	ความเร็วในการชั่ง
วิธีการที่นำเสนอ	3005 กรัม	✓	✓
เทคนิคเสมือน [3]		✓	X
วิธีการที่นำเสนอ	3505 กรัม	✓	✓
เทคนิคเสมือน [3]		✓	X
วิธีการที่นำเสนอ	5005 กรัม	✓	✓
เทคนิคเสมือน [3]		✓	X



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้เทคนิคใหม่สำหรับการประมาณค่าเซ็ทพอยท์ที่เหมาะสมในระบบเครื่องชั่งแบบเดิมได้ถูกนำเสนอ โดยการใช้วิธีการนี้ได้ให้แนวทางในการทำนายค่าเซ็ทพอยท์ที่เหมาะสมที่สุดที่ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman filter) โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สอดคล้องกับเป้าหมายที่ต้องการและการกำหนดค่าจำกัดความหนาแน่นแบบอ่อนที่รับได้ (Soft-Thresholding) ซึ่งวิธีการที่ได้นำเสนอนั้นไม่เพียงถูกทดสอบด้วยการจำลองการทดลอง (Simulation) เท่านั้นแต่ยังถูกนำไปทดลองจริงกับเครื่องชั่งแบบเดิมที่ใช้งานจริง (Real Experiment) จากการใช้เทคนิคที่ได้นำเสนอนั้นเป็นที่สังเกตได้ว่าการนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้นั้นเพิ่มประสิทธิภาพของเครื่องชั่งแบบเดิมในแง่ความถูกต้องที่ได้ในการชั่งน้ำหนักและรักษาเสถียรภาพความเร็วในการชั่งน้ำหนักให้คงที่ไม่ว่าวัตถุที่ได้นำมาใช้ชั่งจะมีความชื้นปกติ (น้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศไม่ค่อยเปลี่ยนแปลง) หรือความชื้นสูง (น้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศมีความแปรปรวนสูง) ก็ตามอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับวิธีการทางสถิติทั่วไป และยิ่งไปกว่านั้นแล้วผลการทดลองที่ได้จากการทดลองด้วยข้อมูลจำลองและทดลองจริงยังสนับสนุนในการนำเอาเทคนิคใหม่นี้ไปเป็นอีกหนึ่งวิธีการทางเลือกในการใช้งานจริง

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดตรงที่ปากปล่องวัตถุที่ได้นำมาใช้ชั่งนั้นถูกกำหนดให้เปิดกว้างไว้ที่ค่าใดค่าหนึ่งคงที่ตลอดการทำวิจัยนี้ นั้นหมายความว่าถ้าปรับให้เปิดปากปล่องวัตถุที่กว้างจนค่าน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศมากกว่าค่าความแปรปรวนที่เก็บค่ามาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การประมาณค่าของเทคนิคที่ได้นำเสนอนี้จะไม่ได้ให้ค่าเซ็ทพอยท์ที่เหมาะสมที่สุด แต่เครื่องชั่งแบบเดิมก็ยังทำงานได้ปกติเพราะว่ามีค่าจำกัดความหนาแน่นแบบอ่อนที่รับได้นั้นคอยกำกับค่าเซ็ทพอยท์ให้อยู่ในขอบเขต ซึ่งผลก็คือเครื่องชั่งแบบเดิมไม่สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ

ดังนั้นเพื่อให้เทคนิคที่ได้นำเสนอนั้นทำงานได้ยืดหยุ่นมากกว่านี้โดยสามารถที่จะปรับความกว้างของปากปล่องวัตถุได้อย่างอิสระ แล้วเทคนิคที่ได้นำเสนอนี้ยังสามารถทำนายค่าเซ็ทพอยท์ที่เหมาะสมได้อยู่ จำเป็นต้องเก็บค่าน้ำหนักวัตถุที่ลอยค้างอยู่ในอากาศที่ได้จากการเปิดปากปล่องที่ความกว้างต่างๆ กัน เพื่อที่จะได้นำค่านั้นๆ มาใช้เป็นส่วนหนึ่งในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่ว่าการมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องหลายๆ ตัวทำให้การสร้างความสัมพันธ์ก็จะมีมากขึ้น สำหรับการพัฒนาให้เทคนิคนี้ให้ดียิ่งขึ้นไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mettler Toledo Incorporation. **IND560 Terminal User's Guide.** Columbus. 2010.
- [2] OPTIMA packaging group GmbH. **Filling Weigher for Powders, Granulates and Grainy Products.** [Leaflet]. Winnenden. 2002.
- [3] Unipulse Corporation. **F701-C Weighing Controller Operation Manual.** Tokyo. 2012.
- [4] Araki, N. Sato, T. Kumamoto, Y. Iwai, Y. and Konishi, Y. "Design of weigh feeder control system using extremum-seeking method." **Asian Control Conf. (ASCC).** Hong Kong. Aug 2009. pp. 250–255.
- [5] Kitano, S. Sato, T. Araki, N. and Yamamoto, T. "Improvement in a performance-adaptive control system for a weigh feeder." **Proc. of SICE Annu. Conf.** Taipei. Aug 2010. pp. 150–155.
- [6] Dejun, Z. Haochen, W. and Chunmei, L. "The application of fuzzy control in high accurate automatic powder dosing system." **Electric Inform. And Control Eng. (ICEICE).** Wuhan. Apr 2011. pp. 1771–1774.
- [7] Sinchai, S. Saechia, S. Limpiti, T. Koseeyaporn, J. and Wardkein, P. "Estimating an Optimal Setpoint to Lessen Errors in Filling Weighing System Based on Kalman Filtering." **IEEE Int'l. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP).** Florence. May 2014. pp. 2189-2193.
- [8] Peebles, P.Z., Jr. **Probability, Random Variables and Random Signal Principles.** 4th Edition. New York : McGraw-Hill. 2000.
- [9] Bendat, J.S. and Piersol, A.G. **Random Data: Analysis and Measurement Procedures.** 4th Edition. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- [10] Hayes, M.H. **Statistical Digital Signal Processing and Modeling.** New Jersey : John Wiley & Sons, Inc. 1996.
- [11] Madisetti, V.K., editor. **The Digital Signal Processing Handbook.** 2nd Edition. Boca Raton : CRC Press LLC. 2010.
- [12] Kay, S.M. **Fundamentals of Statistical Signal Processing: Estimation Theory.** Vol 1. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 1993.
- [13] Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. **Digital Image Processing.** 3rd Edition. New Jersey : Pearson/Prentice-Hall. 2007.
- [14] Mathews, J.H. and Fink, K.K. **Numerical Methods Using MATLAB.** 4th Edition. New Jersey : Prentice-Hall, Inc. 2004.
- [15] Meyer, C.D. **Matrix Analysis and Applied Linear Algebra.** Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). 2000.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาค่าคาดหวัง

ในส่วนนี้จะเป็นการนำเอาผลการทดลองจริงที่ได้จากบทที่ 3 ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม และ 5005 กรัม มาแสดงการคำนวณหาค่า $E(z[n]Tg)$ และค่า $z[n]Tg$ ที่น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัมเท่านั้น เพราะการคำนวณหาค่า $E(z[n]z[n-1])$ และค่า $z[n]z[n-1]$ มีรูปแบบการคำนวณที่เหมือนกัน

จากการทดลองทำการเก็บตัวอย่างมาทั้งหมดเป้าหมายละ 200 ตัวอย่างนำเอาค่าน้ำหนักที่วัดได้มาแจกแจงความถี่ได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 การแจกแจงความถี่น้ำหนักที่วัดได้

น้ำหนักเป้าหมาย 3005 กรัม				
น้ำหนักที่วัดได้ (Y)	แจกแจง จำนวนความถี่ (f)	แปลงให้อยู่ในรูปความ น่าจะเป็น ด้วยการ นำเอา จำนวนความถี่ หารด้วย 200 (p)	นำค่าน้ำหนักที่วัด ได้มาคูณกับความ น่าจะเป็นที่คำนวณ มาได้ (p*Y)	นำค่าน้ำหนัก ที่วัดได้คูณกับ น้ำหนัก เป้าหมาย
3001	6	0.03	90.03	9018005
3002	9	0.045	135.09	9021010
3003	22	0.11	330.33	9024015
3004	26	0.13	390.52	9027020
3005	58	0.29	871.45	9030025
3006	26	0.13	390.78	9033030
3007	17	0.085	255.595	9036035
3008	17	0.085	255.68	9039040
3009	8	0.04	120.36	9042045
3010	2	0.01	30.1	9045050
3011	5	0.025	72.275	9048055
3012	2	0.01	30.12	9051060
3014	1	0.005	15.07	9057070
3020	1	0.005	15.1	9075100

การคำนวณหาค่าคาดหวังสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ ก.1

$$E(XY) = \sum xyp(x, y) \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่

X คือตัวแปรสุ่ม ซึ่งแทนด้วยน้ำหนักเป้าหมาย (Tg)

Y คือตัวแปรสุ่ม ซึ่งแทนน้ำหนักที่วัดได้ (z[n])

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ ก.1 นำค่าผลคูณค่าน้ำหนักที่วัดได้กับค่าความน่าจะเป็นบวกรวมกันแล้วคูณด้วยค่าน้ำหนักเป้าหมายได้ดังนี้

$$E(XY) = 3005*(90.03+135.09+330.33+390.52 \\ +871+45+390.78+255.595+255.68 \\ +120.36+30.1+72.275+30.12+15.07+15.1) = 9031528$$

เมื่อได้ค่าคาดหวังแล้วทำค่าให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน ด้วยการนำค่า $E(XY)$ ที่ได้ไปหารผลคูณของค่าน้ำหนักเป้าหมายกับค่าน้ำหนักที่วัดได้ดังแสดงในตารางที่ ก.2 เมื่อทำค่าให้เป็นมาตรฐานเดียวกันแล้วค่า $E(XY)$ จะเท่ากับหนึ่ง

ตารางที่ ก.2 ผลการทำค่าให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน

แจกแจงจำนวนความถี่ (f)	ผลคูณของค่าน้ำหนักเป้าหมายกับค่าน้ำหนักที่ วัดได้ หารด้วยค่า $E(XY)$
6	0.99850269
9	0.998835413
22	0.999168136
26	0.99950086
58	0.999833583
26	1.000166306
17	1.00049903
17	1.000831753
8	1.001164476
2	1.0014972
5	1.001829923
2	1.002162646
1	1.00249537
1	1.002828093
6	1.003160816
9	1.00349354
22	1.003826263
26	1.004158986
58	1.004491709
26	1.004824433

เมื่อนำค่าจากตารางที่ ก.2 ไปเขียนเป็นภาพแท่งความถี่ (Histogram) ก็จะได้ดังรูปที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล	นายศักรินทร์ สินไชย
วัน เดือน ปีเกิด	25 ธันวาคม 2528
ที่อยู่	242/86 หมู่ 17 หมู่บ้านชวนชื่นพาร์ควิลล์ แขวงศาลาธรรมสพน์ เขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร 10170
ประวัติการศึกษา	2551 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1) การประมวลสัญญาณทางสถิติ 2) ระบบและสัญญาณ 3) การเขียนโปรแกรมควบคุมเครื่องจักร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้