

สำนักงานบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ระดับการประเมินคุณภาพ

☒ ดีเยี่ยม

☐ ดีมาก

☐ ดี

☐ ปานกลาง





การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดเซลล์ฟอโตออคไซด์ความเข้มข้นสูง
ในการรวมเซลล์ฟอโตออคไซด์กับผลล้าโยสค

นราธิป สุจินดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

สำนักบริหารและพัฒนานิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร

ชื่อเรื่อง

การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดค่าฟลูออไรด์ในน้ำดื่ม
ในการรณรงค์ฟลูออไรด์กับผดุงสุขภาพ

โดย

นราธิป สุจินดา

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา

ทศพร วาญ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จาตุพงศ์ วาญ์)

วันที่ 7 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2554

กรรมการที่ปรึกษา

ดร. ชัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. ชัย ชัย)

วันที่ 7 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2554

กรรมการที่ปรึกษา

ดร. ชัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัย ชัย)

วันที่ 7 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2554

ประธานกรรมการประจำหลักสูตร

ทศพร วาญ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จาตุพงศ์ วาญ์)

วันที่ 7 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2554

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จำเริญ ยศราช)

ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษา

วันที่ 13 เดือน ต.ค. พ.ศ. 2554

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงในการรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลลำไยสด
ชื่อผู้เขียน	นายณราธิป สุจินดา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการแปรรูปผลผลิตเกษตร
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ความเข้มข้นสูงในการรม SO_2 กับผลลำไยสด ทดแทนวิธีการตรวจวัด SO_2 โดยวิธีการไทเทรตและการใช้หลอดตรวจวัดในช่วงความเข้มข้น 2,000 ถึง 20,000 ppm ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการโดยการสูมตัวอย่าง SO_2 ที่ความเข้มข้น 99% จากถังอัดความดัน เข้าไปสู่ถังผสมเพื่อทำการปรับความเข้มข้นให้อยู่ในช่วง 2,000 ถึง 20,000 ppm จากนั้นจึงสูมตัวอย่าง SO_2 จากถังผสมและปล่อยเข้าสู่หลอดทรงกระบอกปริมาตร 200 มิลลิลิตรที่ติดตั้งเซนเซอร์วัด SO_2 อยู่ภายใน คำนวณค่าความเข้มข้นของ SO_2 และแสดงผลเป็นตัวเลขในหน่วย ppm ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น PIC16F887 โดยทดสอบภาคสนามกับห้องรม SO_2 ผลลำไยสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับระดับอุตสาหกรรม และทำการสูมตัวอย่าง SO_2 ทุก 10 นาทีตลอดช่วงเวลาในการรม 60 นาที โดยนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการตอบสนองของเซนเซอร์ตรวจวัดเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของ SO_2 ที่ได้จากการไทเทรต พบว่าการตอบสนองของเซนเซอร์ตรวจวัดมีลักษณะเป็นแบบเส้นตรงในช่วงความเข้มข้น 2,000 ถึง 20,000 ppm และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2_{adj}) เท่ากับ 0.99 ความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัด ± 121 ppm หรือ ร้อยละ 0.67 ของช่วงการวัด และในการทดสอบภาคสนาม เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดกับวิธีการไทเทรตพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และมีความไม่แน่นอนในการตรวจวัดเท่ากับ $\pm 1,420$ ppm หรือร้อยละ 7.68 ของช่วงการวัด โดยอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ใช้เวลาในการตรวจวัด 5 นาที ซึ่งเร็วกว่าการตรวจวัด SO_2 ด้วยวิธีการไทเทรต 2.5 เท่า และไม่ต้องจัดเตรียมสารเคมี

Title	Development of High Concentration SO ₂ Measuring Device for SO ₂ Fumigation Process of Fresh Longan
Author	Mr. Narathip Sujinda
Degree of	Master of Engineering in Agro-Process Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Jatuphong Varith

ABSTRACT

This research aimed to develop a high-concentration SO₂ measuring device for SO₂ fumigation of fresh longan fruits as a substitute for the SO₂ measuring method by titration and use of gas detector tube in the range of 2,000 - 20,000 ppm. The study was performed in the laboratory by sampling a 99% SO₂ from pressure tank and transferring it into the buffer tank to formulate the concentration into a range of 2,000 - 20,000 ppm. Later, after SO₂ was sampled from the buffer tank, it was released into a 200 ml cylindrical tube equipped inside with SO₂ commercial sensor. By using these data, SO₂ measuring device was assembled by using PIC16F887 microcontroller to calculate the concentration of SO₂ and to display the numeric result fumigation in ppm unit. The device was field tested in a fresh longan SO₂ fumigation operated by forced-air technique at an industrial scale. SO₂ inside the fumigation room was sampled every 10 minutes at 60 - minute fumigation. Voltage from the sensor was a calibrated reference for SO₂ concentration using titration method. It was found that the response of the measuring sensor was linear in a range of 2,000 - 20,000 ppm concentrations at a decisive coefficient (R^2_{adj}) of 0.99 with error of the measurement of ± 121 ppm or equivalent to 0.67 percent of the measuring range. In the field test, comparison between read out from device and titration method were not significantly different ($p \geq 0.05$). The measuring uncertainty was $\pm 1,420$ ppm or 7.68 percent of the measuring range. The device provided rapid measurement of SO₂ concentration within 5 minutes which was approximately 2.5 times faster than the titration method with more convenience and without any chemical preparation.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ จักรพงษ์ พิมพ์พิมล ที่ปรึกษาโครงการ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการศึกษาค้นคว้าตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา อีกทั้งยังมีส่วนช่วยในการหางบประมาณมาใช้ในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขจนกระทั่งได้วิทยานิพนธ์ที่สมบูรณ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ขงยุทธ ข้ามสี่ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนวัฒน์ นิตศน์วิจิตร กรรมการที่ปรึกษา ที่คอยให้คำแนะนำ เสนอแนะข้อคิดเห็นต่าง ๆ ด้วยดีเสมอมา อีกทั้งกรุณาตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชวาลย์ ชัยชนะ ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้ข้อเสนอแนะ เพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีเนื้อหาที่สมบูรณ์ครบถ้วน เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจศึกษาต่อไปในอนาคต

ขอขอบพระคุณบริษัท ไทยองผลไม้ จำกัด ที่สนับสนุนวัตถุดิบ (ลำไยสด) สำหรับการทดลองในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้าจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร ทุกท่าน ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือให้การศึกษาลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อประหัด และคุณแม่ประทุม สุจินดา รวมทั้งญาติพี่น้องทุกคนที่อบรมสั่งสอน ชี้แนะแนวทางในการดำเนินชีวิต ตลอดจนให้การสนับสนุน อุปการะเลี้ยงดูข้าพเจ้าตลอดมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษาในครั้งนี้

นราธิป สุจินดา

ตุลาคม 2554

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(10)
สารบัญภาพ	(11)
สารบัญตารางผนวก	(13)
สารบัญภาพผนวก	(16)
สัญลักษณ์	(17)
บทที่ 1 บทนำ	1
ความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	4
ผลล่ำไยสด	4
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับล่ำไย	4
การจัดชั้นคุณภาพมาตรฐานล่ำไยสด	4
ข้อกำหนดเรื่องขนาดของล่ำไยช่อและล่ำไยผลเดี่ยว	5
ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ SO ₂	6
คุณสมบัติทั่วไปของ SO ₂	6
ระดับความเข้มข้นของ SO ₂ ที่ก่อให้เกิดอันตราย	6
การรวม SO ₂ กับผลล่ำไยสด	7
รูปแบบของการใช้ SO ₂ กับผลล่ำไยสด	7
การเผาฟังกัมมะถัน	8
การใช้ SO ₂ จากถังอัดความดัน	8
การใช้ SO ₂ จากสารประกอบซัลไฟด์ชนิดอื่น	9

ห้องรม SO ₂	10
การปล่อย SO ₂	12
ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ	16
การตรวจวัด SO ₂	18
การตรวจวัด SO ₂ โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H ₂ O ₂) เข้มข้น 3%	18
การตรวจวัด SO ₂ ในอากาศโดยใช้หลอดตรวจแก๊ส หรือ หลอดซีบอก	20
การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน	22
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
การรม SO ₂ กับผลลำไยสด	24
อุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂ โดยการปรับเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าและ กระแสไฟฟ้า	24
สรุปกรอบแนวความคิดในการทำงานวิจัย	31
สมมติฐานงานวิจัย	31
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	32
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	32
สารเคมี	32
วิธีการศึกษา	33
ศึกษาปัญหาการตรวจวัด SO ₂ ในการรม SO ₂ กับผลลำไยสด	33
ศึกษาถึงความเป็นไปได้เบื้องต้น	33
เกณฑ์ในการออกแบบ	35
การออกแบบอุปกรณ์และระบบตรวจวัด	35
การทดสอบและวิเคราะห์ความไม่แน่นอนของอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂ ระดับ ห้องปฏิบัติการ	37
การทดสอบและเก็บข้อมูลกับห้องรม SO ₂ ระดับอุตสาหกรรม	40
การวิเคราะห์ข้อมูล	40
สถานที่ดำเนินการวิจัย	41
ระยะเวลาในการวิจัย	42
แผนภูมิการดำเนินงาน	43

	หน้า
งบประมาณที่ใช้ในการวิจัย	44
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	45
ผลการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	45
หน่วยตรวจวัด SO ₂	45
หน่วยประมวลผล	46
ผลการทดสอบอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการและวิจารณ์	48
ผลการทดสอบ การเก็บข้อมูลภาคสนามและวิจารณ์	54
ผลการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด	61
ความไม่แน่นอนจากการทดลองซ้ำ	62
ความไม่แน่นอนจากใบสอบเทียบของเซนเซอร์ SO ₂	62
ความไม่แน่นอนจากความละเอียด (Resolution) ของเซนเซอร์ SO ₂	62
ความไม่แน่นอนจากกระบอกฉีดยา	63
ความไม่แน่นอนจากความต้านทานอ้างอิง	64
ความไม่แน่นอนจากพัดลมกวานอากาศ	64
ความไม่แน่นอนจากผู้วิจัย	64
ความไม่แน่นอนจากความละเอียด (Resolution) ของการไทเทรต	65
ความไม่แน่นอนรวมในการวัด	65
การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂ ทดแทนการไทเทรต	66
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุปผลการทดสอบ	68
ข้อจำกัดของการศึกษา	69
ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป	69
แนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	74
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการ	75
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂ กับห้องรม SO ₂ กับผลค่าใช้จ่าย	
สคริปต์โปรแกรม	117

ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธี Repeated measurement ด้วย โปรแกรม Statview™ v.5	123
ภาคผนวก ง การหาปริมาณ SO ₂ ตกค้างในผลลำไยสดหลังการรม โดยวิธี Modified Monier-Williams	127
ภาคผนวก จ ภาพบางส่วนจากการเก็บข้อมูลภาคสนาม	132
ภาคผนวก ฉ ประวัติผู้วิจัย	136

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า	
1	ข้อกำหนดเรื่องขนาดของลำไยข้อและลำไยผลเดี่ยว	5
2	ปริมาณ SO ₂ ที่ได้จากสารประกอบซัลไฟด์ชนิดต่าง ๆ	6
3	ปริมาตรในการสูม SO ₂ จากถังอัดความดัน	38
4	รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานของการทำวิจัย	42
5	ผลการทดสอบค่าความเข้มข้นจากทรงกระบอกปริมาตร 2,120 มิลลิลิตร	49
6	การเปรียบเทียบความเข้มข้น SO ₂ จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตในการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ	52
7	การเปรียบเทียบความเข้มข้น SO ₂ จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ในการทดสอบเบื้องต้น ครั้งที่ 1	53
8	การเปรียบเทียบความเข้มข้น SO ₂ จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ในการทดสอบเบื้องต้น ครั้งที่ 2	53
9	ระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์กับการไทเทรต	54
10	ความเข้มข้น SO ₂ จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรม 6,000 ppm	57
11	ความเข้มข้น SO ₂ จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรม 8,000 ppm	57
12	ความเข้มข้น SO ₂ จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรม 12,000 ppm	58
13	ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Repeated measurement ของอุปกรณ์ตรวจวัดในการทดสอบภาคสนาม	59
14	ปริมาณ SO ₂ ตกค้างในเปลือกและเนื้อ ตามวิธี Modified Monier-Williams	61
15	ค่าความเข้มข้น SO ₂ ที่ไม่แน่นอนจากกระบอกดูดอากาศที่ระดับความเข้มข้น SO ₂ 2,000 ถึง 20,000 ppm เมื่อมีความคลาดเคลื่อนไป ±0.2 มิลลิลิตร	63
16	ค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งความไม่แน่นอนในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด	65
17	การเปรียบเทียบต้นทุนระหว่างการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂ กับการไทเทรต	67

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 การใช้ SO_2 จากถังอัดความดัน	9
2 ตัวอย่างแผนผังสถานประกอบการรวม SO_2 ผลลัพธ์ที่ได้มาตรฐาน	11
3 การจัดเรียงตะกร้าลำไยในการรวม SO_2 ในห้องขนาดเล็ก	13
4 ตำแหน่งการติดตั้งส่วนประกอบภายในห้องรวม และลักษณะการหมุนเวียนอากาศ	14
5 ตัวอย่างหัวดูด SO_2 รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	15
6 หัวกระจายแก๊สรูปพัด	15
7 ตำแหน่งพัดลมดูดอากาศพร้อมฝาชีครอบตะกร้าบรรจุผลลำไยของระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่งและแนวนอน	17
8 ภาพจำลองด้านหน้าของห้องรวม SO_2 ที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่งและแนวนอน	17
9 ภาพจำลองด้านหลังของห้องรวม SO_2 ที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่งและแนวนอน	18
10 ปืน และ Detector tube	20
11 การหักปลายทั้งสองข้างของ Detector tube	20
12 การเสียบปลาย Detector tube ที่หักแล้วเข้ากับตัวปืน	21
13 การดูด SO_2 ผ่าน Detector tube	21
14 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าจากหัวตรวจวัดกับ SO_2	25
15 การตอบสนองของหัวตรวจวัด SO_2 เพิ่มขึ้น 30 ppm เวลา 8 ชั่วโมง และ 50 นาที	25
16 ค่าความเข้มข้น SO_2 ช่วง 20 – 250 ppm เปรียบเทียบกับการตอบสนองของกระแสไฟฟ้า	26
17 ความเข้มข้น SO_2 ช่วง 1 ถึง 1,000 ppm ที่อุณหภูมิ 600 °C เปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้า	26
18 อุปกรณ์วัดความเข้มข้นของ NO_2 CO O_2 และ SO_2	27
19 ค่าตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของ SO_2 ในช่วงความเข้มข้น 5 ถึง 500 ppm	28
20 หัวตรวจวัดต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน	28
21 ระบบตรวจวัด SO_2	29

ภาพ		หน้า
22	ตำแหน่งการติดตั้งและใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂ และ O ₂ ในท่อไอเสีย	29
23	การตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂ ที่ช่วงความเข้มข้น 18 ถึง 10,000 ppm อุณหภูมิ 650 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส	30
24	ระบบวิเคราะห์ SO ₂ แบบต่อเนื่อง	30
25	อุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂ ยี่ห้อ Bacharach รุ่น PCA 2	33
26	หัวตรวจวัด SO ₂ ยี่ห้อ Alphasense รุ่น SO2-AE	34
27	Transmitter board สำหรับหัวตรวจวัด SO ₂ รุ่น SO2-AE	34
28	หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	35
29	Schematic diagram สำหรับหน่วยประมวลผลของอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	36
30	การออกแบบระบบตรวจวัด SO ₂	37
31	ชุดทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	38
32	ห้องรม SO ₂ ที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งระดับอุตสาหกรรม	40
33	แผนผังการดำเนินงาน	43
34	การติดตั้งเซนเซอร์ SO ₂ และพัดลมไล่อากาศในกระบอกตรวจวัด	45
35	องค์ประกอบภายนอกของอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	46
36	หน่วยประมวลผลของอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	46
37	ลักษณะภายนอกของหน่วยประมวลผลอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	47
38	การเชื่อมต่อระหว่างกระบอกตรวจวัด SO ₂ และหน่วยประมวลผล	47
39	ถังผสมทรงกระบอกปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร	48
40	การตอบสนองของหน่วยตรวจวัด SO ₂	50
41	การตอบสนองของหน่วยตรวจวัด SO ₂ เปรียบเทียบกับความเข้มข้น SO ₂ ด้วยวิธี ไทเทรต	51
42	การเก็บข้อมูลภาคสนามกับห้องรม SO ₂ กับผลล้าไยสระดับอุตสาหกรรม	55
43	ขั้นตอนการทำงานและการประมวลผลของอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	56
44	แนวโน้มของการตรวจวัดความเข้ม SO ₂ ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดเปรียบเทียบกับ การไทเทรต	60

สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวก	หน้า
1 ค่าความเข้มข้นที่ปรับได้จากการสู่ม SO_2 จากถังอัดความดันใน ทรงกระบอกปริมาตร 2,000 มิลลิตร	76
2 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 2,000 ppm ครั้งที่ 1	77
3 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 2,000 ppm ครั้งที่ 2	78
4 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 2,000 ppm ครั้งที่ 3	79
5 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 2,000 ppm	80
6 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 4,000 ppm ครั้งที่ 1	81
7 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 4,000 ppm ครั้งที่ 2	82
8 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 4,000 ppm ครั้งที่ 3	83
9 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 4,000 ppm	84
10 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 6,000 ppm ครั้งที่ 1	85
11 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 6,000 ppm ครั้งที่ 2	86
12 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 6,000 ppm ครั้งที่ 3	87
13 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 6,000 ppm	88
14 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 8,000 ppm ครั้งที่ 1	89
15 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 8,000 ppm ครั้งที่ 2	90
16 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 8,000 ppm ครั้งที่ 3	91
17 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 8,000 ppm	92
18 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 10,000 ppm ครั้งที่ 1	93
19 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 10,000 ppm ครั้งที่ 2	94
20 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 10,000 ppm ครั้งที่ 3	95
21 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 10,000 ppm	96
22 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 12,000 ppm ครั้งที่ 1	97
23 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 12,000 ppm ครั้งที่ 2	98
24 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 12,000 ppm ครั้งที่ 3	99
25 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 12,000 ppm	100

ตารางผนวก

หน้า

48	ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาทีที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm ครั้งที่ 1	121
49	ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาทีที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm ครั้งที่ 2	122
50	ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาทีที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm ครั้งที่ 3	122

สารบัญภาพผนวก

ภาพผนวก		หน้า
1	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 2,000 ppm	80
2	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 4,000 ppm	84
3	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 6,000 ppm	88
4	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 8,000 ppm	92
5	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 10,000 ppm	96
6	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 12,000 ppm	100
7	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 14,000 ppm	104
8	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 16,000 ppm	108
9	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 18,000 ppm	112
10	ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 20,000 ppm	116
11	การกรอกข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตาม	124
12	การเข้าคำสั่งในการแสดงตาราง ANOVA	124
13	การเลือกตัวแปรต้นและตัวแปรตามเข้าในคำสั่ง	125
14	การเข้าคำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures	125
15	ผลการวิเคราะห์โดยใช้คำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures	125
16	การเข้าคำสั่งในการแสดงกราฟ โดยใช้คำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures	126
17	ผลการวิเคราะห์โดยใช้คำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures โดยแสดงผลในรูปของกราฟ	126
18	ชุดเครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ SO ₂ ที่ตกค้างในเนื้อและในเปลือกลำไย	129
19	ลำไยสดในห้องรม SO ₂ กับผลลำไยสดระดับอุตสาหกรรม	133
20	ลำไยสดก่อนเข้าห้องรมในโรงงานรม SO ₂ กับผลลำไยสดระดับอุตสาหกรรม	133
21	หอกำจัด SO ₂ จากห้องรม SO ₂ ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ	134
22	ชุดอุปกรณ์ไทเทรต จากการสุ่ม SO ₂ จากห้องรม	134
23	ถังอัดความดันบรรจุ SO ₂ ความบริสุทธิ์ 99%	135
24	ชุดอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂ ในการเก็บข้อมูลภาคสนาม	135

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
d	ค่าความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตรวจวัดภายในระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวมต่างๆ	ไร้หน่วย
e	ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง	ไร้หน่วย
$mg\ SO_2$	มิลลิกรัมของ SO_2	มิลลิกรัม
n	จำนวนครั้งในการวัด	ไร้หน่วย
N	ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	นอร์มัล
$ppm\ SO_2$	ปริมาณความเข้มข้น SO_2	ppm
P	ระดับนัยสำคัญที่น้อยที่สุดที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก	ไร้หน่วย
R'	ค่าสัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ	ไร้หน่วย
U_A	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดประเภท A	ไร้หน่วย
U_B	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดประเภท B	ไร้หน่วย
U_C	ค่าความไม่แน่นอนรวม	ไร้หน่วย
U_{ex}	ค่าความไม่แน่นอนประมาณ	ไร้หน่วย
$U_{95\%}$	ค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95%	ไร้หน่วย
V	ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์	มิลลิลิตร

กรีก โรมัน

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
μ	ค่าเฉลี่ยโดยรวม	ไร้หน่วย
σ	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ไร้หน่วย
α	อิทธิพลจากระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม	ไร้หน่วย
β	อิทธิพลจากปัจจัยของวิธีการตรวจวัด	ไร้หน่วย
γ	อิทธิพลจากการทดลองซ้ำ	ไร้หน่วย
κ	อิทธิพลจากปัจจัยเวลา	ไร้หน่วย
$\kappa\alpha$	อิทธิพลร่วมระหว่างระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวมกับเวลา	ไร้หน่วย
$\kappa\beta$	อิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับวิธีการตรวจวัด	ไร้หน่วย
$\kappa\gamma$	อิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับการทดลองซ้ำ	ไร้หน่วย

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ลำไยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของจังหวัดเชียงใหม่ และลำพูน มีแนวโน้มในการขยายพื้นที่ปลูกออกไปในอีกหลายจังหวัดทั่วประเทศไทย เนื่องจากลำไยเป็นไม้ผลเขตร้อน มีคู่แข่งทางการตลาดน้อย มีการบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั้งในและต่างประเทศ และมูลค่าการส่งออกลำไยสดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี โดยเฉพาะในช่วงเดือนกรกฎาคมและเดือนสิงหาคม ซึ่งเป็นช่วงที่มีผลผลิตลำไยสดออกสู่ตลาดเป็นจำนวนมากที่สุด โดยมีการส่งออกในปี พ.ศ. 2552 ถึง 240,032 ตัน คิดเป็นมูลค่า 3,646 ล้านบาท ซึ่งมากกว่าปี พ.ศ. 2551 ถึง 70,000 ตัน หรือเป็นมูลค่า 1,000 ล้านบาท และในปี พ.ศ. 2553 ก็มีแนวโน้มที่จะมีการส่งออกเพิ่มมากขึ้น (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2553ก) การส่งออกลำไยสด มีกระบวนการหลังการเก็บเกี่ยวที่สำคัญ คือ การรมผลลำไยสดด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ซึ่ง SO_2 มีส่วนช่วยในการยืดอายุการเก็บรักษา โดย Han *et al.* (2001) พบว่า SO_2 ช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีของเปลือกได้ และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลลำไยสดได้นานขึ้นเมื่อเทียบกับผลลำไยที่ไม่ผ่านการรม SO_2 การรม SO_2 นั้น เป็นกระบวนการที่ปฏิบัติโดยผู้ประกอบการ หรือผู้รวบรวมผลผลิตผลจากเกษตรกรเพื่อทำการกระจายผลผลิตในลำดับต่อไป ในกระบวนการจะใช้ปริมาณความเข้มข้นของ SO_2 และระยะเวลาที่ใช้รมแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับผู้ประกอบการ เมื่อใกล้สิ้นสุดการรมจะมีการตรวจวัดปริมาณ SO_2 ในอากาศภายในห้องรม SO_2 กับผลลำไยสดให้ได้ตามความต้องการ คือ ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 2,000 ถึง 20,000 ppm

การตรวจวัด SO_2 นิยมใช้สองวิธี คือ การใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้มข้น 3% เป็นตัวดักจับ SO_2 และการใช้หลอดตรวจก๊าซ หรือหลอดซีบอก (Gas Detector Tube) (มานัส, 2545) ซึ่งวิธีการแรก มีความถูกต้องสูง แต่มีขั้นตอนยุ่งยาก ส่วนวิธีที่สอง สะดวกรวดเร็ว แต่ค่าที่ได้เป็นการประมาณ เครื่องมือมีอายุการใช้งานสั้น ทำให้เป็นการสิ้นเปลือง นอกจากนี้เครื่องมือที่ใช้ตรวจวัด SO_2 ในช่วงความเข้มข้นสูงถึง 20,000 ppm ในรูปแบบอื่น มีราคาสูง และมีระดับการวัดสูงสุดไม่เกิน 5,000 ppm เช่น อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 Bacharach PCA 2 Gas Combustion Analyzer มีราคาไม่ต่ำกว่า 100,000 บาท (Professional equipment, 2009)

จากการวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณ SO_2 โดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่ให้ค่าตอบสนองในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของ SO_2 ดังงานวิจัยของ Syu and Liu (1998) ใช้ระบบตรวจจับสัญญาณไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัด

พบว่าการตอบสนองเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ SO_2 เพิ่มขึ้น โดยมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบเส้นตรง และ Marzouk (2009) ยังได้พัฒนาระบบวิเคราะห์ SO_2 แบบต่อเนื่อง โดยมีการสู่มตัวอย่าง SO_2 เข้ามาในระบบจนไปถึงอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งมีการตอบสนองเป็นแรงดันไฟฟ้า ไมโครคอนโทรลเลอร์ตรวจจับแรงดันไฟฟ้าที่ได้ เปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแบบดิจิตอลและส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้กับความเข้มข้นของ SO_2 ซึ่งระบบนี้สามารถวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ได้อย่างต่อเนื่อง และมีการแสดงผลแบบเวลาจริงผ่านคอมพิวเตอร์ ทั้งสองงานวิจัยที่ได้กล่าวมา สามารถตรวจวัดความเข้มข้น SO_2 ได้ในช่วงไม่เกิน 0 ถึง 1,000 ppm เท่านั้น

การตรวจวัด SO_2 ดังที่ได้กล่าวมา พบว่ามีความยุ่งยาก และสิ้นเปลือง อีกทั้งอุปกรณ์ที่มีการพัฒนามาแล้วนั้นในช่วงการวัดที่ไม่เหมาะสมในกระบวนการรม SO_2 กับผลล้าไยสด งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 มีประสิทธิภาพสูงสุดแบบพกพา โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมองกลฝังตัว (Embedded system) ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดที่ให้ค่าตอบสนองในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของ SO_2 ประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ และแสดงผลค่าความเข้มข้นเป็นตัวเลขในหน่วย ppm เพื่อใช้ทดแทนการวิเคราะห์ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3% และการใช้หลอดตรวจวัด ในกระบวนการรม SO_2 กับผลล้าไยสดในช่วง 2,000 ถึง 20,000 ppm ที่มีราคาถูก ลดต้นทุน ลดขั้นตอน และสะดวกสำหรับการตรวจวัด SO_2 ในการรม SO_2 กับผลล้าไยสด เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรมและเพิ่มโอกาสทางธุรกิจให้แก่ผู้ประกอบการมากขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ที่ระดับความเข้มข้นสูง เพื่อตรวจวัดปริมาณความเข้มข้นของ SO_2 ในอากาศที่ความเข้มข้นสูงในช่วง 2,000 ถึง 20,000 ppm ให้เหมาะสมกับกระบวนการรม SO_2 กับผลล้าไยสด โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสมองกลฝังตัว โดยมีวัตถุประสงค์ย่อยดังนี้

1. เพื่อให้เกิดความรวดเร็วในการตรวจวัด SO_2
2. เพื่อตรวจวัด SO_2 ในช่วงความเข้มข้นสูง
3. เพื่อทดแทนการใช้หลอดตรวจก๊าซ หรือหลอดซี่บ็อก

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ต้นแบบระบบตรวจวัด SO_2 ในระดับความเข้มข้นสูงที่ผลิตในประเทศไทย ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ
2. ได้พัฒนาองค์ความรู้ด้าน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางการเกษตร ด้วยระบบสมองกลฝังตัวของประเทศไทย
3. ผู้ประกอบการสามารถใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ในอากาศ ระหว่างการรม SO_2 กับผลลำไยสด ช่วยลดการตกค้างของ SO_2 ที่เกินขนาดมาตรฐาน

ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 โดยใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองจาก เซนเซอร์ SO_2 เปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของ SO_2 ในอากาศ เพื่อใช้ทดแทนการวิเคราะห์ด้วย สารละลายไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ 3% และการใช้หลอดตรวจวัด ในกระบวนการรม SO_2 กับผล ลำไยสดพันธุ์ดอ ขนาด 1 และ 2 โดยใช้ SO_2 ที่ปล่อยจากถังอัดความดัน ในช่วงความเข้มข้น 2,000 ถึง 20,000 ppm กับห้องรม SO_2 ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ ขนาด กว้าง 3 เมตร ยาว 3 เมตร สูง 2.5 เมตร

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ผลลำไยสด

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับลำไย

ลำไยเป็นไม้ผลที่เพาะปลูกกันมากในประเทศไทย โดยมีพันธุ์ที่เพาะปลูกอยู่มากกว่า 20 พันธุ์ แต่ที่นิยมเพาะปลูกกันมากที่สุดได้แก่ พันธุ์ดอหรืออีดอ พันธุ์ชมพูหรือสีชมพู พันธุ์เหวหรืออีเหว พันธุ์เปี้ยวเขียวหรืออีเปี้ยวเขียว และพันธุ์แดงหรืออีแดงกลม เป็นต้น (พาวันและวินัย, 2543) พบมากในจังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย ลำพูน และลำปาง เก็บเกี่ยวผลผลิตในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน โดยพันธุ์ที่นิยมปลูกเป็นการค้าและมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ คือพันธุ์ดอหรืออีดอ ซึ่งออกดอกและติดผลได้เร็วกว่าพันธุ์อื่น ให้ผลผลิตอย่างสม่ำเสมอ ลักษณะผลค่อนข้างกลม กว้าง 2.8 เซนติเมตร หนา 2.5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร สีน้ำตาลอ่อน บำผลยกข้างเดียว รสหวาน จำนวนผลผลิตโดยเฉลี่ย 85-94 ผลต่อกิโลกรัม นิยมบริโภคทั้งแบบผลสดและแปรรูป (สุพาพัฒน์, ม.ป.ป.)

ลำไยพันธุ์ดอ แบ่งได้เป็น 2 ชนิดตามสีของยอดอ่อน ได้แก่ คอยอดแดง ใบอ่อนจะมีสีออกแดง เจริญเติบโตเร็วกว่าคอยอดเขียว แต่ไม่ค่อยนิยมปลูกเนื่องจากออกดอก ติดผลได้ยาก และมีการหลุดร่วงมากหากเก็บเกี่ยวไม่ทัน ส่วนอีกชนิด คือ คอยอดเขียว มีลักษณะโดยทั่วไปคล้ายคอยอดแดง มีใบอ่อนเป็นสีเขียว คอยอดเขียวยังแบ่งออกตามลักษณะก้านช่อผลได้อีก 2 ชนิด คือ คอก้านอ่อน และคอก้านแข็ง ซึ่งคอก้านแข็งเป็นพันธุ์ที่นิยมปลูกมากที่สุด เนื่องจากมีเปลือกหนา เนื้อหนาสีขาวขุ่นมีรสหวาน เมล็ดขนาดปานกลาง ขนาดผลใหญ่ เบี้ยวยกข้างเดียว ผิวสีน้ำตาล (พิทยาและพาวัน, 2545)

การจัดชั้นคุณภาพมาตรฐานลำไยสด

ประเทศไทยเป็นผู้ผลิตและส่งออกที่สำคัญของโลก ดังนั้นเพื่อให้ลำไยของไทยเป็นที่ยอมรับในระดับชาติและระดับสากล เป็นการส่งเสริมการส่งออก และเพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค จึงมีการจัดทำมาตรฐานลำไยขึ้น (สำนักงานมาตรฐานสินค้าและเกษตรแห่งชาติ, 2546) โดยได้กำหนดลักษณะคุณภาพขั้นต่ำของผลลำไย ให้มีลักษณะเป็นผลสมบูรณ์ขยายตัวเต็มที่ ไม่เน่าเสีย ไม่ช้ำ ไม่มีตำหนิที่เห็นเด่นชัด ปลอดภัยจากศัตรูพืช ผิวเปลือกเกลี้ยง สีเปลือกและเนื้ออาจแตกต่างกัน

กันไปตามพันธุ์และแหล่งปลูก สปีเลือกอาจจะเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อย ในกรณีที่มีการรมด้วย SO_2 และนอกจากคุณภาพขั้นต่ำที่ได้กล่าวมา ยังได้มีการจัดแบ่งชั้นมาตรฐานของคุณภาพของลำไยเป็น 3 ชั้นคุณภาพ ดังนี้

1. ชั้นพิเศษ (“Extra” class) ผลลำไยในชั้นนี้มีคุณภาพที่ดีที่สุด ตรงตามพันธุ์ สีของเปลือกสม่ำเสมอ ไม่มีตำหนิ ขกเว้นตำหนิผิวเล็กน้อย โดยไม่มีผลต่อรูปลักษณะทั่วไปของลำไย และคุณภาพ
2. ชั้นหนึ่ง (Class I) ผลลำไยในชั้นนี้มีคุณภาพที่ดี ตรงตามพันธุ์ สีของเปลือกสม่ำเสมอ มีตำหนิได้เล็กน้อย พื้นที่ผิวตำหนิรวมต่อผลไม่เกิน 0.5 ตารางเซนติเมตร โดยไม่มีผลต่อรูปลักษณะทั่วไปของลำไย และคุณภาพ
3. ชั้นสอง (Class II) ผลลำไยในชั้นนี้มีคุณภาพไม่เข้าชั้น ชั้นพิเศษ และ ชั้นหนึ่ง แต่ยังคงเป็นผลสมบูรณ์ มีลักษณะคุณภาพที่ดีไม่เน่าเสีย ไม่ช้ำ พื้นที่ผิวตำหนิรวมต่อผลไม่เกิน 0.5 ตารางเซนติเมตร โดยไม่มีผลต่อรูปลักษณะทั่วไปของลำไย และคุณภาพ

ข้อกำหนดเรื่องขนาดของลำไยช่อและลำไยผลเดี่ยว

ขนาดของผลลำไยถือว่าเป็นมาตรฐานที่มีความสำคัญในการกำหนดราคาซื้อ-ขาย ของอุตสาหกรรมกรรม SO_2 เพื่อการส่งออก ซึ่งพิจารณาจากจำนวนผลต่อกิโลกรัม หรือเส้นผ่านศูนย์กลางของผลลำไย ซึ่งทำการกำหนดขนาดไว้ 6 ขนาด (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2546) แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 ข้อกำหนดเรื่องขนาดของลำไยช่อและลำไยผลเดี่ยว

รหัสขนาด	จำนวนผลต่อกิโลกรัม		เส้นผ่านศูนย์กลางผล (มิลลิเมตร)
	ลำไยช่อ	ลำไยผลเดี่ยว (ตัดเหลือขั้ว)	
1	< 85	< 95	> 28
2	85-94	91-100	> 27-28
3	95-104	101-111	> 26-27
4	105-114	112-122	> 25-26
5	≥ 115	≥ 123	> 24-25
6	-	-	22-24

ที่มา: สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (2546)

ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ SO_2

คุณสมบัติโดยทั่วไปของ SO_2

SO_2 เป็นวัตถุเจือปนอาหารหรือสารเจือปนอาหารชนิดหนึ่ง มีสูตรทางเคมี คือ SO_2 มีสถานะเป็นแก๊ส ไม่ติดไฟ ไม่มีสี กลิ่นฉุน SO_2 จัดอยู่ในสารกลุ่มซัลไฟด์ มีคุณสมบัติเป็นสารรีดิวซ์ที่จะไปลดค่าแรงดึงของออกซิเจน ในเนื้อเยื่ออาหารลงในระดับที่ต่ำสุด ที่จุลินทรีย์ต้องการออกซิเจนในการเจริญเติบโต หรือ เมื่อ SO_2 ทำปฏิกิริยากับน้ำ เกิดเป็นกรดซัลฟูริกและแตกตัวเป็นไอออนต่างๆ กรดจะซึมผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ เข้าไปรบกวนการทำงานของเซลล์ต่างๆ (สวรินทร์, 2548) SO_2 ที่นิยมนำมาใช้ได้มาจากการเผาฟอสฟอรัส (Sulfur, S) นอกจากนี้ SO_2 ยังได้มาจากสารประกอบซัลไฟด์หลายชนิด เมื่อแตกตัวสามารถปลดปล่อย SO_2 ออกมาในปริมาณแตกต่างกัน แสดงได้ดังตาราง 2

ตาราง 2 ปริมาณ SO_2 ที่ได้จากสารประกอบซัลไฟด์ชนิดต่างๆ

ชื่อสารประกอบ	ปริมาณ SO_2 (เปอร์เซ็นต์)
โพแทสเซียมซัลไฟด์	33.0
โซเดียมซัลไฟด์	50.8
โพแทสเซียมไบซัลไฟด์	53.3
โซเดียมไบซัลไฟด์	61.6
โพแทสเซียมเมตาไบซัลไฟด์	67.4
โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์	57.4

ที่มา: รัตน (2535)

ระดับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ก่อให้เกิดอันตราย

SO_2 มีฤทธิ์เป็นกรด สามารถกัดกร่อนและเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้ โดยปริมาณความเข้มข้นของ SO_2 เพียง 4 ppm สามารถทำให้เกิดกลิ่นได้ ถ้ามี SO_2 20 ppm จะทำให้เกิดอาการระคายเคืองหรือถ้าภายในบรรยากาศมี SO_2 เข้มข้น 20 ppm และได้รับเกินกว่า 1 นาที ทำให้ตา เชื้อจมูก และคอหอย เป็นอันตรายได้ และถ้าภายในบรรยากาศมี SO_2 เข้มข้น 500 ppm จะเป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ได้ ถ้าสูดดมนานกว่า 30 – 60 นาที และถ้ามีความ

เข้มข้นของ SO_2 มากกว่า 1,000 – 2,000 ppm หรือร้อยละ 0.1- 0.2 ในบรรยากาศ จะทำให้เสียชีวิตได้ (ณัฐพงศ์ และคณะ, 2545)

การรม SO_2 กับผลลำไยสด

ลำไยเป็นผลไม้ที่มีอายุการเก็บรักษาสั้น และยังมีการเสื่อมคุณภาพ หรือการเน่าเสียได้ง่าย เนื่องจากส่วนมากจะมีการเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนกันยายน ซึ่งช่วงเวลาดังกล่าวเป็นฤดูฝน มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ทำให้ผลลำไยสดที่ทำการขนส่งไปยังต่างประเทศ หรือตลาดปลายทางเกิดความเสียหายอย่างมาก ดังนั้นการรม SO_2 กับผลลำไยสด จึงเข้ามามีบทบาทในการช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลลำไยสดเพื่อการส่งออก SO_2 มีส่วนช่วยในการควบคุมการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลของอาหารและยังมีคุณสมบัติในการฟอกสี ทำให้เปลือกของลำไยดูสดสวย (สถาบันอาหาร, 2541)

การนำ SO_2 มาใช้ในการรมกับผลลำไยสดเพื่อช่วยยืดอายุการเก็บรักษาผลลำไยสดสำหรับการส่งออก ต้องคำนึงถึงปริมาณ SO_2 ที่ตกค้างในผลลำไยสด โดยจะต้องไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด ซึ่งคณะกรรมการอาหารระหว่างประเทศหรือ Codex กำหนดให้มี ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อได้ไม่เกิน 10 ppm (สถาบันอาหาร, 2541) ซึ่ง ธีรบุษ และคณะ (2548) ได้ศึกษา สถานการณ์ของปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยของจังหวัดเชียงใหม่และลำพูน พบว่า มีการตกค้างของ SO_2 ในผลลำไยสด มากถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างที่เก็บมาทั้งหมด โดยพบการตกค้างในเปลือกเกินกว่า 1,700 ppm และยังมีการตกค้างในเนื้อถึง 10 ppm ก่อให้เกิดปัญหาการกีดกันทางการค้าจากประเทศคู่ค้า ส่งผลให้การส่งออกผลลำไยสดไปยังต่างประเทศยากขึ้นกว่าเดิม ดังนั้น แนวทางหนึ่งที่จะช่วยควบคุมไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าว จึงจำเป็นต้องมีการสร้างมาตรฐานในการปฏิบัติการรม SO_2 ให้ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด

รูปแบบของการใช้ SO_2 กับผลลำไยสด

การใช้ SO_2 ผลลำไยสดในเชิงพาณิชย์นั้นมีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบต่างมีลักษณะการใช้งานแตกต่างกัน การจะเลือกใช้รูปแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานหรือระยะเวลาในการเก็บรักษาผลผลิต ซึ่งรูปแบบของ SO_2 ที่ใช้โดยทั่วๆ ไปแล้วมีอยู่ 3 ลักษณะ คือ การเผาผงกำมะถัน (Sulfur, S) การใช้ SO_2 โดยตรงจากถังอัดความดัน และการใช้สารประกอบเกลือซัลไฟต์ซึ่งแตกตัวให้ SO_2

การเผากำมะถัน

จักรพงษ์ (2542) รายงานว่า การใช้ SO_2 รูปแบบนี้เป็นวิธีที่ง่ายและมีราคาถูก ซึ่งสามารถทำได้โดยการเผาผงกำมะถัน จากการคำนวณโดยใช้ปฏิกิริยาทางเคมีนั้นพบว่า เมื่อทำการเผาผงกำมะถัน 1 กรัม จะได้ SO_2 2 กรัม ซึ่งเทียบเท่ากับ 764 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังสมการ 1



อัตราการเผาไหม้ของกำมะถันขึ้นอยู่กับความร้อนที่ใช้ในการเผา ความบริสุทธิ์ของผงกำมะถันที่ใช้เผา และการหมุนเวียนของอากาศ โดยผงกำมะถันจะหลอมละลายและติดไฟเมื่อมีปริมาณที่มากกว่า 1 กิโลกรัม ภายในระยะเวลาที่จำกัดมักจะเผาไหม้ไม่หมด ดังนั้นการเผาผงกำมะถันเพื่อใช้เป็นแหล่ง SO_2 ส่วนใหญ่แล้วจึงเป็นการใช้ในปริมาณน้อย ซึ่งทำให้การเผาไหม้ได้ง่ายและมีการเติมผงโซเดียมไนเตรท (Sodium nitrate, NaNO_3) ลงไปประมาณร้อยละ 1 – 2 เพื่อเร่งปฏิกิริยาการเผาไหม้ นอกจากนี้ภาชนะที่ใช้ในการเผาไหม้ยังเป็นปัจจัยสำคัญอีกประการหนึ่งที่จะช่วยในการเผาไหม้ของผงกำมะถัน ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ภาชนะที่แบนราบเพื่อช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเผาไหม้ การสังเกตว่าผงกำมะถันมีการเผาไหม้หรือไม่โดยให้สังเกตจากการมีเปลวไฟสีน้ำเงินเกิดขึ้นในภาชนะที่ใช้เผา นอกจากข้อจำกัดในเรื่องการเผาไหม้แล้วการเผาผงกำมะถันยังทำให้มีผงสีเหลืองเกิดขึ้นในห้องและมีความร้อนเกิดขึ้นด้วย (2.2 กิโลแคลอรีต่อกรัม) สำหรับวัสดุ อุปกรณ์ที่สำคัญและจำเป็นต้องใช้ในการเผาผงกำมะถัน ได้แก่

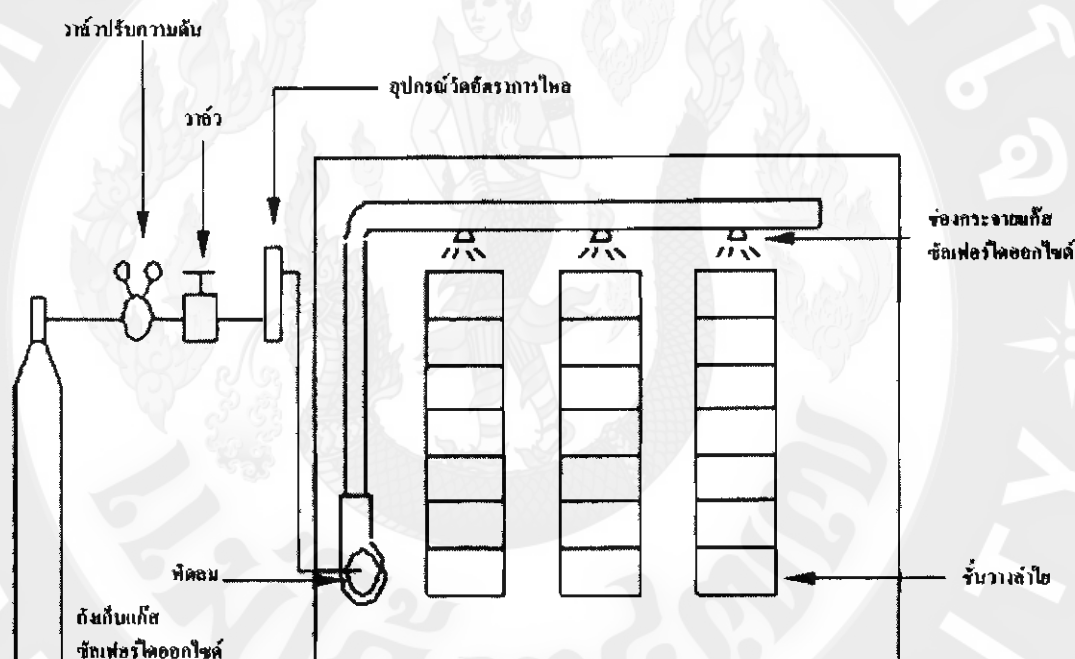
1. เตาเผาผงกำมะถัน ซึ่งอาจเป็นเตาความร้อนไฟฟ้า (Heater) ขนาด 600 – 800 วัตต์ ที่สามารถเผาผงกำมะถันได้ไม่เกิน 1.5 กิโลกรัมต่อหนึ่งเตา หรืออาจเป็นเตาที่ใช้แก๊สหุงต้มเป็นตัวให้ความร้อน
2. พัดลมกวนอากาศ ซึ่งควรมีความเร็วกระแสลมวนประมาณ 0.5 – 1.0 เมตรต่อวินาที
3. NaNO_3 ร้อยละ 2 (ประมาณ 20 กรัม ต่อ กำมะถัน 1 กิโลกรัม)

การใช้ SO_2 จากถังอัดความดัน

SO_2 ที่บรรจุในถังอัดความดันส่วนใหญ่แล้วจะมีความดันประมาณ 237.2 กิโลปาสกาล ที่อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส โดยส่วนล่างของถังบรรจุ SO_2 ในรูปของเหลวขณะที่ส่วนบนของถังเป็น SO_2 ในรูปไอ เมื่อใช้งานให้เปิดลิ้น (Valve) ที่หัวถัง SO_2 ที่อยู่ในรูปของไอจะ

ถูกนำไปใช้งาน และขณะเดียวกันความดันภายในถังจะเปลี่ยนแปลง ทำให้ SO_2 บริเวณก้นถังเปลี่ยนจากของเหลวเป็นไอเพื่อทดแทนส่วนที่ถูกนำไปใช้ต่อไป

การใช้ SO_2 ในรูปแบบนี้สามารถทำได้สะดวกรวดเร็วและค่อนข้างแม่นยำ เนื่องจากการใช้ SO_2 บริสุทธิ์ที่ออกจากถังโดยตรงและมีตัวควบคุมการไหลคือ อุปกรณ์ควบคุมการไหล (Flow meter) ชนิดลูกกลอย (ภาพ 1) แต่การใช้ SO_2 ในรูปแบบนี้อาจมีข้อจำกัดในห้องขนาดใหญ่ซึ่งต้องใช้ถังอัดความดันหลายถังต่อเข้าด้วยกัน เนื่องจากอัตราการแลกเปลี่ยนสถานะของ SO_2 ในรูปแบบของเหลวไปสู่สถานะที่เป็นไอของแต่ละถังอยู่ในระดับที่จำกัด



ภาพ 1 การใช้ SO_2 จากถังอัดความดัน

ที่มา: ญัฐพงศ์ และคณะ (2545)

การใช้ SO_2 จากสารประกอบซัลไฟต์ชนิดอื่น

สารประกอบซัลไฟต์ (Sulfite agents) หมายถึงสารประกอบที่มีคุณสมบัติในการให้กำเนิดโมเลกุลของ SO_2 ประกอบไปด้วย เกลือโซเดียม (Na) เกลือโพแทสเซียม (K) และเกลือแคลเซียม (Ca) ของกรด 3 ชนิด คือ กรดซัลเฟอร์รัส (Sulferous acid, H_2SO_3) กรดไฮโดรซัลเฟอร์รัส (Hydrosulferous acid, $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_4$) และกรดไทโรซัลเฟอร์รัส (Tyrosulferous acid, $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_5$) สารประกอบซัลไฟต์ดังกล่าวมักจะอยู่ในรูปของเกล็ดละเอียดมีสีขาว มีกลิ่นกำมะถันอ่อนๆ เมื่อละลายน้ำหรือได้รับความชื้นจะแตกตัวให้โมเลกุลของ SO_2 ประมาณร้อยละ 70 (สดศรี, 2535)

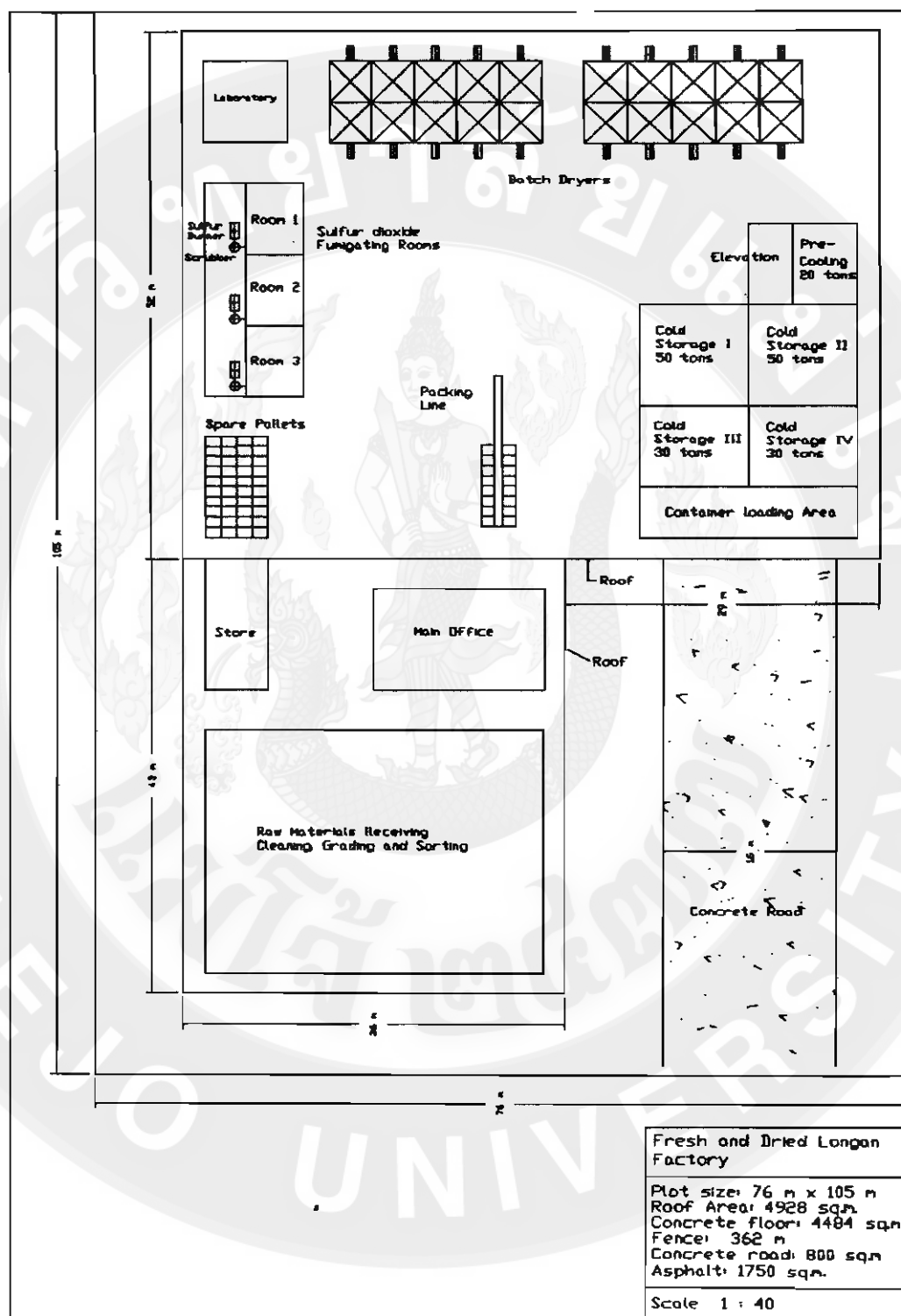
จากการศึกษารูปแบบของการใช้ SO_2 กับผลล้าไฮสค พบว่า รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดในการวิจัยนี้คือการการใช้ SO_2 จากถังอัดความดัน เนื่องจากการใช้ SO_2 ในรูปแบบนี้สามารถทำได้สะดวกรวดเร็วและค่อนข้างแม่นยำ เนื่องจากการใช้ SO_2 บริสุทธิ์ที่ออกจากถังโดยตรง

ห้องรม SO_2

ห้องรม SO_2 ผลล้าไฮสคควรมีลักษณะเหมาะสมตามข้อกำหนดของวิธีการปฏิบัติที่ดีในการผลิต (Good Manufacturing Practice: GMP) นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจด้วย ควรมีการจัดสรรพื้นที่ในการใช้สอยที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน (ภาพ 2) จะเห็นว่าส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนรับซื้อผลิตผล ส่วนการกักคุณภาพ ส่วนของการรม SO_2 ส่วนปฏิบัติการหลังการรม SO_2 ส่วนของห้องเย็น และส่วนของลานสำหรับจอดรถบรรทุกที่จะทำการขนส่งล้าไปยังตลาดปลายทาง นอกจากนั้นยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น สำนักงาน ห้องเก็บของ เป็นต้น โดยมีข้อพิจารณาในการสร้างห้องรม SO_2 มีดังนี้

1. สถานที่ก่อสร้าง ควรมีพื้นที่เพียงพอสำหรับการปฏิบัติงานต่าง ๆ
2. วัสดุก่อสร้างควรมีความแข็งแรงทนทาน ทนต่อการกัดกร่อนของ SO_2
3. พื้นห้องต้องสามารถรองรับน้ำหนักของล้าไฮที่ต้องการรม SO_2
4. การออกแบบห้องต้องง่ายในการทำความสะดวก
5. มีฉนวนป้องกันการรั่วไหลของ SO_2 ขณะทำการรม
6. มีหลอดไฟให้แสงสว่าง และช่องกระจกสำหรับมองภายในห้องขณะปฏิบัติงาน
7. มีระบบรักษาความปลอดภัย เช่น ระบบป้องกันไฟฟ้าลัดวงจร ระบบดับเพลิง

เป็นต้น



ภาพ 2 ตัวอย่างแผนผังสถานประกอบการรม SO_2 ผลไม้สดที่ได้มาตรฐาน
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)

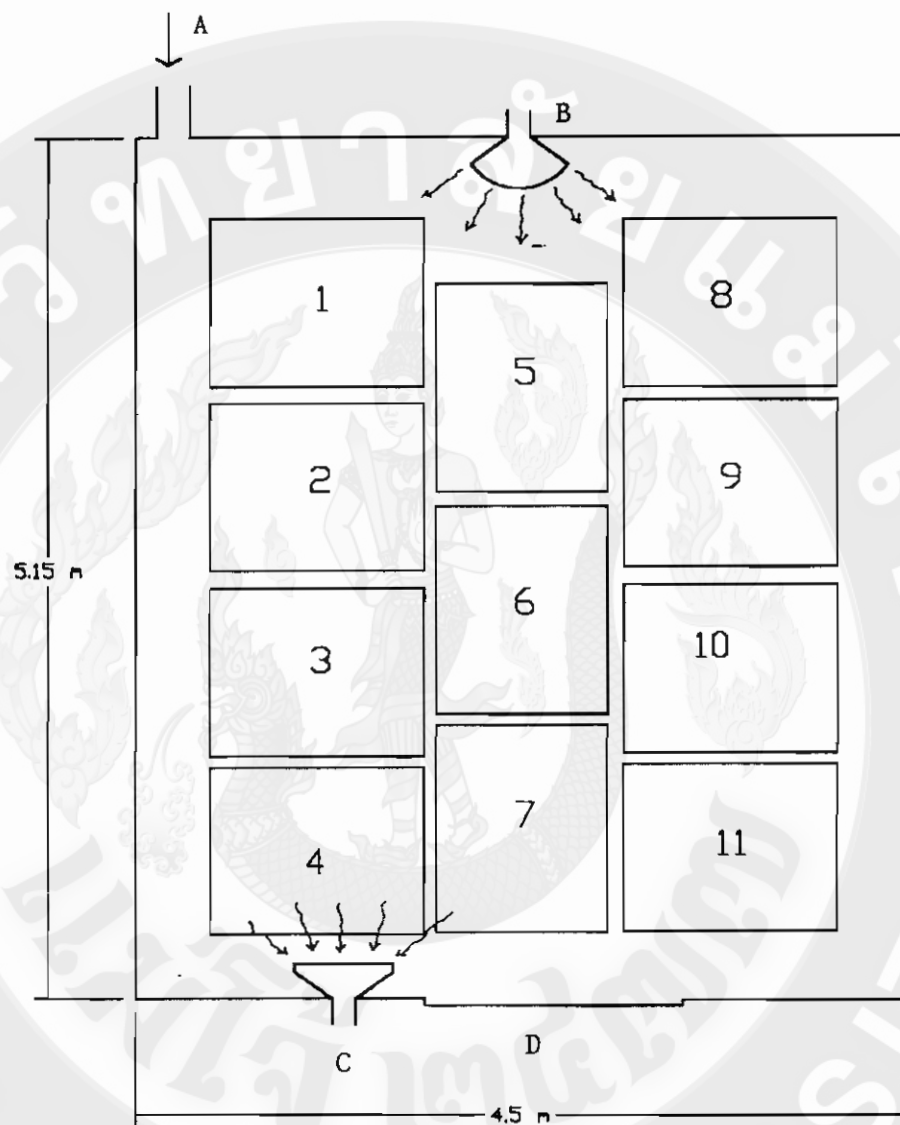
การปล่อย SO_2

การปล่อย SO_2 ภายในห้องรม ต้องคำนึงถึงการกระจายตัวของแก๊สที่ดี คือ แก๊สสามารถกระจายตัวได้อย่างทั่วถึงภายในห้องรม ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้แก่ ตำแหน่งของหัวปล่อยแก๊ส จำนวนของหัวปล่อยแก๊ส ตำแหน่งของหัวดูดแก๊ส จำนวนหัวดูดแก๊ส ความเร็วที่พ่นและดูดแก๊สภายในห้อง และการจัดเรียงตะกร้าลำไยภายในห้องรม แก๊สที่ปล่อยเข้าไปภายในห้องจะมีความเข้มข้นสูงที่บริเวณหัวกระจายแก๊ส ดังนั้นตะกร้าลำไยที่อยู่ใกล้หัวกระจายแก๊สจึงมีโอกาที่จะได้รับปริมาณ SO_2 มากกว่าตะกร้าลำไยที่อยู่ไกลออกไป หากไม่มีการหมุนเวียนอากาศที่ดีภายในห้องรมก็อาจก่อให้เกิดการตกค้างของ SO_2 โดยเฉพาะตะกร้าลำไยที่อยู่ใกล้หัวกระจายแก๊ส (ภาพ 3) จึงต้องมีอุปกรณ์ในการกระจายแก๊สภายในห้องรม เพื่อให้สัมพันธ์กับทิศทางการไหลเวียนของอากาศภายในห้องรม ประกอบไปด้วย ท่อดูดแก๊ส หัวกระจายแก๊ส และพัดลม โดยมีตำแหน่งในการติดตั้งท่อดูดแก๊สและหัวกระจายแก๊ส ดังภาพที่ 4

1. ท่อดูดแก๊ส มีหน้าที่ในการดูด SO_2 ภายในห้องรม SO_2 ที่ปล่อยออกมาจากหัวกระจายแก๊ส แล้วนำแก๊ส SO_2 หมุนเวียนกลับมายังหัวกระจายแก๊สเพื่อปล่อยเข้ามาในห้องรม ท่อดูดแก๊สที่ดีจะต้องมีลักษณะเป็นรูปทรงเรขาคณิต ปากทางเข้าจะกว้างแล้วลดขนาดเข้าหาท่อดูด (ภาพ 5) เพื่อเป็นการลดการสูญเสียแรงดูด ขนาดท่อดูดจะต้องสัมพันธ์กับอัตราการหมุนเวียนอากาศที่เหมาะสม วัสดุที่ใช้ทำต้องทนการกัดกร่อน ผิวเรียบ และทำความสะอาดได้ง่าย

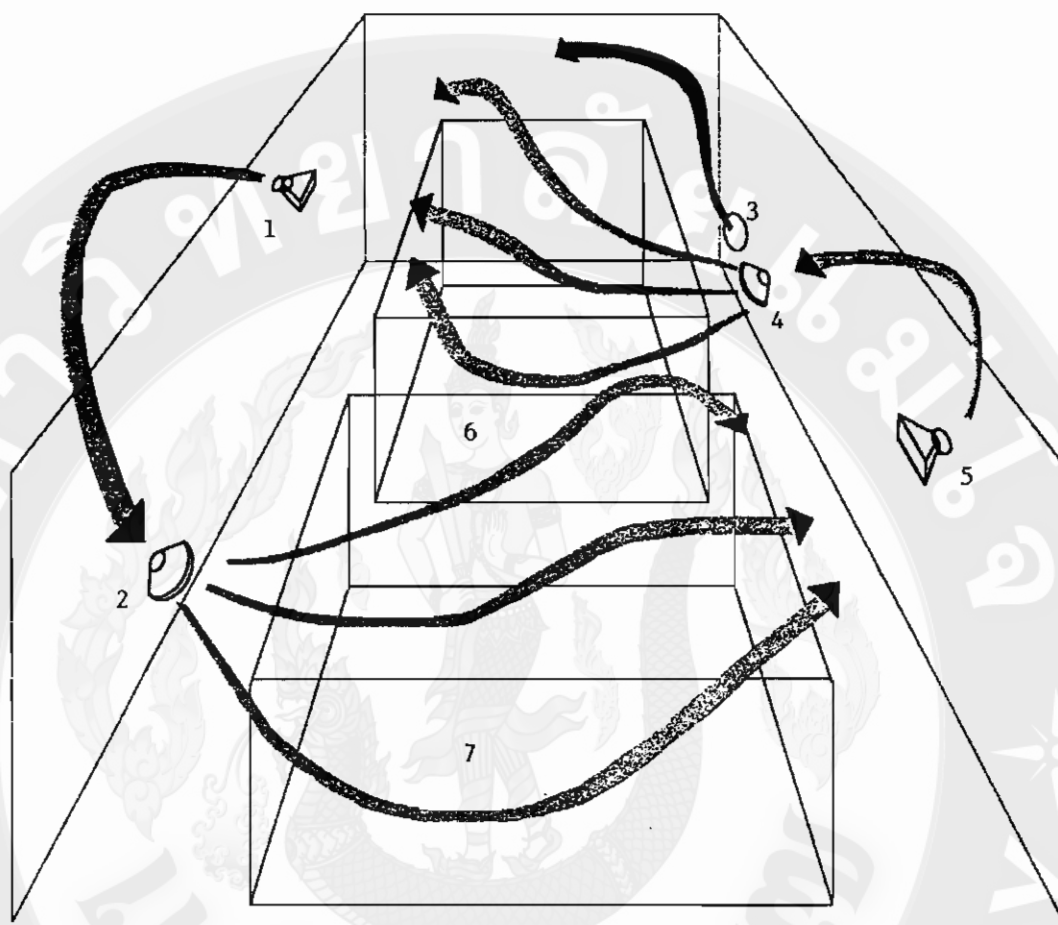
2. หัวกระจายแก๊ส ลักษณะหัวกระจายแก๊สที่ดีจะต้องสามารถปล่อยแก๊สออกมาในลักษณะที่ก่อให้เกิดการกระจายตัวของแก๊สได้ค่อนข้างดี เพื่อที่จะทำให้ไม่เกิดการกระจุกตัวของแก๊ส ต้องสามารถควบคุมทิศทาง และอัตราการไหลให้เหมาะสมกับปริมาณตะกร้าลำไยที่ต้องการรม (ภาพ 6)

3. พัดลม มีหน้าที่หลักในการควบคุมอัตราการไหลของ SO_2 ที่ปล่อยและดูดภายในห้องรมโดยตรง พัดลมที่ผ่านการใช้งานมาได้ระยะหนึ่ง ควรได้รับการบำรุงรักษาพัดลม ตลอดจนอุปกรณ์ในระบบทั้งหมดเพื่อให้พัดลมสามารถทำงานได้ตามปกติ



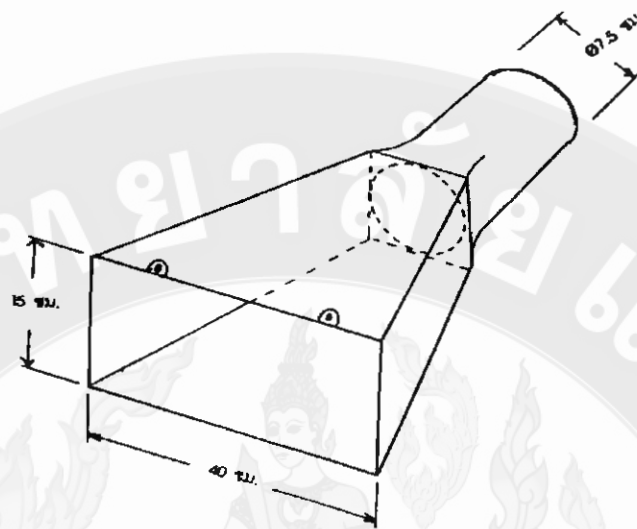
- A ท่อทางเข้าก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์
- B หัวกระจายก๊าซ
- C ท่อดูดก๊าซ
- D ประตู

ภาพ 3 การจัดเรียงตะกร้าลำไยในการรม SO_2 ในห้องขนาดเล็ก
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)

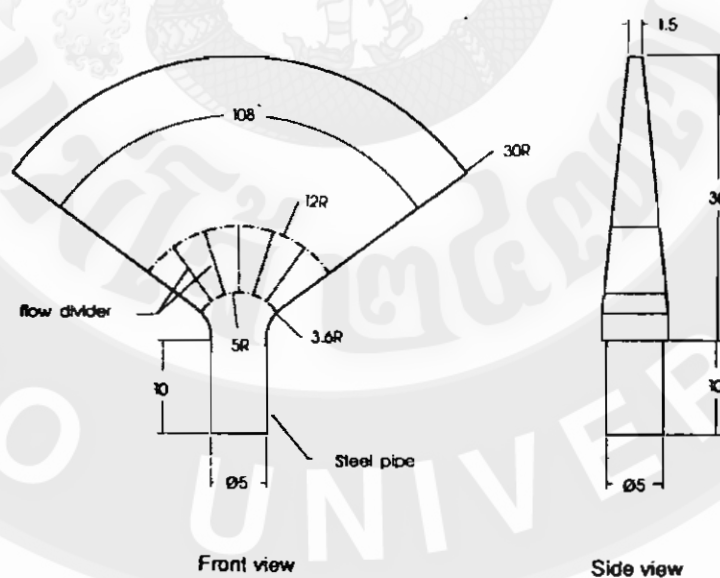


- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| 1 ท่อดูดก๊าซชุดที่ 1 | 5 ท่อดูดก๊าซชุดที่ 2 |
| 2 หัวกระจายก๊าซตัวที่ 1 | 6 ชั้นวางลำไยกลุ่มที่ 1 |
| 3 ท่อส่งก๊าซจากเตาเผาแก๊ส | 7 ชั้นวางลำไยกลุ่มที่ 2 |
| 4 หัวกระจายก๊าซชุดที่ 2 | |

ภาพ 4 ตำแหน่งการติดตั้งส่วนประกอบภายในห้องรม และลักษณะการหมุนเวียนอากาศ
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)



ภาพ 5 ตัวอย่างหัวดูด SO_2 รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)



All dimensions in CM

ภาพ 6 หัวกระจายแก๊สรูปพัด
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)

ระบบหมุนเวียน SO_2 แบบบังคับ

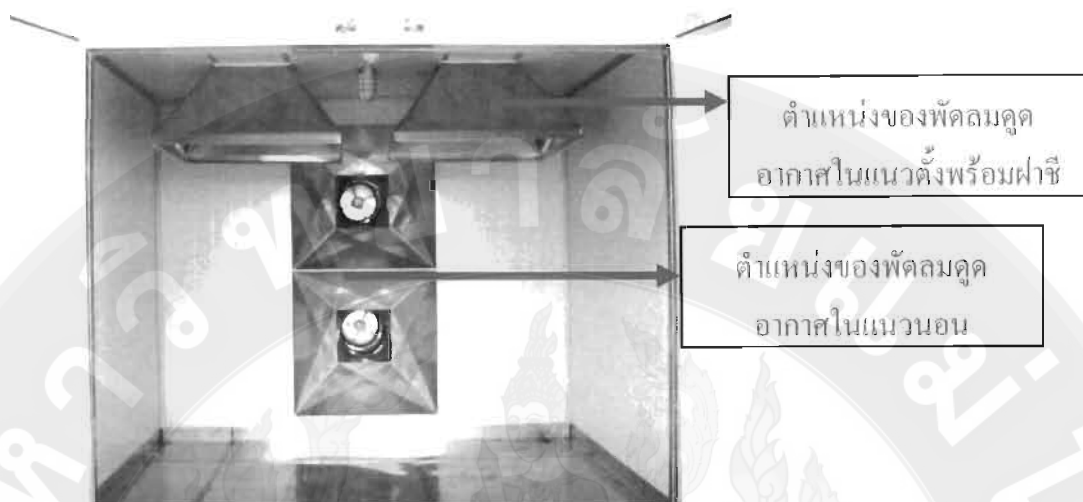
จักรพงษ์ และคณะ (2551) ได้ทำการออกแบบและสร้างห้องรม SO_2 ผลลำไยสด ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่งและแนวนอน ห้องรม SO_2 ผลลำไยสดที่ออกแบบและสร้างขึ้นมีขนาด กว้าง 3 เมตร ยาว 3 เมตร สูง 2.5 เมตร โครงสร้างของห้องทำด้วยเหล็กมีล้อสำหรับเคลื่อนย้ายได้ พื้นห้องเป็นสแตนเลสชนิดเรียบ ผนังห้องเป็นแผ่นโลหะเคลือบสังกะสี และมีฉนวนเป็นพอลิยูรีเทน ประตูเป็นแบบบานคู่ ภายในห้องมีระบบน้ำพร้อมระบบแสงสว่าง และมีระบบพัดลมดูดอากาศพร้อมตู้ควบคุม เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่งและแนวนอน โดยมีลักษณะการหมุนเวียนอากาศดังนี้

1. การหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวดิ่ง

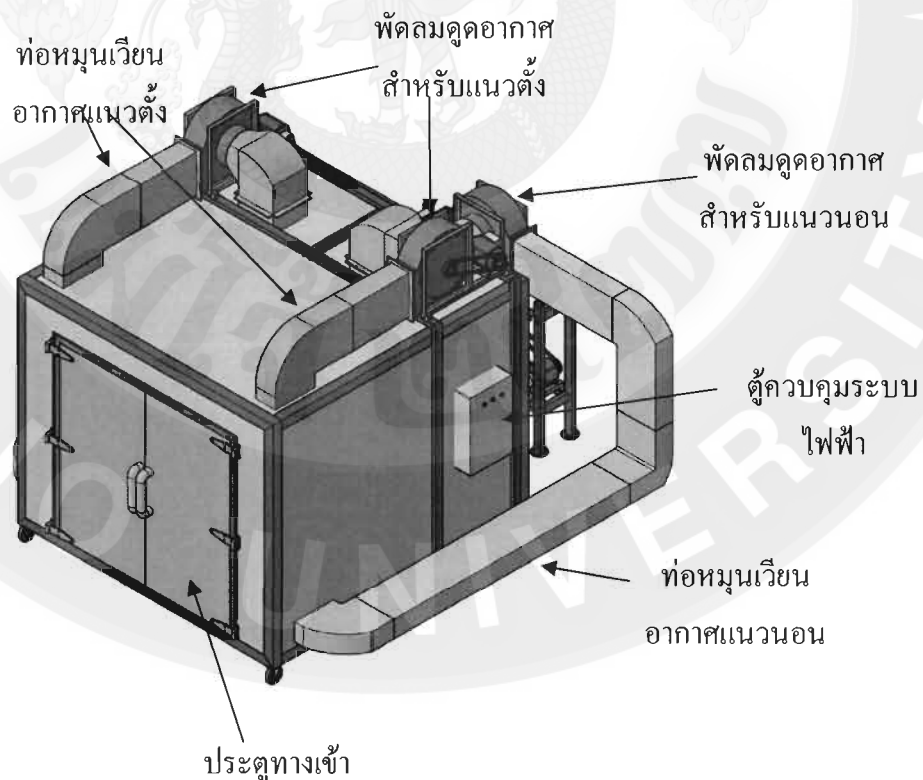
อากาศและ SO_2 จากด้านล่างของห้องผ่านตะแกราบรรจุผลลำไยไปยังด้านบนของห้อง โดยพัดลมดูดอากาศพร้อมฝาชีครอบ (Hood) ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนของห้องจำนวน 2 ตัว (ภาพ 7) พร้อมกับมีระบบหมุนเวียนอากาศเป็นท่อสแตนเลสที่เหลื่อมพื้นผ้าขนาด กว้าง 24 เซนติเมตร ยาว 46 เซนติเมตร ที่เชื่อมต่อจากพัดลมดูดอากาศ แล้ววนเข้าสู่ผนังห้องทางด้านบนอีกครั้งหนึ่ง (ภาพ 8 และ 9)

2. การหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวนอน

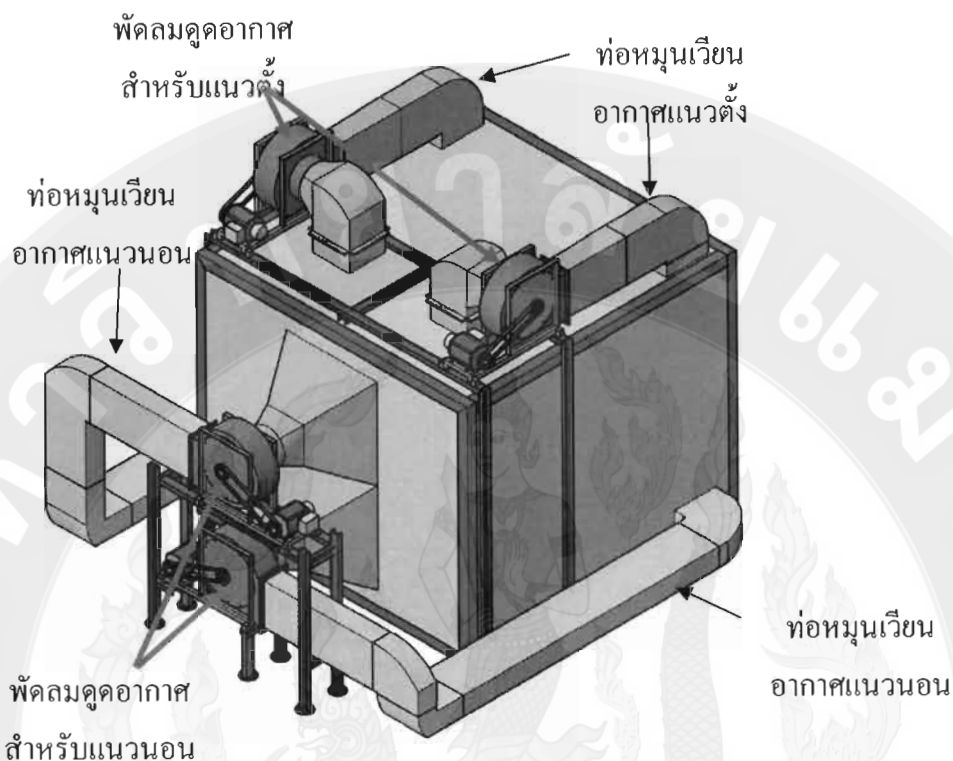
อากาศจากช่องว่างตรงกลางระหว่างกลุ่มของตะแกราจะถูกออกไป โดยพัดลมดูดอากาศ บริเวณช่องว่างตรงกลางระหว่างกลุ่มของตะแกราบรรจุผลลำไย พร้อมกับมีผ้าใบปิดช่องว่างตรงกลาง ซึ่งพัดลมดูดอากาศนี้จะถูกยึดติดกับผนังของห้องรมทางด้านหลัง ทำให้อากาศและ SO_2 ไหลผ่านตะแกราบรรจุผลลำไย เข้ามาแทนที่อากาศที่ถูกดูดออกไป (ภาพ 7) พร้อมกับมีระบบหมุนเวียนอากาศ เป็นท่อสแตนเลสที่เหลื่อมพื้นผ้าขนาด กว้าง 24 เซนติเมตร ยาว 46 เซนติเมตร ที่เชื่อมต่อจากพัดลมดูดอากาศแล้ววนเข้าสู่ผนังห้องทางด้านข้างอีกครั้งหนึ่ง (ภาพ 8 และ 9)



ภาพ 7 ตำแหน่งพัดลมดูดอากาศพร้อมฝาชีครอบตะกร้าบรรจุผลลำไยของระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งและแนวนอน
ที่มา: จักรพงษ์ และคณะ (2551)



ภาพ 8 ภาพจำลองด้านหน้าของห้องรม SO_2 ที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งและแนวนอน
ที่มา: จักรพงษ์ และคณะ (2551)



ภาพ 9 ภาพจำลองด้านหลังของห้องรม SO_2 ที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งและแนวนอน
ที่มา: จักรพงษ์ และคณะ (2551)

การตรวจวัด SO_2

การตรวจวัดปริมาณ SO_2 ในขั้นตอนการรม SO_2 กับผลล้าไยสด เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา ในการรมจะมีการตรวจวัดความเข้มข้นสุดท้ายของ SO_2 ในห้องรมให้ตรงกับความต้องการของผู้ประกอบการ โดยจะมีความเข้มข้นตั้งแต่ 2,000 ppm ถึง 20,000 ppm ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ ดังนี้

การตรวจวัด SO_2 โดยใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เข้มข้น 3%

เป็นการใช้สารละลาย H_2O_2 เข้มข้น 3% เป็นตัวดัก SO_2 โดยนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์และคำนวณปริมาณความเข้มข้นของ SO_2 มีสารเคมีและขั้นตอนการตรวจวัด (มานัส, 2545) ดังต่อไปนี้

1. อินดิเคเตอร์ เป็นสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวบ่งชี้การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย H_2O_2 กับ SO_2 ซึ่งอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ประกอบด้วย Methylene blue กับ Methyl red เตรียมได้จากการชั่ง Methylene blue และ Methyl red มาจำนวน 0.05 และ 0.10 g ตามลำดับ จากนั้นนำไปละลายในเอทานอล (Ethanol) เข้มข้น 95 % จนกระทั่งได้ปริมาตร 100 ml

2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) เข้มข้น 3% เตรียมได้จาก สารละลาย H_2O_2 เข้มข้น 30 % ปริมาณ 100 มิลลิลิตร มาเจือจางในน้ำกลั่นจนกระทั่งมีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นหยดอินดิเคเตอร์ จนได้สารละลายเป็นสีม่วงอ่อน ซึ่งสารละลายที่ได้จากขั้นตอนนี้จะมีสภาพเป็นกรด ก่อนนำไปใช้ต้องปรับให้มีสภาพเป็นกลางด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เข้มข้น 0.1 N โดยหยดลงไปในสารละลาย H_2O_2 สภาพเป็นกลางของสารละลายสามารถสังเกตได้จากสีของสารละลายเป็นสีเขียวอ่อน ๆ

ในขั้นตอนการตรวจวัด เริ่มจากใส่สารละลาย H_2O_2 เข้มข้น 3% ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตร ขนาด 250 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิทโดยใช้จุกยาง ใช้เข็มฉีดยา ดูดแก๊ส SO_2 จากห้องรวมมา 50 มิลลิลิตร ฉีดลงในขวดปริมาตรที่มีสารละลาย H_2O_2 เข้มข้น 3% เขย่าเล็กน้อย นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ และคำนวณปริมาณความเข้มข้นของแก๊ส SO_2 ตามสมการ 2

$$ppm SO_2 = \frac{mg SO_2 \times 10^6}{2.618 \times Volume\ of\ used\ air(ml)} \quad (2)$$

โดยที่

$ppm SO_2$ = ปริมาณความเข้มข้นของ SO_2 มีหน่วยเป็น 1 ส่วนในล้านส่วน (ppm)

$mg SO_2$ = มิลลิกรัมของแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ซึ่งมีค่าเท่ากับ $N \times V \times 32$

(N = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ มีหน่วยเป็น นอร์มัล, V = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ มีหน่วยเป็น มิลลิลิตร, 32 = น้ำหนักของแก๊สซัลเฟอร์ (กำมะถัน))

2.618 = ค่าคงที่ ที่ใช้ในการแปลงค่า $mg SO_2$ เป็น $ml SO_2$ (มิลลิลิตรของ SO_2)

การตรวจวัด SO_2 ในอากาศ โดยใช้หลอดตรวจแก๊ส หรือหลอดซีบ็อก

หลอดตรวจแก๊ส หรือหลอดซีบ็อก เป็นเทคนิคการตรวจวัดแก๊สมลพิษทางสิ่งแวดล้อม โดยต้องทราบชนิดของสารที่ต้องการสุ่มตรวจวัด เพื่อเลือกใช้ชนิดของ หลอดตรวจแก๊ส หรือหลอดซีบ็อก และ ผลจากการตรวจวัดโดยใช้หลอดตรวจแก๊ส หรือ หลอดซีบ็อก สามารถแสดงผลได้โดยใช้เวลาไม่นาน แต่ผลที่ได้ยังเป็นค่าที่ไม่แน่นอน ต้องใช้เทคนิคและเครื่องมือที่มีความละเอียดมาตรวจวัด ทั้งนี้ส่วนประกอบหลัก ของเทคนิคการตรวจวัดแก๊ส ด้วยหลอดตรวจแก๊ส หรือ หลอดซีบ็อก มี 2 ส่วน คือ ส่วนของตัวปั๊มกับส่วนที่เป็น Detector tube (ภาพ 10) โดยมีขั้นตอนการใช้งานดังต่อไปนี้



ภาพ 10 ปั๊ม และ Detector tube

ที่มา: ศูนย์เทคโนโลยีความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม (2552)

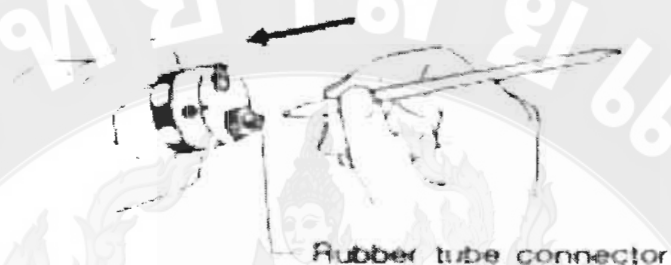
1. ทำการตรวจเช็ครอยรั่วที่ตัวปั๊มและเลือกขนาด Detector tube ให้เหมาะสมกับปริมาณ SO_2 โดยดูจากสเกล และค่าของ n^* ที่ปรากฏบน Detector tube (มานัส, 2545) หักปลายทั้งสองข้างของ Detector tube โดยการเสียบปลายของ Detector tube เข้าไปที่ปุ่ม (Tip) ที่ติดอยู่กับตัวปั๊ม ดังภาพ 11



ภาพ 11 การหักปลายทั้งสองข้างของ Detector tube

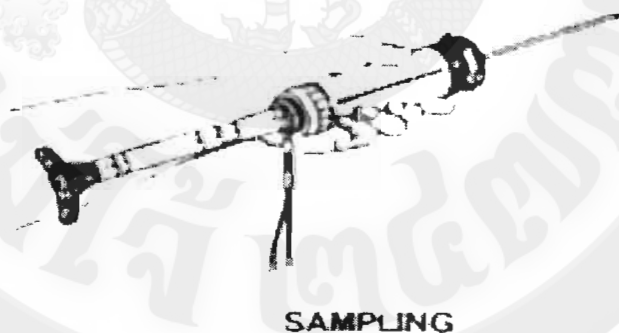
ที่มา: อารีย์ (2552)

2. ต่อปลายที่หักแล้วเข้ากับ pump โดยสังเกตจาก ลูกศรที่ชี้อยู่บน Detector tube แต่ละอันว่าจะสอดคล้องด้านไหนต่อกับปั๊ม ดังภาพ 12



ภาพ 12 การเสียบปลาย Detector tube ที่หักแล้วเข้ากับตัวปั๊ม
ที่มา: อารีย์ (2552)

3. ดูดอากาศที่มี SO_2 ผ่านเข้า Detector tube ค้างมาจนสุดปั๊มจะล็อกโดยอัตโนมัติ โดยทำการดูด 1 ครั้งจะเท่ากับ 100 มิลลิลิตร ดังภาพ 13



ภาพ 13 การดูด SO_2 ผ่าน Detector tube
ที่มา: อารีย์ (2552)

4. รอต่อการเปลี่ยนแปลงสีบน Detector tube รอให้แถบสีปรากฏอย่างชัดเจน จึงอ่านค่าตามสเกลที่กำหนดบน Detector tube มีหน่วยเป็น 1 ส่วนในล้านส่วน (ppm)

การวิเคราะห์ความไม่แน่นอน

ความไม่แน่นอน (uncertainty) คือ ค่าความผิดพลาดที่สามารถบอกเป็นตัวเลข ที่เกี่ยวข้องกับผลของการวัด ว่ามีช่วงของค่าที่เป็นไปได้ ซึ่งเกิดจากความไม่แน่นอนของการวัดอยู่เท่าใด ในระดับความเชื่อมั่นที่เหมาะสม เป็นสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ทั้งนี้อาจเกิด จากความผิดพลาดของเครื่องมือวัด หรือเกิดจากผู้ทำการวัด ซึ่งอ่านค่าผิดพลาด เนื่องจากไม่คุ้นเคยกับเครื่องมือวัดนั้นหรือระดับสายตาในการอ่านค่าไม่ถูกต้อง (อิสเรศ, 2547) มีขั้นตอนในการคำนวณดังต่อไปนี้

1. คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบ Type A คือ ค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากการทำซ้ำ โดยจะแสดงในรูปแบบของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation of mean) (คิสรณ์, 2547) สามารถคำนวณได้จากสมการ 3

$$U_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

เมื่อ

U_A = ค่าความแน่นอนแบบ Type A

σ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n = จำนวนครั้งในการวัด

2. คำนวณหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบ Type B คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากองค์ประกอบของความไม่แน่นอนของระบบ (systematic uncertainty) สามารถหาได้จากใบสอบเทียบเครื่องมือ การประมาณจากข้อมูล ประสบการณ์ของนักวิเคราะห์ การวิเคราะห์โดยใช้หลักทฤษฎีในการตัดสินใจ ความละเอียดของเครื่องมือ และปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้องในการทดลอง (อิสเรศ, 2547) สามารถหาได้โดยแยกตามแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนได้ดังนี้

2.1 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ระบุในคู่มือของเครื่องคำนวณได้จาก

สมการ 4

$$U_{B1} = \frac{U_{certificate}}{2} \quad (4)$$

เมื่อ

U_{B1} = ค่าความไม่แน่นอนที่คำนวณจากค่าความไม่แน่นอนจากคู่มือของเครื่องมือ

2.2 ค่าความไม่แน่นอนของการวัดที่ได้จากความละเอียดของเครื่องมือคำนวณ
ได้จากสมการ 5

$$U_{B2} = \frac{\text{resolution}}{2\sqrt{3}} \quad (5)$$

เมื่อ

U_{B2} = ค่าความไม่แน่นอนที่คำนวณจากความละเอียดของเครื่องมือ

2.3 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการประมาณจากข้อมูล ประสบการณ์ของ
นักวิเคราะห์ การวิเคราะห์โดยใช้หลักทฤษฎีในการตัดสินใจ และปัจจัยแวดล้อมที่เกี่ยวข้องในการ
ทดลอง คำนวณได้จากสมการ 6

$$U_{B3} = \frac{U_{es}}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

เมื่อ

U_{B3} = ค่าความไม่แน่นอนที่คำนวณได้จากการประมาณ

U_{es} = ค่าประมาณความไม่แน่นอน

3. รวมค่าความไม่แน่นอนในการวัด (Combined Uncertainty) ทั้งแบบ Type A
และ Type B ด้วยสมการ 7

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_{B3}^2 + \dots U_{Bn}^2} \quad (7)$$

เมื่อ

U_C = ความไม่แน่นอนรวม (Combined Uncertainty)

4. ขยายค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยสมการ 8

$$U_{95\%} = 2 \times U_C \quad (8)$$

เมื่อ

$U_{95\%}$ = ค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การรวม SO₂ กับผลล้าไยสด

Han *et al.* (2001) ศึกษาผลของการรวม SO₂ ที่มีต่อคุณภาพโดยรวมของผลล้าไยสด ระหว่างเก็บรักษาในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส พบว่า SO₂ สามารถลดการเปลี่ยนสีของเปลือกได้ และไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงวิตามินซี และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ แต่มีการเพิ่มขึ้นของ ปริมาณกรดที่สามารถไทเทรตได้ การเก็บรักษาผลล้าไยที่ผ่านการรวม SO₂ ในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สามารถรักษาคุณภาพของล้าไยสดได้ดีในช่วงเริ่มต้นของการเก็บรักษา และสามารถยืดอายุการเก็บรักษาผลล้าไยสดได้นานขึ้น เมื่อเทียบกับผลล้าไยที่ไม่ผ่านการรวม SO₂

Lin *et al.* (2001) นำล้าไยสดมาผ่านกระบวนการยืดอายุการเก็บรักษา เช่น การจุ่มล้าไยในซัลเฟอร์ การรวมด้วย SO₂ จากนั้น ทำการศึกษาอายุการเก็บรักษาผลล้าไยในห้องเย็น ที่อุณหภูมิ 3 องศาเซลเซียส นาน 46 วัน จึงนำออกมาศึกษา ผลการศึกษาพบว่า อัตราการหายใจของผลล้าไยลดลงอย่างรวดเร็วในระหว่างการเก็บรักษาในห้องเย็น และจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากนำออกมาวางที่อุณหภูมิห้อง ผลล้าไยที่ผ่านการรวม สามารถรักษาสีผิว และคุณภาพได้ดี แต่ผลล้าไยที่ผ่านการรวมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ร่วมกับการใช้สารยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน สามารถรักษาคุณภาพสำหรับการวางจำหน่ายได้ 100 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนำออกมาไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 78 ชั่วโมง

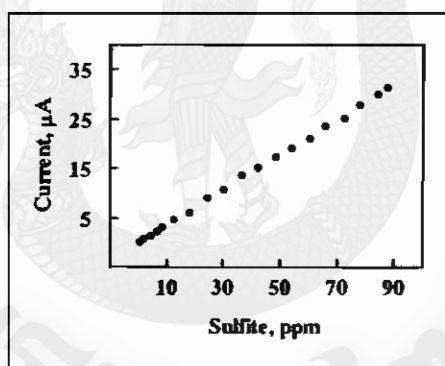
จักรพงษ์ และคณะ (2550) ทำการศึกษาเปรียบเทียบการรวม SO₂ ผลล้าไยสดพันธุ์คอ ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ circulating-air กับแบบบังคับ พบว่า การหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ จะทำให้มีการหมุนเวียนอากาศผ่านเข้าไปในตะกร้าบรรจุล้าไยได้ดีกว่าการหมุนเวียนอากาศด้วยระบบ circulating-air ซึ่งมีการหมุนเวียนภายในตะกร้าที่บรรจุล้าไยต่ำ และบางจุดอากาศไม่สามารถผ่านเข้าไปภายในตะกร้าล้าไยได้เลย อีกทั้งยังพบว่า การใช้ระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ ยังสามารถลดความเข้มข้นของ SO₂ ลงได้ 5 เท่า โดยยังสามารถรักษาคุณภาพ และอายุการเก็บรักษาได้เช่นเดียวกันเมื่อเทียบกับการรวมด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบเดิม ที่ความเข้มข้นของ SO₂ 12,000 ppm

อุปกรณ์ตรวจวัด SO₂ โดยการปรับเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า

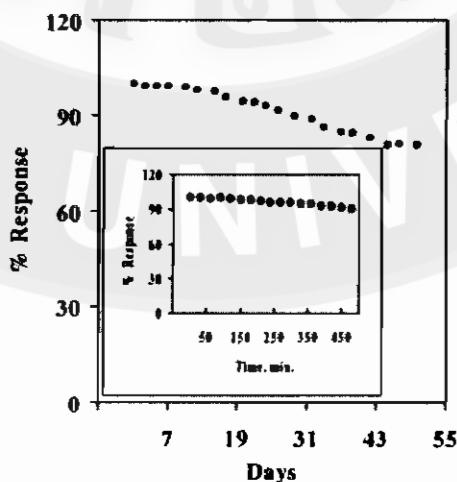
Ravi and Sriman (1999) ได้ทำการดัดแปลงหัวตรวจวัดทางด้านเคมี โดยใช้การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า เพื่อคำนวณหาความเข้มข้นของแก๊ส SO₂ ในอากาศ โดยการ

คัดแปลง คอปเปอร์เฮกซะไซยาโนเฟอเรต (CuHCF) เข้ากับ ขั้วไฟฟ้าที่ทำมาจากกราฟต์ SO_2 จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยการเร่งทางไฟฟ้ากับหัวตรวจวัด และเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า โดยสามารถตรวจวัดแก๊ส SO_2 ได้ในช่วง 3.1 ถึง 30.7 ppm ความเป็นกรดต่าง 3.5-8.0

Ravi *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษาการตรวจวัด SO_2 โดยใช้การเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า โดยนำ (3-Mercaptopropyl) trimethoxysilane (MPS) และ ซิลเวอร์ไนเตรท มาใช้ร่วมกับขั้วไฟฟ้าที่ทำมาจากคาร์บอน พบว่าหัวตรวจวัดมีการตอบสนองที่ดีต่อ SO_2 ในช่วงความเข้มข้น 0.6 ถึง 88 ppm ($R^2 = 0.9989$) โดยนำค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการตอบสนองมาเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของ SO_2 ดังภาพ 14 และหัวตรวจวัดยังมีเสถียรภาพในการใช้งาน โดยในการตรวจวัด SO_2 ที่ความเข้มข้น 30 ppm เป็นเวลา 8 ชั่วโมง พบว่าหัวตรวจวัดยังคงตอบสนองต่อ SO_2 ได้มากกว่า 91 % (ภาพ 15) เมื่อทำการตรวจเป็นเป็นเวลา 50 หัวตรวจวัดยังสามารถตอบสนองต่อ SO_2 ได้มากกว่า 82 % (ภาพ 15)

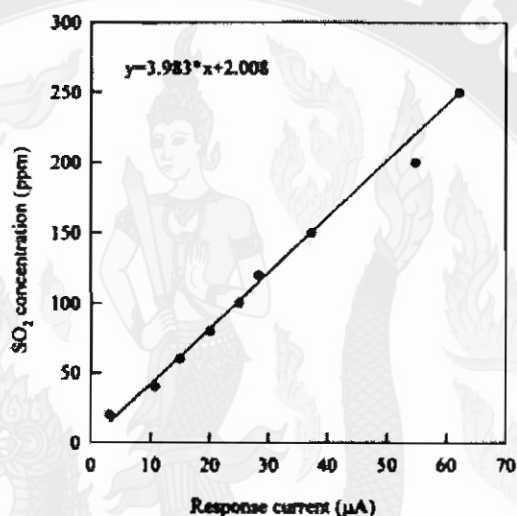


ภาพ 14 การเปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าจากหัวตรวจวัดกับ SO_2



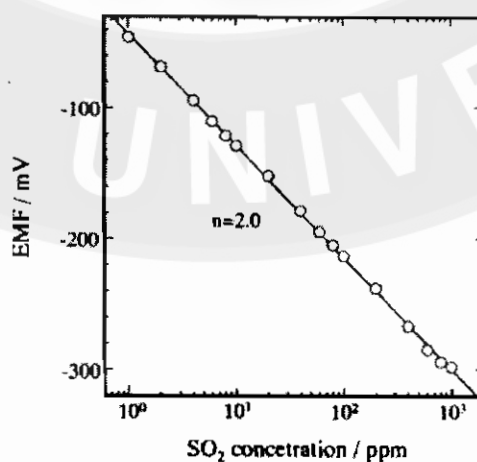
ภาพ 15 การตอบสนองของหัวตรวจวัด SO_2 เข้มข้น 30 ppm เวลา 8 ชั่วโมง และ 50 นาที

Syu and Liu (1998) ได้ศึกษาระบบตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าของ SO_2 โดยหัวตรวจวัดทำมาจาก Polyaniline กับ Nafion ตรวจวัด SO_2 จากท่อไอเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ในช่วงความเข้มข้น 20-250 ppm โดยมีการตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของ SO_2 เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าตอบสนองก็จะเพิ่มมากขึ้นเป็นลักษณะเส้นตรง ดังภาพ 16



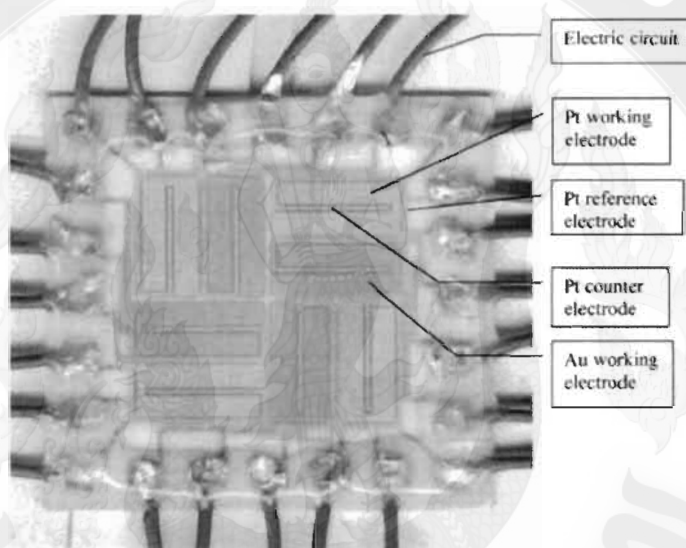
ภาพ 16 ค่าความเข้มข้น SO_2 ช่วง 20 – 250 ppm เปรียบเทียบกับการตอบสนองของกระแสไฟฟ้า

Suganuma *et al.* (1999) ได้พัฒนาหัวตรวจวัด SO_2 โดยใช้เซมิคอนดักเตอร์และเกลือซิลิเกต ใช้การนำไอออนของออกซิเจน และขั้วไฟฟ้าอ้างอิงทำมาจาก เงินและแพลทินัม วัด SO_2 ได้ในช่วงความเข้มข้น 1 ถึง 1,000 ppm ที่ อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ระยะเวลาการตอบสนอง 40 วินาที (ภาพ 17) โดยหัวตรวจวัดจะตอบสนองต่อ SO_2 เป็นค่าแรงดันไฟฟ้า



ภาพ 17 ความเข้มข้น SO_2 ช่วง 1 ถึง 1,000 ppm ที่อุณหภูมิ 600 °C เปรียบเทียบกับค่าแรงดันไฟฟ้า

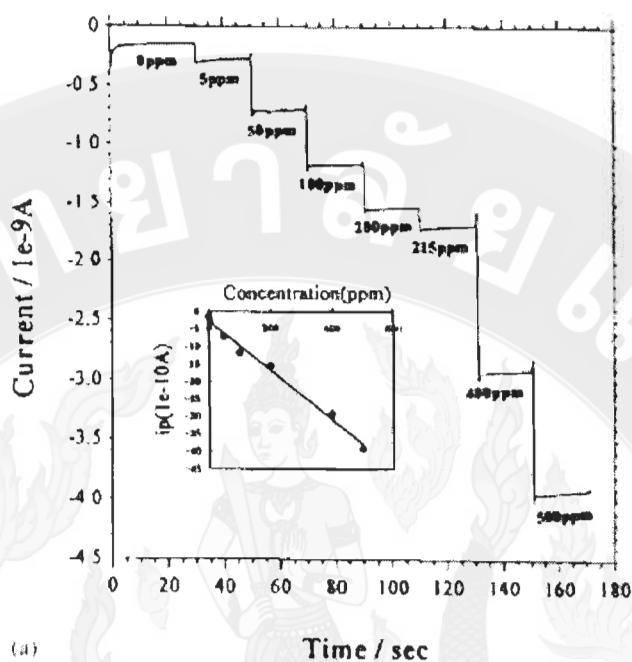
Jing-Shan and Po-Jen (2007) ได้พัฒนาอุปกรณ์วัดความเข้มข้นของ NO_2 , CO , O_2 และ SO_2 ในอากาศ โดยใช้การตอบสนองของกระแสไฟฟ้า กับความเข้มข้นของก๊าซที่เพิ่มมากขึ้น โดยอุปกรณ์มีส่วนประกอบของ แพลทินัม (ขั้วลบ) และทองคำ (ขั้วบวก) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ขั้วบวก จะเกิดการตอบสนองต่อความเข้มข้นของแก๊ส กลับมายังขั้วลบ เพื่อทำนายหาค่าความเข้มข้นของก๊าซโดยมีลักษณะอุปกรณ์ ดังภาพ 18 ซึ่งอุปกรณ์มีความแม่นยำในการทำนายความเข้มข้นของก๊าซ NO_2 , CO , O_2 และ SO_2 เฉลี่ย 91.34 %



ภาพ 18 อุปกรณ์วัดความเข้มข้นของ NO_2 , CO , O_2 และ SO_2

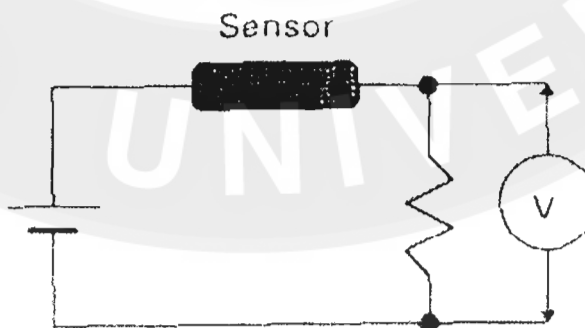
Getino *et al.* (1996) ได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดสำหรับวิเคราะห์แก๊ส NO_2 , SO_2 และ C_6H_6 ในไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ ที่มีการผสมของ N_2 , O_2 , CO_2 , H_2S , HF , HCl และไอน้ำ โดยอุปกรณ์มีลักษณะเป็นสารกึ่งตัวนำ มีค่าการตอบสนองเป็นความต้านทานทางไฟฟ้า โดยสามารถ ตรวจวัดความเข้มข้นของ SO_2 ได้ในช่วงความเข้มข้น 2 ถึง 100 ppm ($R^2 = 0.985$) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในอากาศที่ถูกผสมไปด้วยก๊าซ N_2 , O_2 , CO_2 , H_2S , HF , HCl และไอน้ำ

Li *et al.* (2002) ได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้นของ SO_2 ในอากาศ โดยมีส่วนผสมของทองคำ ใช้การตอบสนองของกระแสไฟฟ้าที่มีต่อความเข้มข้น SO_2 เป็นลักษณะเชิงเส้นในช่วงความเข้มข้น 5 ถึง 500 ppm ดังภาพ 19



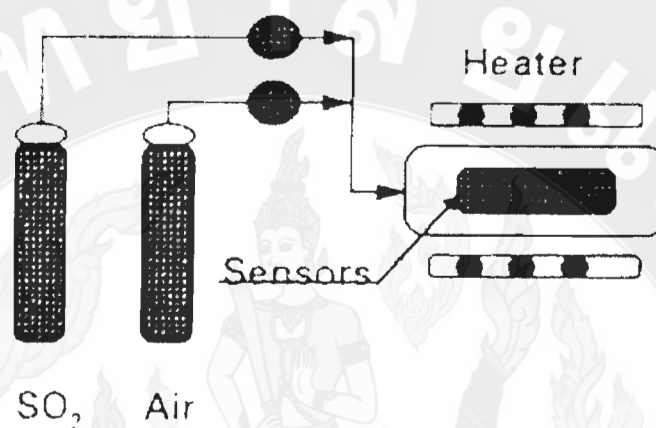
ภาพ 19 ค่าตอบสนองของกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของ SO_2 ในช่วงความเข้มข้น 5 ถึง 500 ppm

Sriyudthsak (2540) ได้ศึกษา การประดิษฐ์หัววัด SO_2 ได้นำเทคนิคการวัดความเข้มข้นของก๊าซโดยวิธีการถ่ายเทอิเล็กตรอนมาใช้ โดยใช้สารกึ่งตัวนำจำพวกดีบุกออกไซด์หรือสังกะสีออกไซด์ เป็นสารที่ทำหน้าที่ในการถ่ายโอนอิเล็กตรอนกับก๊าซ ในการศึกษาได้นำทั้งสแตนด์ออกไซด์ที่มีความทนทานต่อการทำปฏิกิริยาสูง มาใช้ในการประดิษฐ์หัววัด SO_2 และจ่ายแรงดันกระแสตรงให้กับหัวตรวจวัดที่ต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน โดยสามารถวัดค่าความต้านทานที่มีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง จากการวัดแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน ดังภาพ 20



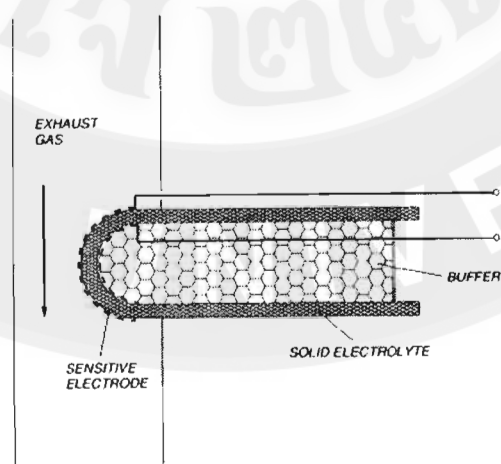
ภาพ 20 หัวตรวจวัดต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน

นำหัววัดก๊าซมาติดตั้งในระบบวัดก๊าซ (ภาพ 21) ประกอบด้วยถัง SO_2 ถังอากาศผสม ท่อบรรจุนำหัววัดก๊าซ โดยจะมีฮีตเตอร์ติดตั้งอยู่ เนื่องจากหัววัดก๊าซสามารถตอบสนองต่อ SO_2 ได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 475 องศาเซลเซียส โดยสามารถตอบสนองได้ในช่วงความเข้มข้น 2 ถึง 100 ppm

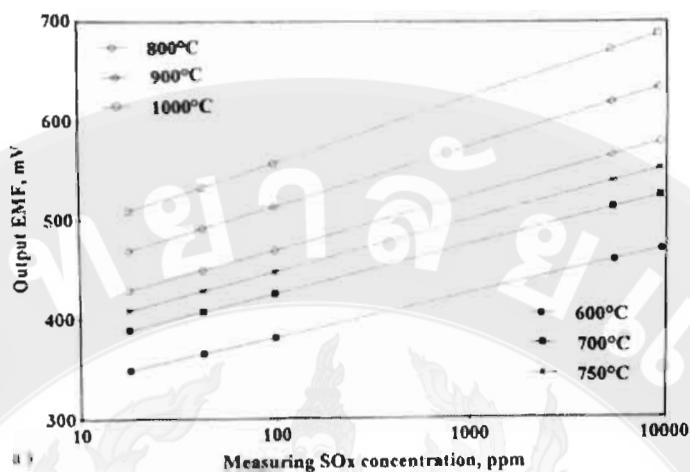


ภาพ 21 ระบบตรวจวัด SO_2

Zhuiykov (2000) พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณ SO_2 และ O_2 ในท่อไอเสีย โดยใช้หัวตรวจวัดร่วมกัน มีลักษณะการใช้งานดังภาพ 22 หัวของอุปกรณ์ตรวจวัดจะอยู่ในท่อไอเสีย และวัดปริมาณ SO_2 และ O_2 ใช้การตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัดเป็นแรงดันไฟฟ้าเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของ SO_2 โดยสามารถตรวจวัดได้ในช่วงความเข้มข้น 18 ถึง 10,000 ppm ที่อุณหภูมิ 650 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส โดยมีการตอบสนองเป็นลักษณะเชิงเส้นดังภาพ 23

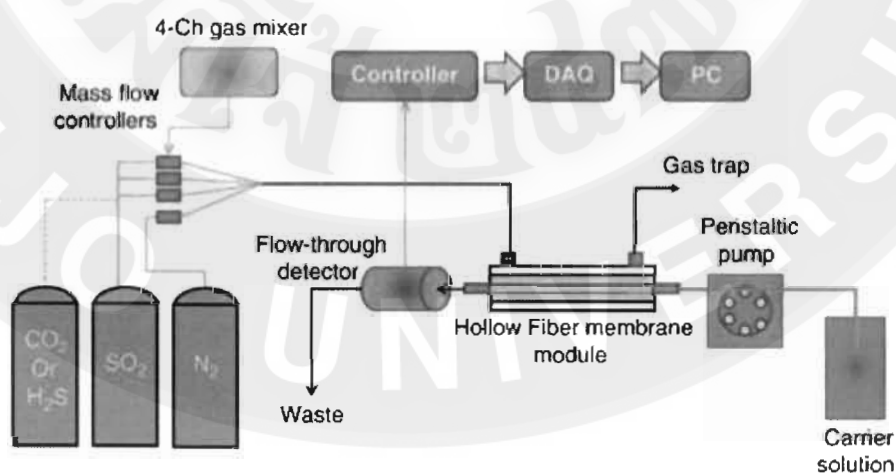


ภาพ 22 ตำแหน่งการติดตั้งและใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 และ O_2 ในท่อไอเสีย



ภาพ 23 การตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ที่ช่วงความเข้มข้น 18 ถึง 10,000 ppm อุณหภูมิ 650 ถึง 1,000 องศาเซลเซียส

Marzouk *et al.* (2009) พัฒนาระบบวิเคราะห์ SO_2 แบบต่อเนื่อง ดังภาพ 24 เมื่อ SO_2 ถูกปล่อยเข้ามายังระบบ จะผ่านรูของเชื้อเพลิงผ่าน จนไปถึงอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งมีการตอบสนองเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยมีคอนโทรลเลอร์ตรวจจับแรงดันที่ได้ เปลี่ยนสัญญาณแรงดันไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแบบดิจิทัลและส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ แล้วเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้กับความเข้มข้นของ SO_2 ระบบนี้จึงสามารถวิเคราะห์ปริมาณ SO_2 ได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีการแสดงผลแบบเวลาจริงผ่านคอมพิวเตอร์



ภาพ 24 ระบบวิเคราะห์ SO_2 แบบต่อเนื่อง

สรุปกรอบแนวความคิดในการทำวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยไม่พบการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ในช่วงความเข้มข้นสูง 2,000 ถึง 20,000 ppm สำหรับใช้ในกระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยสด มีเพียงแต่ช่วงความเข้มข้นไม่เกิน 10,000 ppm และยังพบว่า มีการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 อุปกรณ์ตรวจวัดที่ให้ค่าการตอบสนองในรูปแบบของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาปรับเทียบกับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3% ในช่วงความเข้มข้น 2,000 ถึง 20,000 ppm ได้ ดังนั้นด้วยวิธีการที่ได้ศึกษาทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ความเข้มข้นสูงในการรม SO_2 กับผลลำไยสด เพื่อรักษาคุณภาพของลำไยสดในระหว่างการเก็บรักษา

สมมติฐานการวิจัย

ในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณ SO_2 ผู้วิจัยมีแนวคิดในการหาความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของ SO_2 กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่มีการตอบสนองจากอุปกรณ์ตรวจวัด เมื่อ SO_2 มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ตอบสนองมีค่าเพิ่มขึ้น ปรับเทียบกับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ได้จากการไทเทรต เพื่อพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดความเข้มข้น SO_2 ในกระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยสด โดยทำการปรับเทียบกับวิธีการตรวจวัด SO_2 ด้วยการใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3% ในช่วงความเข้มข้นของ SO_2 ระหว่าง 2,000 ถึง 20,000 ppm

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุ อุปกรณ์ สารเคมีที่ใช้ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย พร้อมด้วยรายละเอียด โดยการวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ใช้ค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองของเซนเซอร์วัด SO_2 เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ได้จากการไทเทรต

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ห้องรม SO_2 กับผลล้าไลสด้วยระบบปล่อยแก๊ส SO_2 จากถังอัดความดัน โดยตรง
2. อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 รุ่น SO2-AE (Alphasense Ltd., Part, UK.)
3. อุปกรณ์แปลงสัญญาณ Analog เป็น Digital รุ่น MCP3551 (Microchip Inc, USA.)
4. แผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์เอนกประสงค์
5. ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น PIC16F887 (Microchip Inc, USA.)
6. SO_2 จากถังอัดความดัน
7. ท่อทรงกระบอก ปริมาตร 200 และ 2,000 มิลลิลิตร
8. กระบอกฉีดยาขนาด 6 และ 60 มิลลิลิตร
9. พัฒลมอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก
10. อุปกรณ์บันทึกข้อมูล (Data logger) Agilent รุ่น 34970A (Agilent Inc, USA)
11. จอแสดงผลอิเล็กทรอนิกส์แบบ LCD 16 × 2 (Electronics source Co., Ltd, THA)
12. ชุดวิเคราะห์ SO_2 ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3%

สารเคมี

1. อินดิเคเตอร์ ที่เป็นส่วนประกอบของ methylene blue กับ methyl red
2. ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) เข้มข้น 3%
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) เข้มข้น 0.1 N
4. น้ำกลั่น

วิธีการศึกษา

ศึกษาปัญหาการตรวจวัด SO_2 ในการรม SO_2 กับผลล้าไฮสค

ในการรม SO_2 กับผลล้าไฮสค ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับ ใช้ความเข้มข้นในช่วง 2,000 ถึง 20,000 ppm ในการรม และตรวจวัดพบว่าวิธีการตรวจวัดโดยใช้สารละลายไฮโครเจนเปอร์ออกไซด์ 3 % และหลอดตรวจวัด เนื่องจากเครื่องมือในการตรวจวัดมีราคาสูงและไม่เหมาะสมกับการใช้ตรวจวัด SO_2 ในกระบวนการรม SO_2 กับผลล้าไฮสคเช่น Bacharach PCA 2 Gas Analyzer (ภาพ 25) มีช่วงการวัด 0 ถึง 10,000 ppm ราคาไม่ต่ำกว่า 100,000 บาท (Professional equipment, 2009)



ภาพ 25 อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ยี่ห้อ Bacharach รุ่น PCA 2

ที่มา: Professional equipment (2009)

ศึกษาถึงความเป็นไปได้เบื้องต้น

จากการศึกษาในด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ พบว่า มีอุปกรณ์ที่รองรับการศึกษานี้ โดยมีเซนเซอร์ที่สามารถวัด SO_2 รุ่น SOS-AE (Alphasense Ltd., Part, UK.) (ภาพ 26) วัด SO_2 ได้ในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 2,000 ppm โดยจะนำมาปรับเทียบช่วงการวัดใหม่ในช่วง 0 ถึง 20,000 ppm สัญญาณที่ส่งออกมาจากเซนเซอร์ SO_2 จะมีการส่งค่าการตอบสนองผ่าน Transmitter board (ภาพ 27) ให้ค่ากระแสไฟฟ้าตอบสนองในช่วง 4 ถึง 20 mA ผ่านความต้านทาน 1,000 โอห์ม เปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้า เพื่อนำมาปรับเทียบกับความเข้มข้นของ SO_2 ที่ได้จากการไทเทรต ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีโอกาที่จะเป็นไปได้



ภาพ 26 หัวตรวจวัด SO_2 ยี่ห้อ Alphasense รุ่น SO2-AE

ที่มา: Alphasense (2009a)



ภาพ 27 Transmitter board สำหรับหัวตรวจวัด SO_2 รุ่น SO2-AE

ที่มา: Alphasense (2009b)

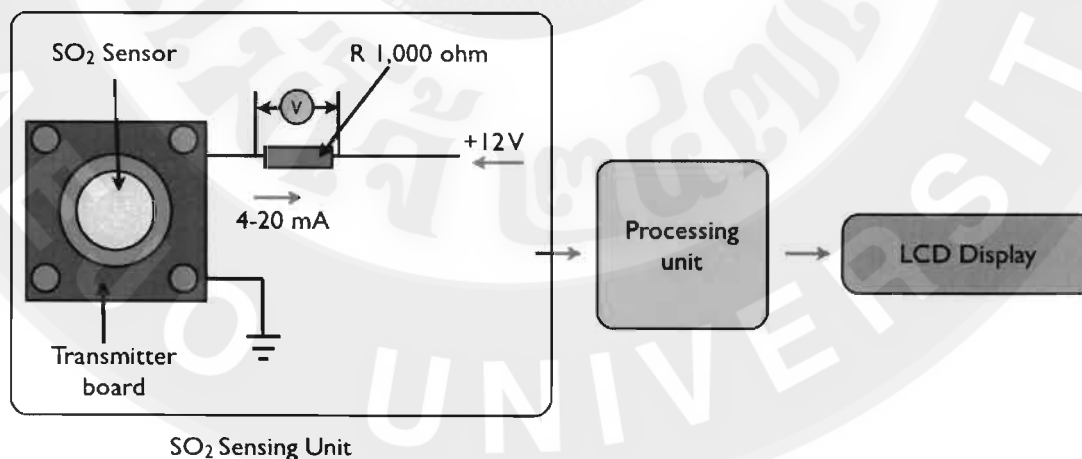
ด้วยเหตุนี้จึงได้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ที่ช่วงความเข้มข้น 2,000 ถึง 20,000 ppm เพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณ SO_2 ในกระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยสด ที่มีราคาถูก และสามารถใช้ทดแทน การใช้หลอดตรวจวัด (Gas Detector tube) และสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3 % เพื่อเป็นการ ลดต้นทุน ลดขั้นตอน และสะดวก สำหรับการตรวจวัด SO_2 ในกระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยสด เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรม และเพิ่มโอกาสทางธุรกิจให้แก่ผู้ประกอบการมากขึ้น

เกณฑ์ในการออกแบบ

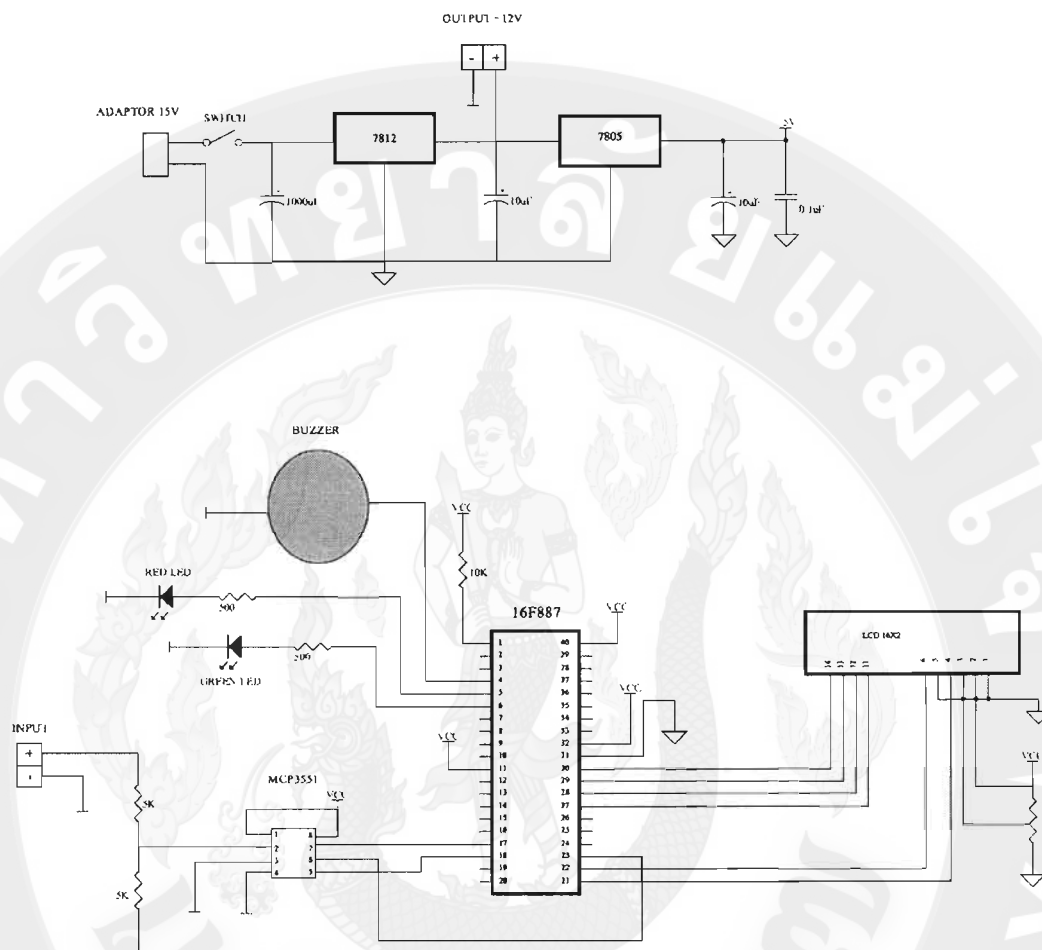
อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ความเข้มข้นสูงสามารถวัด SO_2 ได้ในช่วงความเข้มข้น 2,000 ถึง 20,000 ppm ในกระบวนการรวม SO_2 กับผลึกไฮสค โดยวัสดุของอุปกรณ์จะต้องมีความทนทานต่อการกัดกร่อนของ SO_2 สามารถพกพาได้ แสดงผลเป็นตัวเลขความเข้มข้นในหน่วย ppm

การออกแบบอุปกรณ์และระบบตรวจวัด SO_2

อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ความเข้มข้นสูงประกอบด้วยสองส่วน คือ หน่วยตรวจวัด SO_2 ที่มีเซนเซอร์วัด SO_2 รุ่น SO2-AE (Alphasense Ltd., Part, UK.) เชื่อมต่อกับ Transmitter board เพื่อส่งสัญญาณเป็นกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานขนาด 1,000 โอห์ม เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้า ตกคร่อมตัวต้านทาน (Sriyudthsak, 1995) ส่งมายังหน่วยประมวลผล และแสดงผลผ่านจอแบบ LCD ขนาด 16×2 (Electronics source Co., Ltd, THA.) (ภาพ 28) ซึ่งหน่วยประมวลผลของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 จะประกอบไปด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F887 (Microchip Inc, USA.) อุปกรณ์แปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นดิจิตอล รุ่น MCP3551 (Microchip Inc, USA.) และอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้าเพื่อทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปยังหน่วยตรวจวัด SO_2 และหน่วยประมวลผล มีการออกแบบวงจร โดยการทำ Schematic ดังภาพ 29



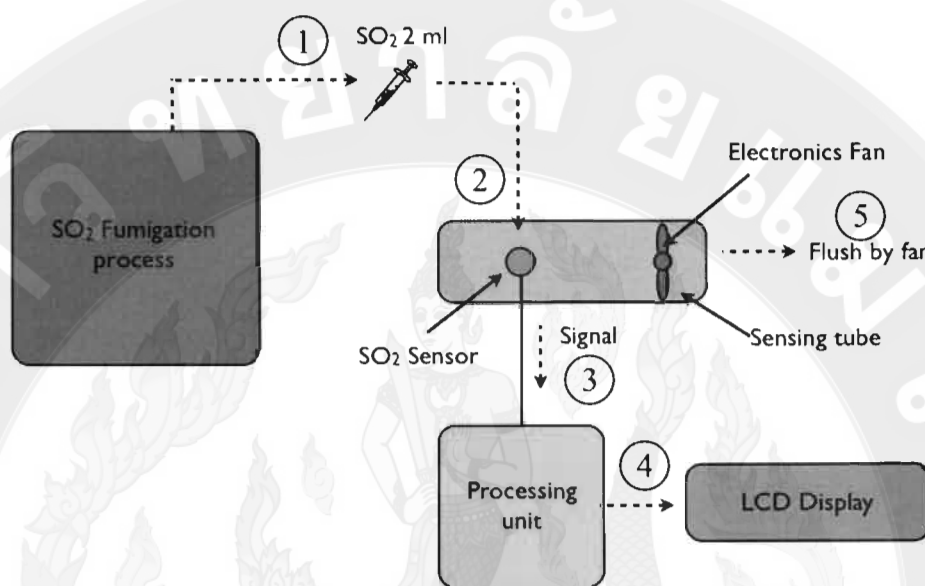
ภาพ 28 หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2



ภาพ 29 Schematic diagram สำหรับหน่วยประมวลผลของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2

ในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 จะต้องทำการสูมตัวอย่างเข้ามาในระบบตรวจวัด โดยมีการออกแบบระบบตรวจวัด ดังภาพ 30 ทำการสูมตัวอย่างโดยใช้กระบอกฉีดยาสูมตัวอย่าง SO_2 ในอากาศ จากห้องรม SO_2 ในระหว่างกระบวนการรม SO_2 กับผลลำไยสด 2 มิลลิลิตร (ตำแหน่งที่ 1 ใน ภาพ 30) และปล่อยเข้าไปในหน่วยตรวจวัด SO_2 (ตำแหน่งที่ 2 ใน ภาพ 30) ที่ทำจาก PVC ทนการกัดกร่อนของ SO_2 และสามารถนำมาใช้งานร่วมกับ SO_2 ได้ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 60°C (Plastic Pipe Institute, 2007) มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก ปริมาตร 200 มิลลิลิตร มีฝาปิดสนิททั้งสองด้าน ภายในจะติดตั้งเซนเซอร์ SO_2 และพัดลมเพื่อผสมอากาศภายในท่อ อุปกรณ์ตรวจวัดจะวัดปริมาณ SO_2 ส่งค่าตอบสนองไปยังหน่วยประมวลผล (ตำแหน่งที่ 3 ใน ภาพ 30) และแสดงผลเป็นตัวเลขความเข้มข้นในหน่วย ppm ผ่านจอแบบ LCD 16×2 (ตำแหน่งที่ 4 ใน ภาพ 30) และหลังจากการตรวจวัดในแต่ละครั้งจะทำการปล่อย SO_2 ในหน่วยตรวจวัดทิ้ง โดยพัดลมที่อยู่

ภายในกระบอกจะทำการปลดเอา SO_2 ออกมา (ตำแหน่งที่ 5 ใน ภาพ 30) เมื่อค่าที่วัดได้เป็นศูนย์จึงทำการตรวจวัดในครั้งต่อไป



ภาพ 30 การออกแบบระบบตรวจวัด SO_2

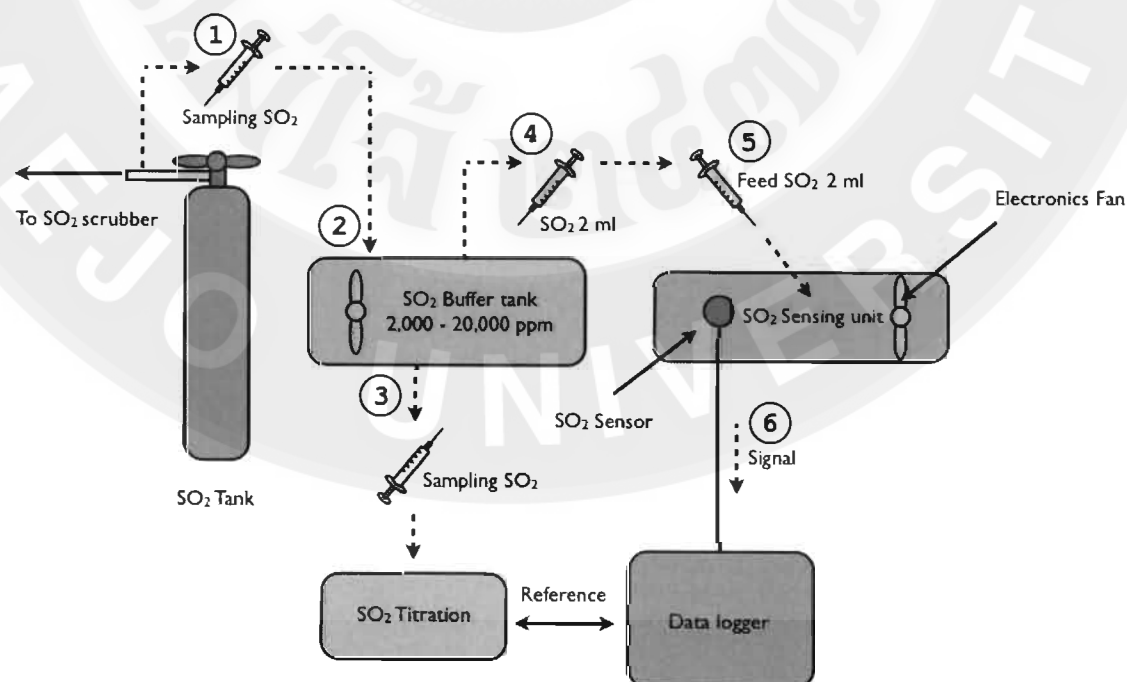
การทดสอบและวิเคราะห์ความไม่แน่นอน ของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ระดับห้องปฏิบัติการ

ในการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ในห้องปฏิบัติการ ดำเนินการโดยสร้างถังพักปรับความเข้มข้น (Buffer tank) ทำจาก PVC มีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีฝาปิดสนิททั้งสองด้าน ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร มีพัดลมสำหรับกวนอากาศอยู่ภายใน ทำการสูมตัวอย่าง SO_2 ความเข้มข้น 99% หรือ 990,000 ppm จากถังอัดความดันผ่านท่อนำแก๊สปล่อยทิ้งโดยกระบอกฉีดยา (ตำแหน่งที่ 1 ใน ภาพ 31) ปล่อยเข้าสู่ถังผสมเพื่อทำการปรับความเข้มข้นให้อยู่ในช่วง 2,000 ถึง 20,000 ppm (ตำแหน่งที่ 2 ใน ภาพ 31) จากนั้นจึงสูมตัวอย่าง SO_2 เพื่อทำการไทเทรตหาความเข้มข้นของ SO_2 (ตำแหน่งที่ 3 ใน ภาพ 31) และสูมตัวอย่าง SO_2 ปริมาตร 2 มิลลิลิตร (ตำแหน่งที่ 4 ใน ภาพ 31) ปล่อยเข้าสู่หน่วยตรวจวัดทรงกระบอกปริมาตร 200 มิลลิลิตร ที่ติดตั้งเซนเซอร์วัด SO_2 และพัดลมผสมอากาศอยู่ภายใน (ตำแหน่งที่ 5 ใน ภาพ 31) โดยนำค่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการตอบสนองของเซนเซอร์เชื่อมต่อและบันทึกข้อมูลโดย Data logger (รุ่น 34970A, Agilent Technology, Inc, USA) (ตำแหน่งที่ 6 ใน ภาพ 31) เปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นของ SO_2 ที่ได้จากวิธีการไทเทรต กับค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ได้จากหน่วยตรวจวัด และหลังจากการตรวจวัดในแต่ละครั้งจะทำการ

ปล่อย SO_2 ในหน่วยตรวจวัดทิ้ง โดยพัดลมที่อยู่ภายในกระบอกจะทำการพัดเอา SO_2 ออกมา เมื่อค่าที่วัดได้เป็นศูนย์จึงทำการตรวจวัดในครั้งต่อไป

ตาราง 3 ปริมาตรในการสู่ม SO_2 จากถังอัดความดัน

ระดับความเข้มข้นของ SO_2 (ppm)	ปริมาตรการสู่ม SO_2 จากถังอัดความดัน(ml)
2,000	4
4,000	8
6,000	12
8,000	16
10,000	20
12,000	24
14,000	28
16,000	32
18,000	36
20,000	40



ภาพ 31 ชุดทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2

ผลจากการทดสอบและสร้างอุปกรณ์เบื้องต้นในห้องปฏิบัติการได้นำไปทดสอบในภาคสนาม ประกอบไปด้วยการสร้างหน่วยประมวลผลและองค์ประกอบภายนอก เพื่อให้อุปกรณ์สามารถใช้งานได้จริงในภาคสนาม มีความทนทาน และปรับปรุงระบบให้สมบูรณ์โดยการแก้ไขข้อบกพร่องที่พบในการทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากนี้ ในการทดสอบจริงจะมีการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของระบบทั้งหมด ดังนี้

1. ความไม่แน่นอนที่เกิดจากการทดลองซ้ำ
เป็นค่าที่จะต้องนำมาทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเนื่องจากเป็นความไม่แน่นอนที่จัดอยู่ในประเภท A (Type A)
2. ความไม่แน่นอนของกระบอกณิกยาที่ใช้ในการสูดตัวอย่าง SO_2
ในการสูดตัวอย่างหากเกิดความคลาดเคลื่อนของปริมาณ SO_2 จากการสูดตัวอย่างโดยใช้กระบอกณิกยา จะทำให้ระบบการตรวจวัดเกิดความไม่แน่นอนขึ้นได้ จัดเป็นความไม่แน่นอน ประเภท B (Type B)
3. ความคลาดเคลื่อนของค่าความต้านทานอ้างอิง
ในการแปลงสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีค่าตอบสนองเป็นกระแสไฟฟ้า มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ความต้านทานอ้างอิงเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าให้เป็นแรงดันไฟฟ้า เพื่อบันทึกและนำค่าตอบสนองไปใช้งาน หากมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นก็จะส่งผลต่อความไม่แน่นอนในการประมวลผลค่าความเข้มข้น SO_2 ของระบบตรวจวัดได้ จัดเป็นความไม่แน่นอน ประเภท B (Type B)
4. ความไม่แน่นอนจากผู้ทำการวิจัย
ในการทำการทดลองอาจเกิดความไม่แน่นอนขึ้นจากตัวผู้วิจัยเองในการอ่านค่าการวัดต่างๆ ซึ่งส่งผลต่อความไม่แน่นอนในระบบการตรวจวัดได้ จัดเป็นความไม่แน่นอน ประเภท B (Type B)
5. ความไม่แน่นอนจากความละเอียด (resolution) ของอุปกรณ์
เป็นค่าที่จะต้องนำมาทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเนื่องจากเป็นความไม่แน่นอนที่จัดอยู่ในประเภท B (Type B)
6. ความไม่แน่นอนจากคู่มือการสอบเทียบของอุปกรณ์
เป็นค่าที่จะต้องนำมาทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเนื่องจากเป็นความไม่แน่นอนที่จัดอยู่ในประเภท B (Type B)
7. ความไม่แน่นอนจากความละเอียด (resolution) ของการไทเทรต
เป็นค่าที่จะต้องนำมาทำการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนเนื่องจากเป็นค่าที่ใช้ในการปรับเทียบของอุปกรณ์ตรวจวัดและจัดเป็นความไม่แน่นอนประเภท B (Type B)

การทดสอบและเก็บข้อมูลกับห้องรม SO₂ ระดับอุตสาหกรรม

ในการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ ได้นำมาทดสอบและเก็บข้อมูลภาคสนามกับการรม SO₂ กับผลลำไยสด โดยใช้ลำไยสดประมาณ 4,500 กิโลกรัม กับห้องรม SO₂ กับผลลำไยสด ด้วยระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับระดับอุตสาหกรรม ใช้วิธีการปล่อย SO₂ จากถังอัดความดัน (ภาพ 32) ที่พัฒนาโดย จักรพงษ์ และคณะ (2552) ทำการสูมตัวอย่าง SO₂ ทุก 10 นาที ตลอดช่วงเวลาการรม 60 นาที ใช้ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรมที่ 6,000 ppm 8,000 ppm และ 10,000 ppm ในการทดสอบจะทำการเปรียบเทียบกับวิธีการไทเทรต



ภาพ 32 ห้องรม SO₂ ที่ใช้ระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับในแนวตั้งระดับอุตสาหกรรม

การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลได้ใช้แบบจำลองทางสถิติแบบ Repeated measure design ดังสมการ 9

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + d_{ijk} + \kappa_l + (\kappa\alpha)_{il} + (\kappa\beta)_{jl} + (\kappa\gamma)_{kl} + e_{ijkl} \quad (9)$$

โดย

$$i = 1, 2, 3$$

$$j = 1, 2$$

$$k = 1, 2, 3$$

$$l = 0, 10, 20, \dots, 60$$

เมื่อ

- μ = ค่าเฉลี่ยโดยรวม (Overall mean)
 α_i = อิทธิพลจากระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม
 β_j = อิทธิพลจากปัจจัยของวิธีการตรวจวัด
 γ_k = อิทธิพลจากการทดลองซ้ำ
 d_{ijk} = ค่าความคลาดเคลื่อนจากการสุ่มตรวจวัดภายในระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวมต่างๆ
 κ_l = อิทธิพลจากปัจจัยเวลา
 $(\kappa\alpha)_{il}$ = อิทธิพลร่วมระหว่างระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวมกับเวลา
 $(\kappa\beta)_{jl}$ = อิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับวิธีการตรวจวัด
 $(\kappa\gamma)_{kl}$ = อิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับการทดลองซ้ำ
 e_{ijkl} = ค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง

ในการทดลองจะทำการทดสอบอุปกรณ์ภาคสนามที่ระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวมอยู่ 3 ระดับ คือ 6,000 ppm 8,000 ppm และ 12,000 ppm โดยทำซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง ในทุกระดับความเข้มข้น สุ่มตัวอย่าง SO_2 จากห้องรวม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาที ทำการปล่อย SO_2 ในหน่วยตรวจวัดทุกครั้งหลังจากตรวจวัด โดยพัดลมที่อยู่ภายในกระบอกระบบจะทำการพัดเอา SO_2 ออกมา เมื่อค่าที่วัดได้เป็นศูนย์จึงทำการตรวจวัดในครั้งต่อไป และทำการเปรียบเทียบข้อมูลที่ประมวลผลได้จากอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 กับ การไทเทรต ใช้กราฟให้เห็นแนวโน้มพร้อมทั้งแสดงความสัมพันธ์ทางสถิติ ด้วยโปรแกรม StatView 5.0 ที่ระดับความเชื่อมั่น $\alpha = 0.05$ โดยจะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อค่า p น้อยกว่า 0.05 และจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อค่า p มากกว่าหรือเท่ากับ 0.05 แล้วคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ตรวจวัดและความไม่แน่นอน (uncertainty)

สถานที่ดำเนินการวิจัย

การศึกษาและพัฒนาในภาคปฏิบัติได้ดำเนินการที่ ภาควิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ส่วนการทดสอบในภาคสนามได้ทดสอบที่ บริษัท ไทยองผลไม้ จำกัด โรงงานรม SO_2 กับผลลำไยสดระดับอุตสาหกรรมในอำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ โดยใช้ห้องรม SO_2 กับผลลำไยสด ด้วยระบบการหมุนเวียนอากาศแบบบังคับระดับอุตสาหกรรม

ระยะเวลาในการดำเนินงาน

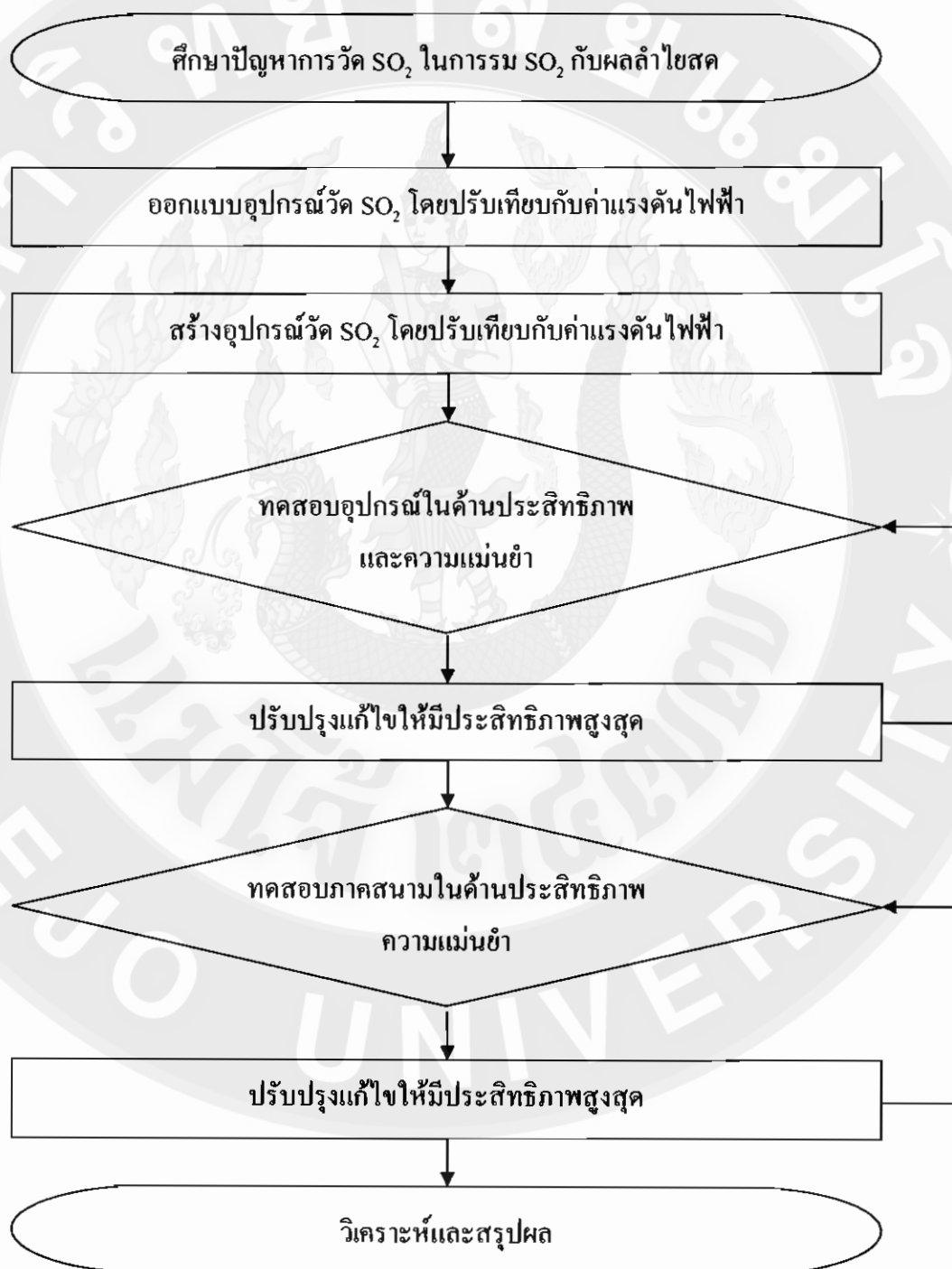
การศึกษานี้ใช้ระยะเวลา 1 ปี โดยมีรายละเอียดดังตาราง 4

ตาราง 4 รายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานของการทำวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาปัญหาการตรวจวัด SO ₂ ในการรวม SO ₂ กับผลกำไสด	■											
2. ออกแบบระบบและอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	■	■										
3. สร้างระบบและอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	■	■	■									
4. ทดสอบระบบและอุปกรณ์ตรวจวัด SO ₂	■	■	■	■								
5. ทดสอบและเก็บข้อมูลภาคสนาม	■	■	■	■	■							
6. วิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพ	■	■	■	■	■	■						
7. นำเสนอผลงานทางวิชาการ	■	■	■	■	■	■	■					
8. สรุปผลการทดลองและเขียนเล่มรายงาน	■	■	■	■	■	■	■	■				

แผนภูมิการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานของงานวิจัยตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการศึกษา แสดงดังภาพ 33



ภาพ 33 แผนผังการดำเนินงาน

งบประมาณที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้คาดว่าจะใช้งบประมาณดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. หมวดค่าจ้าง

ค่าจัดทำปกและเข้าเล่ม	5,000	บาท
-----------------------	-------	-----

2. หมวดวัสดุอุปกรณ์

ค่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	2,000	บาท
--------------------------	-------	-----

ค่าสารเคมี	8,000	บาท
------------	-------	-----

ค่าวัสดุ	10,000	บาท
----------	--------	-----

ค่าอุปกรณ์ตรวจวัด	15,000	บาท
-------------------	--------	-----

3. ค่าใช้จ่ายเบ็ดเตล็ด	5,000	บาท
------------------------	-------	-----

งบประมาณทั้งสิ้น	45,000	บาท
------------------	--------	-----

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

ผลการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2

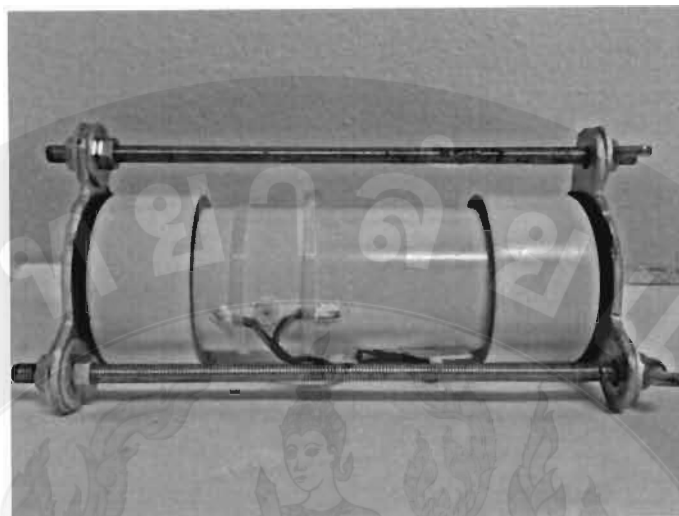
อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ประกอบด้วยสองส่วน คือ หน่วยตรวจวัด SO_2 และหน่วยประมวลผล มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

หน่วยตรวจวัด SO_2

หน่วยตรวจวัด SO_2 ที่สร้างขึ้นประกอบด้วย เซนเซอร์วัด SO_2 รุ่น SO2-AE Transmitter board และพัดลมไล่อากาศ เพื่อตรวจวัด SO_2 และส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าไปยังหน่วยประมวลผล ติดตั้งอยู่ภายในทรงกระบอกปริมาตร 200 มิลลิลิตร (ภาพ 34) มีปริมาตรที่วัดได้จริง 210 มิลลิลิตร ใช้ PVC เป็นวัสดุในการสร้างองค์ประกอบภายนอก เนื่องจากเป็นวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนของ SO_2 และสามารถนำมาใช้งานร่วมกับ SO_2 ได้ในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 60°C (Plastic Pipe Institute, 2007) มีฝาปิดทั้งสองด้าน เพื่อป้องกันการรั่วไหลของ SO_2 และมีรูปล่อยแก๊สที่ทำจากซิลิโคนความยืดหยุ่นสูงสำหรับปล่อย SO_2 เข้าสู่หน่วยตรวจวัด SO_2 (ภาพ 35)



ภาพ 34 การติดตั้งเซนเซอร์ SO_2 และพัดลมไล่อากาศในกระบอกตรวจวัด



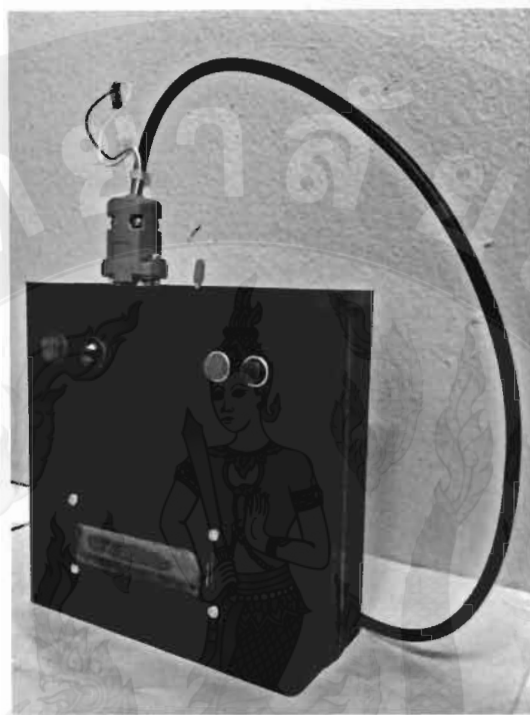
ภาพ 35 องค์ประกอบภายนอกของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2

หน่วยประมวลผล

หน่วยประมวลผลที่สร้างขึ้นเพื่อรับค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองจากหน่วยตรวจวัด SO_2 เพื่อแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นสัญญาณแบบดิจิตอล ประมวลผล และแสดงค่าความเข้มข้นของ SO_2 เป็นตัวเลขในหน่วย ppm ประกอบไปด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น PIC16F887 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ MCP3551 และจอแสดงผลแบบ LCD 16×2 ดังภาพ 36 และมีองค์ประกอบภายนอกเป็นทรงสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาด กว้าง 16 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร ยาว 18 เซนติเมตร มีสัญญาณไฟแสดงสถานะและมีปุ่มกดเพื่อควบคุมการทำงาน ดังภาพ 37

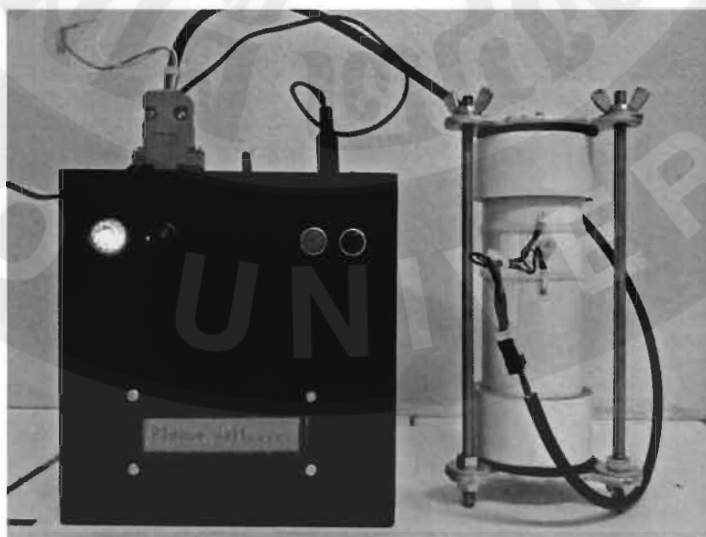


ภาพ 36 หน่วยประมวลผลของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2



ภาพ 37 ลักษณะภายนอกของหน่วยประมวลผลอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2

ในการทำงานของอุปกรณ์จะต้องทำการเชื่อมต่อหน่วยตรวจวัด SO_2 และหน่วยประมวลผลเข้าด้วยกันโดยจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 15 Volt เข้าไปที่หน่วยประมวลผล ดังภาพ 38



ภาพ 38 การเชื่อมต่อระหว่างกระบอกตรวจวัด SO_2 และหน่วยประมวลผล

ผลการทดสอบอุปกรณ์ในห้องปฏิบัติการและวิจารณ์

ในการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ในห้องปฏิบัติการได้ทำการสร้างถังผสมลักษณะเป็นทรงกระบอกที่มีฝาปิดทั้งสองด้าน ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรจริงที่วัดได้ 2,120 มิลลิลิตร มีรูที่ทำจากยางความยืดหยุ่นสูงเพื่อปล่อย SO_2 เข้าสู่ถังผสม (ภาพ 39) เพื่อปรับความเข้มข้นของ SO_2 จากถังอัดความดันที่มีความเข้มข้น 99% หรือ 990,000 ppm ให้อยู่ในช่วงความเข้มข้น 2,000 ถึง 20,000 ppm



ภาพ 39 ถังผสมทรงกระบอกปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร

ทำการเปรียบเทียบความเข้มข้นที่วัดได้จากการไทเทรตด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3% กับค่าความเข้มข้นที่คำนวณได้จากสมการ 9 ได้ผลการทดสอบดังตาราง 5

$$N_1 V_1 = N_2 V_2 \quad (9)$$

เมื่อ

- N_1 = ความเข้มข้นของ SO_2 ในถังอัดความดัน
- V_1 = ปริมาตรสุ่มของ SO_2 จากถังอัดความดัน
- N_2 = ความเข้มข้นของ SO_2 ในทรงกระบอก
- V_2 = ปริมาตรสุ่มของ SO_2 จากทรงกระบอก

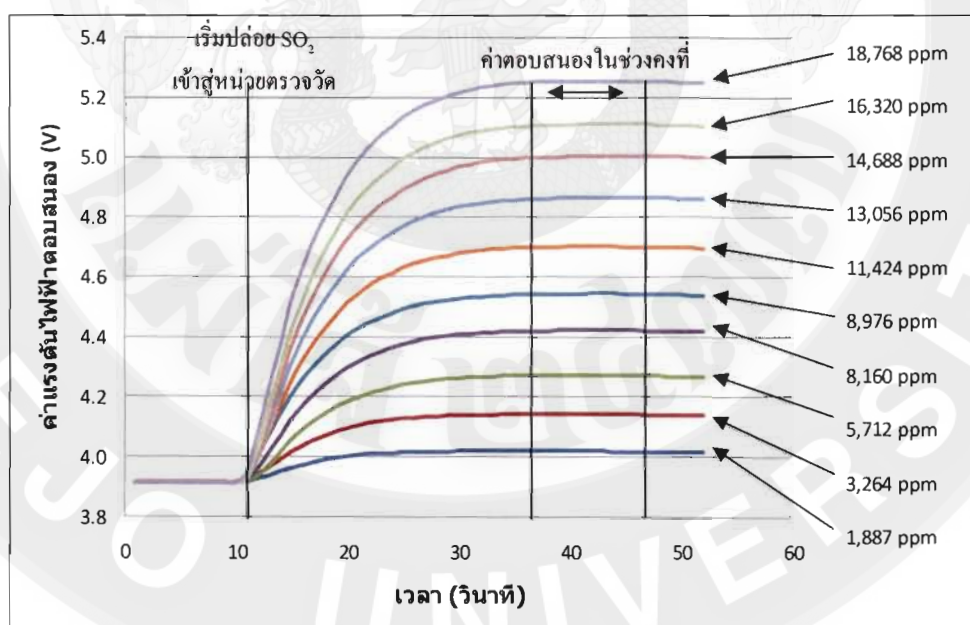
ตาราง 5 ผลการทดสอบค่าความเข้มข้นจากทรงกระบอกปริมาตร 2,120 มิลลิลิตร

ระดับความเข้มข้น SO ₂ (ppm)	ระดับความเข้มข้น SO ₂ จากการคำนวณ (ppm)	ระดับความเข้มข้น SO ₂ จากการไทเทรต (ppm)
2,000	1,887	-
4,000	3,773	3,264
6,000	5,660	5,712
8,000	7,546	8,160
10,000	9,433	8,976
12,000	11,320	11,424
14,000	13,206	13,056
16,000	15,093	14,688
18,000	16,979	16,320
20,000	18,866	18,768

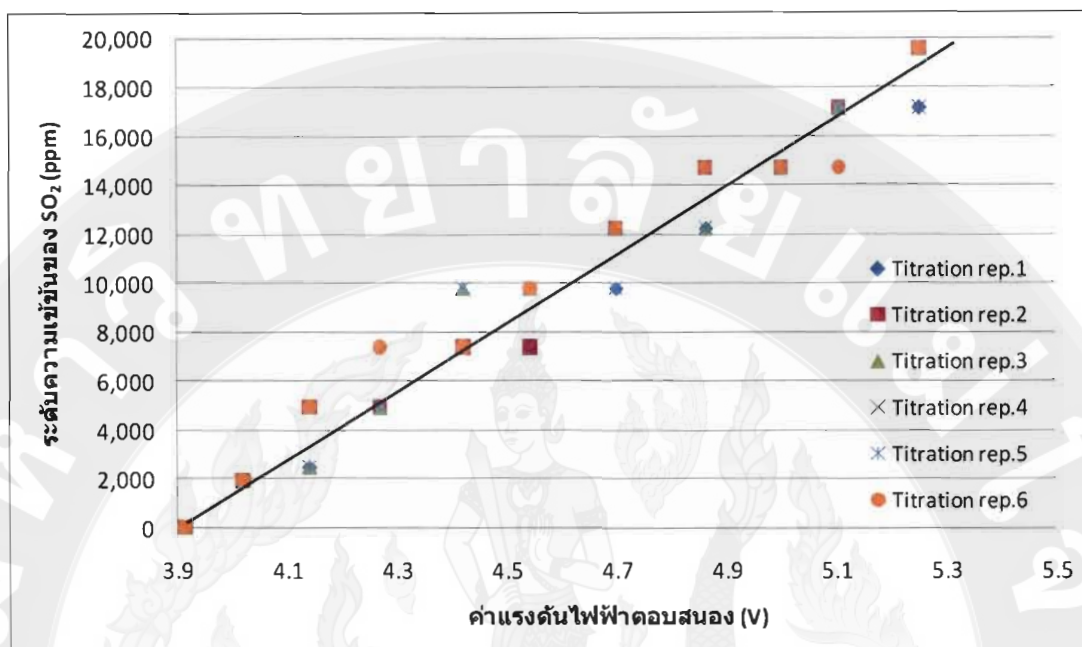
จากตาราง 5 ที่ระดับความเข้มข้น 2,000 ppm ไม่สามารถทำการไทเทรตได้ เนื่องจากระดับความเข้มข้นต่ำสุดที่วิธีการไทเทรตจะสามารถตรวจวัดได้ คือ ไม่ต่ำกว่า 4,000 ppm ซึ่งเป็นข้อจำกัดในการใช้วิธีวิเคราะห์ SO₂ ด้วยวิธีนี้ และเมื่อทำการวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นที่วัดได้จากวิธีการไทเทรตกับวิธีการคำนวณพบว่าไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วยเหตุนี้จึงนำค่าความเข้มข้นที่ระดับต่ำกว่า 4,000 ppm ที่ได้จากการคำนวณมาใช้ทดแทนค่าที่ไม่สามารถหาได้จากการไทเทรตได้ คือที่ระดับความเข้มข้นที่ 2,000 ppm จะใช้ค่าที่คำนวณได้คือ 1,887 ppm ในการเปรียบเทียบ

เมื่อทำการปรับความเข้มข้นให้อยู่ในช่วง 2,000 ถึง 20,000 ppm จากนั้นทำการสุ่ม SO₂ โดยใช้กระบอกฉีดยาสุ่มมา 2 มิลลิลิตร ปลอ่ยเข้าสู่หน่วยตรวจวัด SO₂ ที่สร้างขึ้นโดยเชื่อมต่ออยู่กับ Data logger Agilent รุ่น 34970A เพื่อเก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่ตอบสนองจากหน่วยตรวจวัด SO₂ โดยเก็บข้อมูลทุก 1 วินาทีเป็นเวลา 60 วินาที จำนวน 3 ครั้ง เทียบกับการไทเทรต 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ได้การตอบสนองดังภาพ 40 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหน่วยตรวจวัดเริ่มมีการตอบสนองหลังจากมีการปลอ่ย SO₂ เข้าสู่ระบบ ประมาณ 25 วินาที จากนั้นค่าที่วัดได้จะเริ่มคงที่ประมาณ 10 วินาที โดยสามารถตอบสนองได้ในช่วงความเข้มข้น 2,000 ถึง 20,000 ppm มีลักษณะเป็นแบบเส้นตรง มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2_{adj}) เท่ากับ 0.99 (ภาพ 41) ความคลาดเคลื่อนใน

การวัด ± 121 ppm หรือร้อยละ 0.67 ตลอดช่วงการวัด(ตาราง 6) เมื่อปรับเทียบกับวิธีการไทเทรตได้สมการเส้นตรงที่นำไปใช้ในการประมวลผลค่าความเข้มข้น SO_2 ได้ดังสมการ 10 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Syu and Liu (1998) ที่พบว่าเซนเซอร์ วัด SO_2 มีค่าตอบสนองเป็นกระแสไฟฟ้า โดยมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบเส้นตรง โดยเมื่อความเข้มข้นของ SO_2 เพิ่มมากขึ้นค่ากระแสไฟฟ้าตอบสนองก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ได้สมการที่ใช้ในการคำนวณความเข้มข้นของ SO_2 นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Suganuma *et al.* (1999) ที่มีผลการวิจัยไปในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่าเซนเซอร์ วัด SO_2 มีค่าตอบสนองเป็นแรงดันไฟฟ้า ระยะเวลาในการตอบสนองต่อการวัดในแต่ละครั้ง 40 วินาที และมีลักษณะการตอบสนองเป็นแบบเส้นตรง โดยเมื่อความเข้มข้นของ SO_2 เพิ่มมากขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองก็มีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ได้สมการในการคำนวณความเข้มข้นของ SO_2 เมื่อมีการตอบสนองของเซนเซอร์ตรวจวัดต่อปริมาณความเข้มข้นของ SO_2 จะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนอง เพื่อใช้ในการคำนวณปรับเทียบออกมาเป็นตัวเลขแสดงค่าความเข้มข้นของ SO_2 ในหน่วย ppm



ภาพ 40 การตอบสนองของหน่วยตรวจวัด SO_2



ภาพ 41 การตอบสนองของหน่วยตรวจวัด SO₂ ปรับเทียบกับความเข้มข้น SO₂ ด้วยวิธีไทเทรต

จากภาพ 41 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าตอบสนองของอุปกรณ์ตรวจวัด SO₂ ที่สร้างขึ้น มีแนวโน้มเป็นแบบเส้นตรง ในช่วง 2,000 ถึง 20,000 ppm สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhuikov (2000) ที่พบว่าอุปกรณ์ตรวจวัด SO₂ มีลักษณะการตอบสนองเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยเมื่อความเข้มข้น SO₂ เพิ่มมากขึ้น ค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองก็มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นโดยมีลักษณะเป็นแบบเส้นตรง (ภาพ 23)

$$C = (13,465 \times V) - 52,204 \quad ; R^2_{adj} = 0.99 \quad (10)$$

เมื่อ

C = ค่าความเข้มข้น SO₂

V = ค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนอง

จากสมการ 10 สร้างโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F887 สำหรับประมวลผลเมื่อทราบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนอง (V) จากหน่วยตรวจวัด หน่วยประมวลผลจะสามารถคำนวณความเข้มข้น SO₂ (V) และแสดงผลเป็นตัวเลขในหน่วย ppm ได้แบบอัตโนมัติ

ตาราง 6 การเปรียบเทียบความเข้มข้น SO_2 จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตในการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ

ระดับความเข้มข้น SO_2 (ppm)	ระดับความเข้มข้น SO_2 จากอุปกรณ์ (ppm)	ระดับความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต (ppm)
2,000	1,922 $\pm$ 126.47	1,887 (จากการคำนวณ)
4,000	3,556 $\pm$ 85.11	3,264 $\pm$ 1,264.14
6,000	5,281 $\pm$ 109.16	5,712 $\pm$ 1,264.14
8,000	7,330 $\pm$ 104.19	8,160 $\pm$ 1,264.14
10,000	8,966 $\pm$ 95.85	8,976 $\pm$ 1,264.14
12,000	11,092 $\pm$ 86.76	11,424 $\pm$ 1,264.14
14,000	13,299 $\pm$ 127.02	13,056 $\pm$ 1,264.14
16,000	15,154 $\pm$ 163.21	14,688 $\pm$ 0
18,000	16,582 $\pm$ 157.80	16,320 $\pm$ 1,264.14
20,000	18,547 $\pm$ 150.76	18,768 $\pm$ 1,264.14

*ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากการทดลอง 3 ครั้ง

จากตาราง 6 พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการไทเทรตมีเพียงค่าเดียว คือ $\pm 1,264$ ppm และที่ระดับความเข้มข้น 16,000 ppm ค่าความคลาดเคลื่อนของการไทเทรตมีค่า ± 0 เนื่องจากกระบวนการของวิธีการไทเทรตที่ใช้สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการดักจับ SO_2 และใช้ปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการไทเทรตมาคำนวณเป็นความเข้มข้น (สมการ 2) โดย ± 0.1 ml ของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน $\pm 2,448$ ppm จึงทำให้การไทเทรตมีความละเอียดต่ำและทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนดังตาราง 6 และเมื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย พบว่าค่าที่ได้จากการไทเทรตเฉลี่ยอยู่ที่ $\pm 1,444$ ppm หรือร้อยละ 8.02 ตลอดช่วงการวัด ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ± 121 ppm หรือร้อยละ 0.67 ตลอดช่วงการวัด ดังนั้นอุปกรณ์ตรวจวัดจึงมีความความคลาดเคลื่อนในการตรวจวัดต่ำกว่าการไทเทรต นำข้อมูลจากห้องปฏิบัติการไปสร้างโปรแกรมและบรรจุลงในหน่วยประมวลผล เพื่อใช้ประมวลผลค่าความเข้มข้น SO_2 ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F887 และแสดงผลเป็นตัวเลขในหน่วย ppm ทำการทดสอบเบื้องต้นกับห้องรม SO_2 กับผลล้าไฮสระดับอุตสาหกรรม โดยสูบลำตัวอย่าง SO_2 ด้วยกระบอกฉีดจากห้องรม 2 มิลลิลิตร ทุกๆ 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรม 60 นาที จำนวน 2 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเบื้องต้นดังตาราง 7

ตาราง 7 การเปรียบเทียบความเข้มข้น SO_2 จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ในการทดสอบเบื้องต้น ครั้งที่ 1

การทดสอบอุปกรณ์เบื้องต้นกับห้องรม SO_2 กับผลล้าไยสด ครั้งที่ 1			
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น SO_2 จาก อุปกรณ์ (ppm)	ความเข้มข้น SO_2 จาก การไทเทรต (ppm)	% คลาดเคลื่อน (%)
0	23,393	23,664	1.06
10	21,672	23,664	8.34
20	17,630	19,584	9.98
30	11,941	13,056	8.54
40	8,639	9,792	11.77
50	6,045	7,344	17.69
60	4,564	4,896	6.78

*ในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละครั้งในการทดสอบสามารถเก็บข้อมูลได้เพียงครั้งเดียว

ตาราง 8 การเปรียบเทียบความเข้มข้น SO_2 จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ในการทดสอบเบื้องต้น ครั้งที่ 2

การทดสอบอุปกรณ์เบื้องต้นกับห้องรม SO_2 กับผลล้าไยสด ครั้งที่ 2			
เวลา (นาที)	ความเข้มข้น SO_2 จาก อุปกรณ์ (ppm)	ความเข้มข้น SO_2 จาก การไทเทรต (ppm)	% คลาดเคลื่อน (%)
0	10,330	9,792	5.49
10	11,509	12,240	5.97
20	10,698	11,424	6.36
30	11,046	10,608	4.13
40	10,072	9,792	2.86
50	9,085	9,792	7.22
60	8,027	8,160	1.63

*ในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละครั้งในการทดสอบสามารถเก็บข้อมูลได้เพียงครั้งเดียว

จากตาราง 7 และ 8 เป็นผลจากการทดสอบอุปกรณ์เบื้องต้น โดยในการทดสอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 พบว่าปริมาณ SO_2 ที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับการไทเทรตแล้วพบว่ามีร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 9.16 และ 4.81 ตามลำดับ โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นสามารถยอมรับได้ เนื่องจากมีค่าไม่เกินช่วงความคลาดเคลื่อนจากความละเอียดของการไทเทรตที่มีความคลาดเคลื่อน $\pm 2,448$ ppm หรือร้อยละ 26.23 ตลอดช่วงการวัด 2,000 ถึง 20,000 ppm และเมื่อเปรียบเทียบในด้านของเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดพบว่า อุปกรณ์ตรวจวัดสามารถตรวจวัด SO_2 ได้เร็วกว่าการตรวจวัดด้วยวิธีการไทเทรต โดยเวลาในการตรวจวัดเฉลี่ยตั้งแต่ห้วงตัวอย่าง SO_2 จนถึงสิ้นสุดกระบวนการตรวจวัดด้วยการทำความสะอาดอุปกรณ์ของอุปกรณ์เท่ากับ 5 นาที ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าการไทเทรตที่ใช้เวลาในการตรวจวัดเฉลี่ย 12.3 นาที ดังตาราง 9 ซึ่งในการตรวจวัดและประมวลผลอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 เป็นแบบอัตโนมัติ ในขณะที่การตรวจวัดด้วยวิธีการไทเทรตต้องปฏิบัติโดยผู้วิจัย โดยในการตรวจวัดด้วยการไทเทรตจะต้องมีการเตรียมอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้เวลามากกว่า 1 ชั่วโมง ซึ่งในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ไม่จำเป็นต้องมีขั้นตอนดังกล่าว อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ที่พัฒนาขึ้นจึงมีความสะดวกและรวดเร็วในการตรวจวัดมากกว่าการไทเทรต

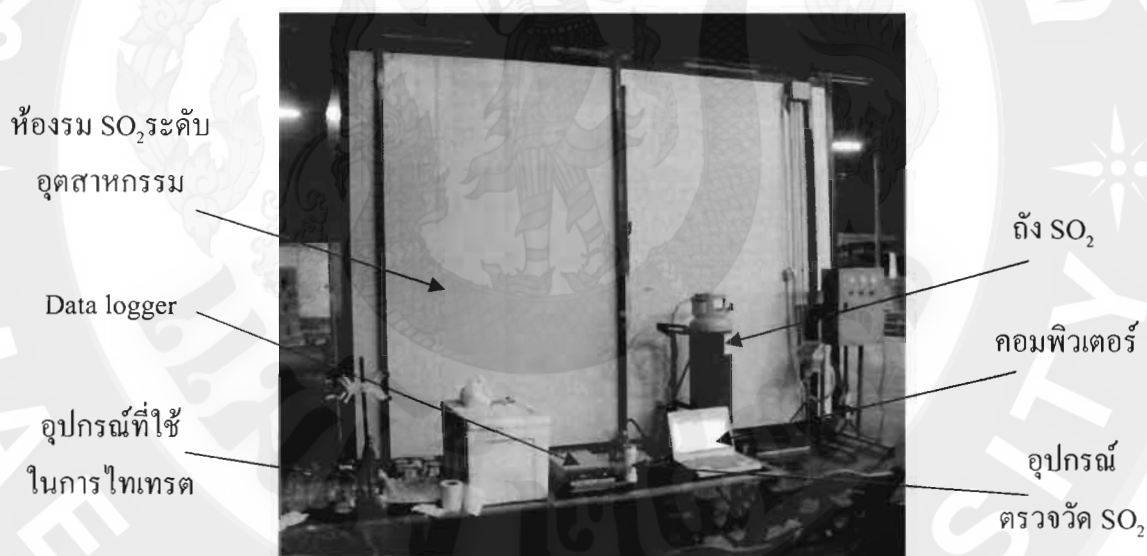
ตาราง 9 ระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์กับการไทเทรต

ขั้นตอนการตรวจวัด	ระยะเวลาการใช้อุปกรณ์ ตรวจวัด (นาที)	ระยะเวลาการไทเทรต (นาที)
-สู่มตัวอย่าง SO_2	0.1	0.3
-ตรวจวัดและประมวลผล	0.4	7
	(อัตโนมัติ)	(ปฏิบัติโดยผู้วิจัย)
-ทำความสะอาดอุปกรณ์	4.5	5
หลังจากตรวจวัดในแต่ละครั้ง	(เปิดฝาและใช้พัดลมไล่อากาศ)	(ล้างทำความสะอาดด้วยน้ำ)
รวม	5	12.3

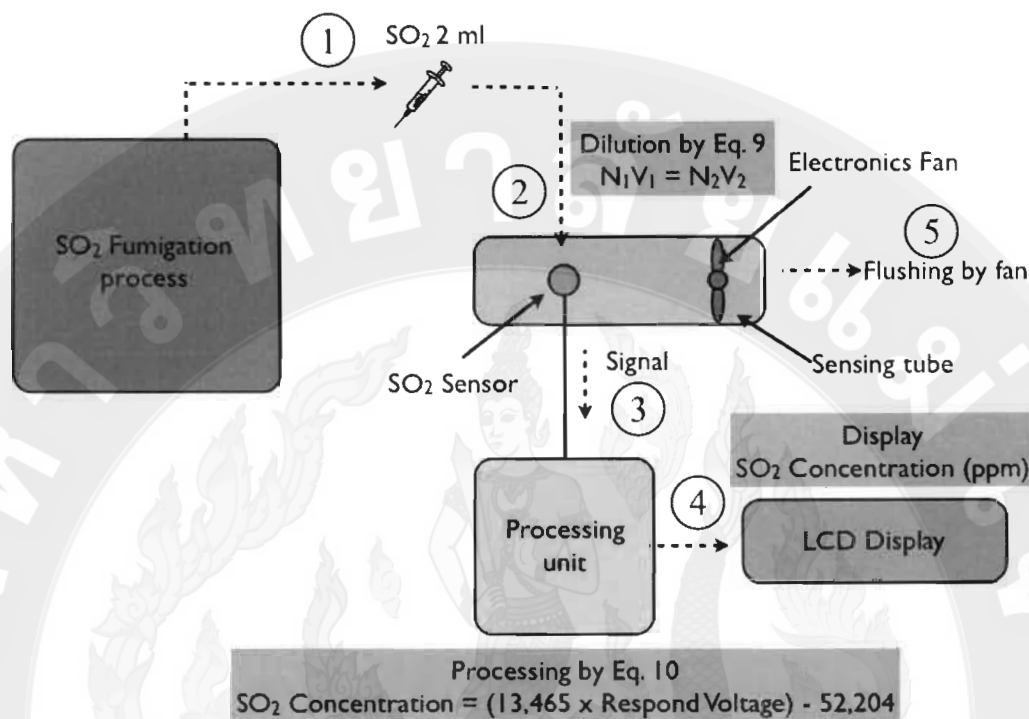
ผลการทดสอบ การเก็บข้อมูลภาคสนาม และวิจารณ์

ผลการทดสอบภาคสนามของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ความเข้มข้นสูงกับห้องรม SO_2 กับผลล้าไยสดแบบบังคับระดับอุตสาหกรรม ที่อำเภอจอมทอง จังหวัดเชียงใหม่ (ภาพ 42) ในระหว่างการรม SO_2 กับล้าไยสดพันธุ์คอ ประมาณ 4,500 กิโลกรัม ใช้ SO_2 จากถังอัดความดัน โดย

สู่มตัวอย่าง SO_2 ด้วยกระบอกฉีดยาจากห้องรม 2 มิลลิลิตร ทุกๆ 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรม 60 นาที และปล่อย SO_2 เข้าสู่หน่วยตรวจวัด SO_2 ส่งค่าการตอบสนองเป็นแรงดันไฟฟ้าไปยังหน่วยประมวลผลและแสดงค่าความเข้มข้นเป็นตัวเลขในหน่วย ppm ผ่านจอแสดงผลแบบ LCD 16×2 นำค่าความเข้มข้นที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดเปรียบเทียบกับที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรต โดยมีขั้นตอนการทำงาน การประมวลผล และการแสดงผล ของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ดังภาพ 43 ซึ่งทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ใช้ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรมที่ 6,000 ppm 8,000 ppm และ 12,000 ppm ได้ผลการทดสอบภาคสนามดังตาราง 10 ถึง 12 ตามลำดับ ซึ่งในการทดสอบภาคสนามสามารถเก็บข้อมูลในแต่ละช่วงเวลาได้เพียงค่าเดียวเท่านั้น เนื่องจากระยะเวลาในการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 1 ครั้ง จะใช้เวลา 5 นาที ซึ่งในการสู่มตัวอย่าง SO_2 จะสู่มทุกๆ 10 นาที จึงทำให้ตรวจวัดค่าความเข้มข้นของ SO_2 ได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น



ภาพ 42 การเก็บข้อมูลภาคสนามกับห้องรม SO_2 กับผลล้าโยสระดับอุตสาหกรรม



ภาพ 43 ขั้นตอนการทำงานและการประมวลผลของอุปกรณ์ตรวจวัด SO₂

จากภาพ 43 ทำการสู่มตัวอย่างโดยใช้กระบอกฉีดตัวอย่าง SO₂ ในอากาศจากห้องรม SO₂ ในระหว่างกระบวนการรม SO₂ กับผลล้าไฮสด 2 มิลลิลิตร (ตำแหน่งที่ 1 ใน ภาพ 43) และปล่อยเข้าไปในหน่วยตรวจวัด SO₂ (ตำแหน่งที่ 2 ใน ภาพ 43) โดยทำการเจือจางความเข้มข้นของ SO₂ (Dilute) ด้วยสมการ 9 เพื่อให้เซนเซอร์ SO₂ ที่บรรจุอยู่ภายในสามารถตรวจวัด SO₂ ได้ จากนั้นอุปกรณ์ตรวจวัดจะวัดปริมาณ SO₂ และส่งค่าตอบสนองไปยังหน่วยประมวลผล (ตำแหน่งที่ 3 ใน ภาพ 43) โดยจะนำค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองมาประมวลผลโดยใช้สมการ 10 เพื่อคำนวณค่าความเข้มข้นของ SO₂ จากค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนอง และแสดงผลเป็นตัวเลขความเข้มข้นในหน่วย ppm ผ่านจอแบบ LCD 16 × 2 (ตำแหน่งที่ 4 ใน ภาพ 43) และหลังจากการตรวจวัดในแต่ละครั้งจะทำการปล่อย SO₂ ในหน่วยตรวจวัดทิ้ง โดยพัดลมที่อยู่ภายในกระบอกจะทำการไล่ SO₂ ออกมา (ตำแหน่งที่ 5 ใน ภาพ 43) เมื่อค่าที่วัดได้เป็นศูนย์จึงทำการตรวจวัดในครั้งต่อไป

ตาราง 10 ความเข้มข้น SO_2 จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 6,000 ppm

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น SO_2 จากอุปกรณ์ (ppm)			ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต (ppm)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	17,284	24,863	25,776	18,768	26,112	25,296
10	17,294	25,209	24,543	18,360	25,296	24,480
20	13,919	20,835	21,584	12,240	22,848	22,848
30	11,137	13,712	14,086	11,424	14,688	13,056
40	6,035	9,968	10,586	7,344	11,424	11,404
50	8,017	8,529	8,736	8,538	9,792	9,732
60	5,932	6,257	6,561	7,344	7,344	7,344

*ในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละครั้งในการทดสอบสามารถเก็บข้อมูลได้เพียงครั้งเดียว

ตาราง 11 ความเข้มข้น SO_2 จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 8,000 ppm

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น SO_2 จากอุปกรณ์ (ppm)			ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต (ppm)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	19,713	23,639	22,675	24,480	25,296	25,296
10	31,170	23,274	24,270	32,640	26,928	28,560
20	25,695	19,681	21,795	26,928	22,032	21,216
30	16,962	15,597	18,247	20,400	17,952	18,768
40	14,646	11,224	14,945	17,136	13,872	17,136
50	10,845	9,686	12,629	13,056	12,240	13,056
60	8,317	8,272	8,987	10,608	9,792	9,792

*ในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละครั้งในการทดสอบสามารถเก็บข้อมูลได้เพียงครั้งเดียว

ตาราง 12 ความเข้มข้น SO_2 จากการใช้อุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรตทุกๆ 10 นาที ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น SO_2 จากอุปกรณ์ (ppm)			ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต (ppm)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0	26,749	27,510	27,719	31,008	29,376	29,376
10	30,223	24,852	35,127	35,904	26,112	36,720
20	25,045	22,819	30,386	26,112	26,928	29,376
30	18,865	18,686	23,664	22,848	21,216	24,480
40	14,267	13,893	19,572	15,504	17,136	19,584
50	12,179	10,568	14,723	13,872	15,504	15,912
60	11,536	8,940	12,209	11,424	11,424	11,424

*ในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละครั้งในการทดสอบสามารถเก็บข้อมูลได้เพียงครั้งเดียว

จากตาราง 10 ถึง 12 พบว่า ความเข้มข้นเริ่มต้นในกระบวนการรวม SO_2 กับผลล้าไยสด มีค่ามากกว่า 20,000 ppm เนื่องจากปริมาณความเข้มข้นที่ใช้ในกระบวนการรวมจะขึ้นอยู่กับปริมาณล้าไย ที่ต้องการจะรวม แต่อุปกรณ์ตรวจวัดยังสามารถตรวจวัดได้จนสิ้นสุดการรวม โดยความเข้มข้น SO_2 ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดเมื่อเปรียบเทียบกับผลการไทเทรตแล้วพบว่ามีความใกล้เคียงกัน และค่าความเข้มข้นสุดท้ายจากอุปกรณ์ตรวจวัดใกล้เคียงกับความเข้มข้นสุดท้ายที่ต้องการมากกว่าการไทเทรต ซึ่งในการรวมแต่ละครั้ง อาจเกิดความคลาดเคลื่อน เนื่องจากล้าไยที่เข้ามามีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละรอบการรวม แต่เมื่อพิจารณาในด้านของการตรวจวัดเปรียบเทียบกับระหว่างค่าความเข้มข้น SO_2 ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดกับการไทเทรต โดยการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Repeated measurement พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 (ตาราง 13) และทำให้ทราบถึงแนวโน้มของการตรวจวัดได้ ดังภาพ 44

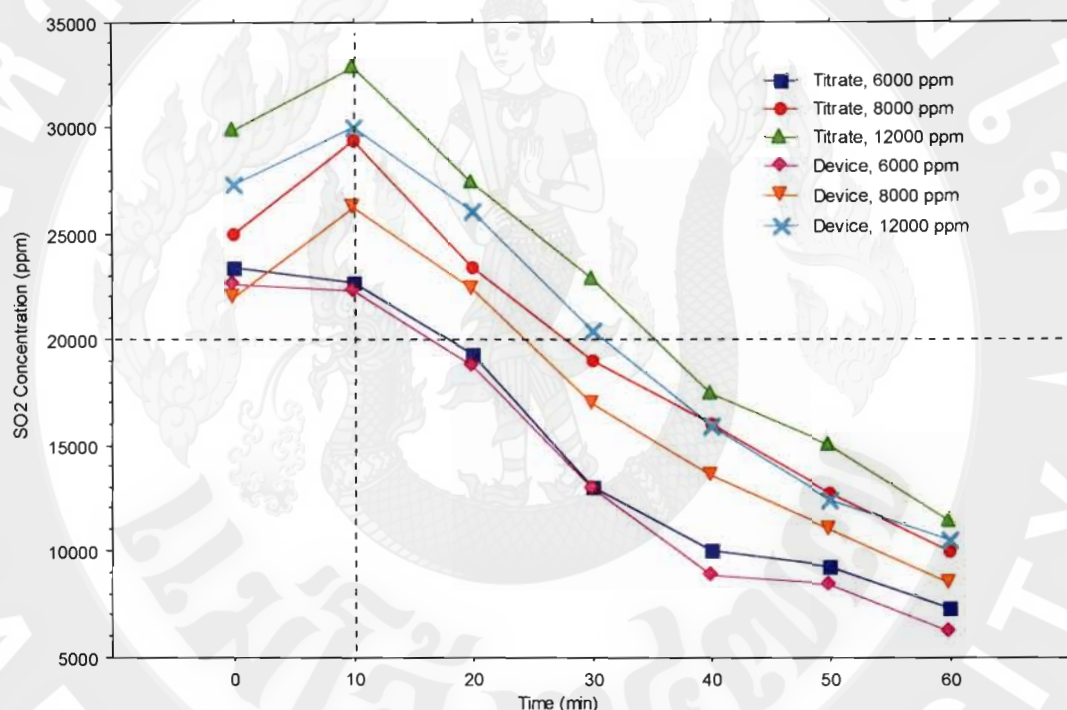
ตาราง 13 ผลการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ Repeated measurement ของอุปกรณ์ตรวจวัดในการทดสอบภาคสนาม

แหล่งความแปรปรวน	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-value	P-value
ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม					
อิทธิพลจากปัจจัยของวิธีการตรวจวัด	1	83288593.12	83288593.1	3.673	0.0794
อิทธิพลจากระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรม	2	956995490.11	478497745.0	21.101	0.0001*
อิทธิพลจากการทดลองซ้ำ	2	96981986.73	48490993.3	2.138	0.1606
ความแปรปรวนภายในกลุ่ม					
อิทธิพลจากปัจจัยเวลา	6	5420350969.98	903391828.3	278.567	<0.0001*
อิทธิพลร่วมระหว่างเวลา กับวิธีการตรวจวัด	6	5182130.87	863688.4	0.266	0.9508
อิทธิพลร่วมระหว่างระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรมกับเวลา	12	100214466.44	8351205.5	2.575	0.0067*
อิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับการทดลองซ้ำ	12	62859596.82	5238299.7	1.615	0.1065

* = ค่าทางสถิติแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อ $p < 0.05$

จากตาราง 13 เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติโดยพิจารณาจากอิทธิพลร่วมต่างๆพบว่า อิทธิพลของระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรมมีความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากการใช้ระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรมที่แตกต่างกันที่ 6,000 ppm 8,000 ppm และ 12,000 ppm อิทธิพลจากการทดลองซ้ำไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p \geq 0.05$) จากการทดลองรม SO_2 กับลำไยสดจำนวน 3 ครั้ง ในแต่ละระดับความเข้มข้นสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการรม อิทธิพลจากปัจจัยเวลา มีความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากระดับความเข้มข้นจะมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดกระบวนการรม (ภาพ 44) ค่าความเข้มข้นในแต่ละช่วงเวลาจึงมีความแตกต่างกัน อิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับวิธีการตรวจวัด ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แสดงว่าค่าความเข้มข้นในการตรวจวัดจากอุปกรณ์กับการไทเทรตในแต่ละช่วงเวลาและระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรมไม่มี

ความแตกต่างกัน อิทธิพลร่วมระหว่างระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรมกับเวลาที่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากต้องการใช้ระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรมที่แตกต่างกันที่ 6,000 ppm 8,000 ppm และ 12,000 ppm โดยที่ใช้เวลาในการรม 60 นาทีเท่ากัน ทำให้มีระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนสิ้นสุดกระบวนการ อิทธิพลร่วมระหว่างเวลากับการทดลองซ้ำไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แสดงว่าในการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้งในแต่ละช่วงเวลาของการตรวจวัดและระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรมไม่มีความแตกต่างกัน



ภาพ 44 แนวโน้มของการตรวจวัดความเข้มข้น SO_2 ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดเปรียบเทียบกับการไทเทรต

จากภาพ 44 พบว่าในช่วง 10 นาทีแรกของกระบวนการรม ค่าความเข้มข้น SO_2 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากหลังจากมีการปล่อย SO_2 เข้าสู่ห้องรม SO_2 ยังกระจายตัวได้ไม่ทั่วทั้งห้องรม แต่หลังจากนั้น ค่าความเข้มข้นของ SO_2 มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จนสิ้นสุดกระบวนการเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดกับค่าที่ได้จากการไทเทรตแล้ว พบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทั้ง 3 สภาวะ คือ ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรม ที่ 6,000 ppm 8,000 ppm และ 12,000 ppm และเมื่อหาปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกและเนื้อ ตามวิธี Modified Monier-Williams Method ได้ผลดังตาราง 14

ตาราง 14 ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกและเนื้อ ตามวิธี Modified Monier-Williams

ระดับความเข้มข้น SO_2 เมื่อสิ้นสุดการรม (ppm)	ระดับความเข้มข้น SO_2 เมื่อสิ้นสุดการรมที่วัด ได้จากอุปกรณ์ (ppm)	ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อ (ppm)	ปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือก (ppm)
6,000	$6,250 \pm 314.56$	43.50 ± 1.78	$1,863.90 \pm 140.20$
8,000	$8,525 \pm 400.45$	72.80 ± 31.73	$1,926.20 \pm 10.41$
12,000	$10,895 \pm 1,726.20$	92.50 ± 22.53	$2,143.10 \pm 137.62$

จากตาราง 14 พบว่า ความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมที่ระดับสูง จะส่งผลให้มีค่าปริมาณการตกค้างของ SO_2 ในเปลือกและเนื้อสูง ส่วนกรณีความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมที่ระดับต่ำ ค่าปริมาณการตกค้างของ SO_2 ในเปลือกและเนื้อก็จะมีค่าลดลงตามไปด้วย ซึ่งมีความสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ โดยที่ความเข้มข้น 12,000 ppm พบว่าค่าที่ได้จากอุปกรณ์มีความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งอาจจะเกิดจากความผิดพลาดในการสุ่มตัวอย่างและกระบวนการรมได้ แต่เมื่อพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนแล้วค่าที่ตรวจวัดได้ก็ยังคงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยช่วงความคลาดเคลื่อนยังอยู่ในช่วงของระดับของความละเอียดในการไทเทรตที่ $\pm 2,448$ ppm และยังคงมีความสอดคล้องกับปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อและในเปลือกอย่างเหมาะสม โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ จักรพงษ์ และคณะ (2553) พบว่า การใช้ SO_2 จากถังอัดความดันโดยตรงที่ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมสูง ทำให้มีปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกสูงกว่าปริมาณที่ระดับความเข้มข้นของ SO_2 หลังสิ้นสุดการรมต่ำ เนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของ SO_2 ที่สูงย่อมทำให้มีปริมาณ SO_2 ตกค้างสูงกว่าการใช้ความเข้มข้นของ SO_2 ที่ต่ำ

ผลการคำนวณค่าความไม่แน่นอนในการวัด

ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของอุปกรณ์ตรวจวัดได้ทำการคำนวณจากแหล่งความไม่แน่นอนต่างๆที่อาจจะเกิดขึ้นได้ในการใช้งานอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ความเข้มข้นสูงในระหว่างการรม SO_2 กับผลล้าไยสด สามารถคำนวณได้จากแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความไม่แน่นอนจากการทดลองซ้ำ

ความไม่แน่นอนจากการทดลองซ้ำสามารถคำนวณได้จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ± 0.00868 VDC คำนวณเป็นค่าความเข้มข้นได้เท่ากับ 121 ppm กับจำนวนข้อมูลทั้งหมด 330 ข้อมูล ดังนี้

$$U_A = \frac{121}{\sqrt{330}}$$

$$U_A = 6.66 \text{ ppm}$$

ความไม่แน่นอนจากใบสอบเทียบของเซนเซอร์ SO₂

ค่าความเข้มข้น SO₂ ที่ไม่แน่นอนจากใบสอบเทียบของเซนเซอร์ SO₂ เท่ากับ ± 5 ppm สามารถคำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนได้จาก

$$U_{B1} = \frac{U_{\text{certificate}}}{2}$$

$$U_{B1} = \frac{5}{2}$$

$$U_{B1} = 2.5 \text{ ppm}$$

ความไม่แน่นอนจากความละเอียด (Resolution) ของเซนเซอร์ SO₂

ค่าความเข้มข้น SO₂ ที่ไม่แน่นอนจากความละเอียดของเซนเซอร์ SO₂ เท่ากับ ± 2 ppm สามารถคำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนได้จาก

$$U_{B2} = \frac{\text{resolution}}{2\sqrt{3}}$$

$$U_{B2} = \frac{2}{2\sqrt{3}}$$

$$U_{B2} = 0.58 \text{ ppm}$$

ความไม่แน่นอนจากกระบอกฉีดยา

ในการใช้กระบอกฉีดยาเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง SO_2 จากห้องรมอาจมีความไม่แน่นอนจากการสุ่ม ± 0.2 มิลลิลิตร ตามมาตรวัดของกระบอกฉีดยา สามารถคำนวณเป็นความไม่แน่นอนในหน่วย ppm ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ได้ดังตาราง 15

ตาราง 15 ค่าความเข้มข้น SO_2 ที่ไม่แน่นอนจากกระบอกฉีดยาที่ระดับความเข้มข้น SO_2 2,000 ถึง 20,000 ppm เมื่อมีความคลาดเคลื่อนไป ± 0.2 มิลลิลิตร

ระดับความเข้มข้น SO_2 (ppm)	ความเข้มข้น SO_2 ที่ไม่แน่นอน (ppm)
1,928	± 1.836
3,264	± 3.109
5,712	± 5.440
8,160	± 7.771
8,976	± 8.549
11,424	± 10.880
13,056	± 12.434
14,688	± 13.989
16,320	± 15.543
18,768	± 17.874
รวม	± 97.425

นำค่าความเข้มข้นที่ไม่แน่นอนรวมคำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนได้จาก

$$U_{B3} = \frac{U_{es}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B3} = \frac{97.425}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B3} = 56.25 \text{ ppm}$$

ความไม่แน่นอนจากความต้านทานอ้างอิง

ทำการสุ่มตรวจวัดค่าความต้านทานอ้างอิง 1,000 โอห์ม จากร้านขายอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 3 แห่ง ในจังหวัดเชียงใหม่ พบว่ามีความแตกต่างกัน ± 0.001 โอห์ม สามารถคำนวณเป็นค่าความเข้มข้นได้ดังนี้

ที่ความต้านทาน 3.972 โอห์ม แรงดันไฟฟ้าตอบสนอง 4.100 V ได้ความเข้มข้นเท่ากับ $(13,465 \times 4.1) - 52,204 = 3,002$ ppm

ที่ความต้านทาน 3.971 โอห์ม แรงดันไฟฟ้าตอบสนอง 4.099 V ได้ความเข้มข้นเท่ากับ $(13,465 \times 4.099) - 52,204 = 2,988$ ppm

ที่ความต้านทาน 3.973 โอห์ม แรงดันไฟฟ้าตอบสนอง 4.101 V ได้ความเข้มข้นเท่ากับ $(13,465 \times 4.101) - 52,204 = 3,016$ ppm

ดังนั้นที่ค่าความต้านทาน ± 0.001 โอห์ม สามารถคำนวณเป็นค่าความเข้มข้นไม่แน่นอนได้เท่ากับ ± 14 ppm คำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนได้จาก

$$U_{B4} = \frac{U_{cs}}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B4} = \frac{14}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B4} = 8.08 \text{ ppm}$$

ความไม่แน่นอนจากพัลลมกวนอากาศ

ความเข้มข้นไม่แน่นอนที่เกิดจากพัลลมกวนอากาศ กำหนดให้เท่ากับ ± 50 ppm คำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนได้จาก

$$U_{B5} = \frac{50}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B5} = 28.87 \text{ ppm}$$

ความไม่แน่นอนจากผู้วิจัย

ความเข้มข้นไม่แน่นอนที่เกิดจากผู้วิจัย กำหนดให้เท่ากับ ± 48.71 ppm อ้างอิงจากการสุ่มตัวอย่างโดยใช้กระบอกลดึกษา คำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนได้จาก

$$U_{B6} = \frac{48.71}{\sqrt{3}}$$

$$U_{B6} = 28.12 \text{ ppm}$$

ความไม่แน่นอนจากความละเอียด (Resolution) ของการไทเทรต

ค่าความเข้มข้น SO_2 ที่ไม่แน่นอนจากความละเอียดของการไทเทรตเท่ากับ $\pm 2,448$ ppm สามารถคำนวณเป็นค่าความไม่แน่นอนได้จาก

$$U_{B7} = \frac{\text{resolution}}{2\sqrt{3}}$$

$$U_{B7} = \frac{2,448}{2\sqrt{3}}$$

$$U_{B7} = 706.68 \text{ ppm}$$

ความไม่แน่นอนรวมในการวัด

รวมความไม่แน่นอนในการวัดทั้งระบบแสดงได้ดังตาราง 16

ตาราง 16 ค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งความไม่แน่นอนในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด

แหล่งที่มาของความไม่แน่นอน	ค่าความเข้มข้น (ppm)	ค่าความไม่แน่นอน (ppm)
การทดลองซ้ำ	± 121	± 6.66
ใบสอบเทียบของเซนเซอร์ SO_2	± 5	± 2.50
ความละเอียดของเซนเซอร์ SO_2	± 2	± 0.58
กระบอกณ้ดขยา	± 97.42	± 56.25
ความต้านทานอ้างอิง	± 14	± 8.08
พัดลมกวนอากาศ	± 50	± 28.87
ผู้วิจัย	± 48.71	± 28.12
ความละเอียดของการไทเทรต	$\pm 2,448$	± 706.68

จาก ตาราง 13 สามารถคำนวณความไม่แน่นอนรวมทั้งระบบได้จาก

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_{B1}^2 + U_{B2}^2 + U_{B3}^2 + U_{B4}^2 + U_{B5}^2 + U_{B6}^2 + U_{B7}^2}$$

$$U_c = \sqrt{(6.66)^2 + (2.5)^2 + (0.58)^2 + (56.25)^2 + (8.08)^2 + (28.87)^2 + (28.12)^2 + (706.68)^2}$$

$$U_c = 710.14 \text{ ppm}$$

ขยายค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

$$U_{95\%} = 2 \times U_c$$

$$U_{95\%} = 2 \times 710.14$$

$$U_{95\%} = 1,420.28 \text{ ppm}$$

ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนของการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ $\pm 1,420 \text{ ppm}$ หรือคิดเป็นร้อยละ 7.89 ของช่วงการวัด ซึ่งเป็นค่าความไม่แน่นอนที่ยอมรับได้เนื่องจากความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นมีค่าต่ำกว่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความละเอียดของการไทเทรต ($\pm 2,448 \text{ ppm}$) และพบว่าค่าความไม่แน่นอนที่มากที่สุดเกิดขึ้นและมีอิทธิพลต่อความไม่แน่นอนโดยรวมคือค่าความไม่แน่นอนจากความละเอียดของการไทเทรต ซึ่งเป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการปรับเทียบของอุปกรณ์ตรวจวัดโดยมีความไม่แน่นอน ± 706.68 หรือร้อยละ 49.79 ของความไม่แน่นอนรวม ดังนั้นการใช้วิธีการหรือเครื่องมือในการปรับเทียบที่มีความละเอียดในการวัดที่สูงขึ้น จะทำให้ค่าความไม่แน่นอนโดยรวมของระบบตรวจวัดลดลงไปด้วย ซึ่งจะส่งผลทำให้ระบบตรวจวัดมีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น

การวิเคราะห์เศรษฐศาสตร์ใน

การใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ทดแทนการไทเทรต

หลังจากการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 เพื่อทดแทนการไทเทรตแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์เปรียบเทียบระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 กับการไทเทรต (ตาราง 17) โดยมีข้อกำหนดจำนวนครั้งในการตรวจวัดตามอายุการใช้งานของเซนเซอร์ SO_2 ที่สามารถใช้ตรวจวัดได้ทั้งหมด 50 ครั้ง

ตาราง 17 เปรียบเทียบต้นทุนระหว่างการตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 กับการไทเทรต

อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2		การไทเทรต	
รายการอุปกรณ์	ราคา (บาท)	รายการอุปกรณ์และสารเคมี	ราคา (บาท)
- เซนเซอร์ SO_2	3,000	- NaOH เข้มข้น 10%	2,500
- วงจรแปลงสัญญาณของเซนเซอร์ SO_2	6,000	- H_2O_2 เข้มข้น 30 %	7,000
- แผงวงจรหน่วยประมวลผลและแสดงผล	1,000	- อินดิเคเตอร์ (Methylene blue และ Methyl red)	1,500
- กระบอกฉีดยาที่ใช้ในการสู่มตัวอย่าง SO_2	1,000	- ชุดเครื่องแก้ว เช่น ขวดรูปชมพู่, กระบอกตวง, ขวดวัดปริมาตร	9,500
- องค์ประกอบภายนอกของอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2	1,000	- กระบอกฉีดยาที่ใช้ในการสู่มตัวอย่าง SO_2	1,500
รวม	12,000	รวม	22,000

จากตาราง 17 เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 กับการไทเทรตโดยใช้อายุการใช้งานของเซนเซอร์ SO_2 ที่ 50 ครั้งเป็นข้อกำหนดพบว่า การใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 มีต้นทุนที่ต่ำกว่า ประมาณ 10,000 บาท และเมื่อตรวจวัดครบ 50 ครั้งแล้วทำการเปลี่ยนเซนเซอร์ตรวจวัด SO_2 ในราคา 3,000 บาท เปรียบเทียบกับการซื้อสารเคมีที่ราคา 11,000 บาท การใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 จะช่วยลดต้นทุนในการตรวจวัดได้ถึง 8,000 บาท และมีจุดคุ้มทุนเมื่อทำการตรวจวัดทั้งหมด 75 ครั้ง นอกจากนี้ในการตรวจวัดค่า SO_2 ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ใช้ระยะเวลาในการตรวจวัด 5 นาที ในขณะที่ระยะเวลาในการตรวจวัดด้วยวิธีการไทเทรตใช้เวลาในการตรวจวัด 12.3 นาที และต้องเตรียมสารเคมีโดยใช้เวลาถึง 2 ชั่วโมง ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจึงลดระยะเวลาในการตรวจวัดลงได้ร้อยละ 59.35 และเวลาในการเตรียมการได้ถึงร้อยละ 91.67

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ผลการทดสอบการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ความเข้มข้นสูง ในกระบวนการรวม SO_2 กับผลล้าไฮสค เป็นการพัฒนาเพื่อให้ได้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ในช่วงความเข้มข้น 2,000 ถึง 20,000 ppm ที่เหมาะสมกับการตรวจวัดในการรวม SO_2 กับผลล้าไฮสค สามารถสรุปผลการทดสอบพร้อมทั้งปัญหาที่พบระหว่างการสร้าง และข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป ได้ดังนี้

สรุปผลการทดสอบ

อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ประกอบไปด้วยสองส่วนคือ หน่วยตรวจวัด SO_2 ประกอบไปด้วย เซนเซอร์วัด SO_2 เชื่อมต่ออยู่กับ Transmitter board บรรจุอยู่ภายในทรงกระบอกปริมาตร 210 มิลลิลิตร ทำจาก PVC ทนต่อการกัดกร่อนของ SO_2 เมื่อทำการสูบลมตัวอย่าง SO_2 ด้วยกระบอกฉีดยา 2 มิลลิลิตร เข้าสู่หน่วยตรวจวัด SO_2 จะส่งสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้าไปสู่ส่วนที่สอง คือ หน่วยประมวลผล ที่ประกอบไปด้วย อุปกรณ์แปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นดิจิตอลเพื่อส่งเข้าสู่ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F887 เพื่อประมวลผลความเข้มข้นของ SO_2 ที่ปรับเทียบระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับค่าความเข้มข้นของ SO_2 จากการไทเทรต และแสดงผลผ่านจอ LCD 16x2 เป็นตัวเลขในหน่วย ppm มีความคลาดเคลื่อนจากการตรวจวัด ± 121 ppm หรือร้อยละ 0.67 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2_{adj}) เท่ากับ 0.99 ตลอดช่วงการวัด 2,000 ถึง 20,000 ppm มีความไม่แน่นอนในการใช้อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ในระหว่างการรวม SO_2 กับผลล้าไฮสค $\pm 1,420$ ppm หรือร้อยละ 7.68 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นที่ได้จากอุปกรณ์กับการไทเทรตในระหว่างการรวม SO_2 กับผลล้าไฮสค ด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบบังคับระดับอุตสาหกรรม โดยการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ดังนั้นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจึงเหมาะสมกับใช้ในการตรวจวัดแบบความละเอียดต่ำ เนื่องจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีความไม่แน่นอนสูง ($\pm 1,420$ ppm) ซึ่งปรับเทียบจากการไทเทรตที่มีความละเอียดในการตรวจวัดต่ำ ($\pm 2,448$ ppm) อุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 สามารถใช้ทดแทนการตรวจวัดด้วยการไทเทรตและการใช้หลอดตรวจวัดได้ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการรวม SO_2 กับผลล้าไฮสค โดยอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 สามารถตรวจวัด ประมวลผล และแสดงผลได้แบบอัตโนมัติ ซึ่งรวดเร็วกว่าการไทเทรต ที่จะต้องจัดเตรียมสารเคมีและทำการไทเทรตโดยผู้วิจัย ซึ่งใช้เวลานานและมีขั้นตอนที่ยุ่งยาก

ข้อจำกัดของการศึกษา

การทำงานวิจัยนี้มีปัญหา และอุปสรรคเกิดขึ้นตลอดเวลา ปัญหาบางปัญหาสามารถแก้ไขได้ แต่บางปัญหาไม่สามารถแก้ไขได้ จึงได้รวบรวมปัญหาที่พร้อมคำแนะนำในการแก้ปัญหา ดังนี้

1. ในการปรับเทียบและการทดสอบไม่สามารถเปรียบเทียบกับเครื่องมือสอบเทียบมาตรฐานได้เนื่องจากมีราคาสูง จึงใช้วิธีการปรับเทียบกับวิธีที่นิยมใช้คือ การไทเทรตด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 3%
2. การทดสอบภาคสนามไม่สามารถทดสอบได้จำนวนหลายครั้ง เนื่องจากลำไยสดในช่วงการวิจัยมีปริมาณน้อยและมีราคาสูง

ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

จากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ยังมีประเด็นที่เห็นควรศึกษาและพัฒนาต่อขอเพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยในอนาคตต่อไป

1. ลดความคลาดเคลื่อนในการไทเทรตด้วยการ เจือจาง (Dilute) สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อเพิ่มความละเอียดในการไทเทรตให้สูงขึ้น
2. ควรมีการสอบเทียบกับเครื่องมือมาตรฐานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความแม่นยำให้อุปกรณ์ตรวจวัดมากขึ้น เช่น เครื่องแยกสารเนื้อเดียวประเภทแก๊ส (Gas Chromatography)
3. งานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการรวม SO_2 กับผลไม้ชนิดอื่นๆ ได้
4. ควรมีการออกแบบระบบการทำความสะอาดหลังจากใช้อุปกรณ์ตรวจวัดแล้ว เพื่อป้องกันการตกค้างของ SO_2 ที่อาจทำให้การตรวจวัดผิดพลาดได้ โดยใช้ ไนโตรเจน (N_2) ในการพัดเอา SO_2 ที่อยู่ในหน่วยตรวจวัดออกไป

แนวทางในการพัฒนาต่อในอนาคต

จากการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ความเข้มข้นสูงในกระบวนการรวม SO_2 กับผลลำไยสด พบว่ายังสามารถพัฒนาต่อขอเพื่อนำไปใช้เป็นเครื่องมือตรวจวัดมาตรฐานสำหรับการรวม SO_2 กับผลไม้สด เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและมาตรฐานการรวม SO_2 สร้างความน่าเชื่อถือให้กับผู้ประกอบการ เพื่อการส่งออกผลผลิตไปยังต่างประเทศ โดยการสอบเทียบเทียบเครื่องมือและปรับปรุงองค์ประกอบภายนอกให้ได้ตามหลักมาตรฐานสากล

บรรณานุกรม

จักรพงษ์ พิมพ์พิมล. 2542. เอกสารประกอบการสอนวิชาเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวผักและผลไม้.

เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 189 หน้า.

จักรพงษ์ พิมพ์พิมล จาคูพงศ์ วาฤทธิ์ และ สมเกียรติ จาคูรงค์ล้ำเลิศ. 2550. การรมซัลเฟอร์ได

ออกไซด์กับผลด้าไลสดด้วยระบบหมุนเวียนอากาศแบบ forced-air. รายงานวิจัยฉบับ
สมบูรณ์ สำนักงานกองทุนสนับสนุนงานวิจัย. 87 หน้า.

_____. 2552. การออกแบบห้องรมซัลเฟอร์ไดออกไซด์กับผลด้าไลสดด้วยระบบหมุนเวียน
อากาศแบบ forced-air ในระดับอุตสาหกรรม. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สำนักงาน
กองทุนสนับสนุนงานวิจัย. 32 หน้า.

ณัฐพงศ์ วิริโย พณิษฐ์ จิตตะยโสธร และพิพัฒน์ ลิ้มปัญญาภรณ์. 2545. เครื่องกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ได
ออกไซด์แบบแพดทาวเวอร์. โครงการวิศวกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 111 หน้า.

ศิธรณ์ นนธิรานภาพ. 2547. ความไม่แน่นอนในการวัดสำหรับการสอบเทียบเครื่องมือวัดทาง
ไฟฟ้า. โครงการฟิสิกส์และวิศวกรรม. 2 มีนาคม 2547. 4 หน้า.

ธีรนุช เจริญกิจ จักรพงษ์ พิมพ์พิมล และ สุชาติ ทองศรี. 2548. สถานการณ์คกค่างของซัลเฟอร์ได
ออกไซด์บนผลด้าไลสดที่จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน. เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการ
พืชสวนแห่งชาติ ครั้งที่ 5. 26-29 เมษายน 2548. ชลบุรี.

พาวิน มะโนชัย และวินัย วิริยะอลงกรณ์. 2543. พันธุ์ด้าไลในการผลิตด้าไล. สรรานาการพิมพ์.
เชียงใหม่.

พิทยา สรวมศิริ และ พาวิน มะโนชัย. 2545. การผลิตด้าไลนอกฤดูอย่างมีอาชีพ. ธนบรรณการ
พิมพ์. เชียงใหม่. 64 หน้า.

มานัส แจ่มจำรูญ. 2545. การวิเคราะห์ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในอากาศ. คู่มือการตรวจสอบโรงรม
ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ด้าไลสดสำหรับพนักงานตรวจประเมิน. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยีแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

รัตนา อัดตปัญญาญ. 2535. ซัลเฟอร์ไดออกไซด์และการควบคุมการใช้กับด้าไลสด. รายงานการ
ประชุมสัมมนาเรื่องเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวด้าไลเพื่อการส่งออก. คณะเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 26-27 มิถุนายน 2535. เชียงใหม่. หน้า 20-28.

ศูนย์เทคโนโลยีความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม. 2552. Tube and pump. [ระบบออนไลน์].

แหล่งข้อมูล: <http://www.safetechthailand.net>. (15 ตุลาคม 2553)

สดศรี เนียมเปรม. 2535. เอกสารประกอบการฝึกอบรม เรื่องชุดเฟอร์ไดออกไซด์และการวิเคราะห์หาปริมาณผลตกค้างในลำไยสด. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ. 78 หน้า.

สุภาพพัฒน์ คำวงษ์. มปป. ลำไย. สื่อส่งเสริมการเกษตร. กรมส่งเสริมการเกษตร. กรุงเทพมหานคร.

สถาบันอาหาร. 2541. คู่มือการอบรมวัน-อบแห้งลำไย พร้อมวิธีการผลิตและแบบแปลน. กรุงเทพฯ: 74 หน้า.

สวรินทร์ สีนะวิวัฒน์. 2548. ชุดเฟอร์ไดออกไซด์ในอาหาร. โครงการวิทยาศาสตร์ชีวภาพ. กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2546. มาตรฐานลำไย. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <http://www.acfs.go.th/standard/download/longans.pdf>. (11 ธันวาคม 2552)

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2553ก. นำเข้า-ส่งออกสินค้าเกษตรที่สำคัญ. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.oae.go.th/oae_report/export_import/export_result.pht. (11 มกราคม 2553)

_____. 2553ข. สถิติการส่งออกลำไยสดแช่แข็ง. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <http://www.oae.go.th/statistic/export/>. (20 มกราคม 2553)

อารีย์ แก้วเขียว. 2552. การตรวจวัดแก๊สโดยใช้หลอดตรวจแก๊ส หรือหลอดขับออก. สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 6. นนทบุรี.

อิศเรศ โกสีย์วัฒนา. 2547. ความไม่แน่นอนในการวัด. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <http://202.129.59.198/rdi/html/uncer.html>. (26 กันยายน 2553)

Agilent Inc, USA. 2009. 34970A Data Acquisition / Data Logger Switch Unit. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsp?cc=US&lc=eng&ckey=1000001313:epsg:pro&nid=-33640.536881544.00&id=1000001313:epsg:pro>. (19 October 2010)

Alphasense Ltd part, UK. 2009a. Sulfur dioxide sensors. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: http://www.alphasense.com/alphasense_sensors/sulfur_dioxide_sensors.html.

_____. 2009b. Transmitter board. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: http://www.alphasense.com/alphasense_sensors/sulfur_dioxide_sensors.html. (19 October 2010)

- Chou J. C. and W. L. Hsia. 2009. Study on the characteristics of the measurement system for pH array sensors. World academy of science. **Engineering and technology** (53).
- Ebarvia S. Benilda, Christina A. Binag and Fortunato Sevilla III. 2001. Surface and potentiometric properties of SO₂ sensor based on a hydrogel coated pH-FET. **Sensors and actuators** (B76). 644-652.
- Electronicsorce Co Ltd, THA. 2008. MCP3551.[ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <http://www.es.co.th/detail.asp?Prod=AT89C51AC2%2DRLTUM>. (19 December 2010)
- Getino J., J. Gutierrez, L. Ares, J.I. Robla, M. C. Horrillo, I. Sayago and J. A. Agapito. 1996. Integrated sensor array for gas analysis in combustion atmospheres. **Sensors and actuators** (B33). 128-133.
- Han D. M., Z. X. Wu, and Z. L. Ji. 2001. Effect of SO₂ treatment on the overall quality of longan fruits (cv.Shixia) during cold storage. **Acta Horticulturae** 558: 375-379.
- Jing-Shan D., and Po-Jen C. 2007. Amperometric sensor array for NO_x, CO, O₂ and SO₂ detection. **Sensors and actuators** (B122). 165-173.
- Lin H. T., S. J. Chen and Q. Z. Hong. 2001. A study of the shelf-life of cold-stored longan fruit. **Acta horticulturae** 558: 353-357.
- Agar, T., S. Paydas and F. Ekinici. 2006. Effect of harvest dates and forced air cooling on Post-harvest quality of apricot cv.Precoce Tyrinthe. **Acta Horticulturae** 701: 577-580.
- Li H., Q. Wang, J. Xu, W. Zhang and L. Jin. 2002. A novel nano-Au-assembled amperometric SO₂ gas sensor: preparation, characterization and sensing behavior. **Sensors and actuators** (B87). 18-24.
- Marzouk A.M. A., Al-Marzouqi H. M. and Baomran M.S.M. S. 2009. Simple analyzer for continuous monitoring of sulfur dioxide in gas streams. **Microchemical**: article in press.
- Microchip Inc, USA. 2009. PIC16F887. [ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010241>. (19 August 2010)
- Pichmaier J. 1995. Compensation of the influence of humidity on the measurement of an SO₂ sensor by signal processing. **Sensors and actuators** (B26-27). 286-288.

- Plastic Pipe Institute. 2007. Chemical resistance data for thermoplastic piping in non-pressure applications and data table. **Chemical resistance of thermoplastics piping materials** 44:43.
- Professional equipment Inc,USA. 2009. Bacharach PCA 2 Gas Combustion Analyzer.
[ระบบออนไลน์]. แหล่งข้อมูล: <http://www.professionalequipment.com/bacharach-pca-2-combustion-gas-analyzer-o2-co-so2-24-8353/sulfur-dioxide-detectors>.
(19 April 2010)
- Ravi S. D. and S. Sriraman . 1999. Chemically modified sensor for amperometric determination of sulphur dioxide. **Sensors and actuators** (B55). 191-194.
- Ravi S. D., N. Uehera and T. Kato. 2002. Determination of sulfur dioxide based on silver dispersed functional self-assembled electrochemical sensor. **Sensors and actuators** (B87). 442-447.
- Ruan C., K. G. Ong, C. Mungle, M. Paulose, N. J. Nickl and C. A. Grimes. 2003. A wireless pH sensor based on the use of salt-independent micro-scale polymer spheres. . **Sensors and actuators** (B96). 61-69.
- Sriyudthsak M., "Fabrication of Sulphur Dioxide Gas Sensor", Proceeding of the 18th Conference on Electrical Engineering, Ambassador City Hotel, Chomtien, Chonburi, 22-24 November 1995.
- Suganuma Shigeaki, Misa Watanabe, Tuiyoshi Kobayashi and Shin-ichi Wakabayashi. 1999. SO₂ gas sensor utilizing stabilized zirconia and sulfate salts with a new working mechanism. **Solid state ionics** (126). 175-179
- Syu Mei-Jywan and Jwo-Ying Liu. 1998. Neural network signal detection of an SO₂ electrode. **Sensors and actuators** (B49). 186-194.
- Zhuikov S. 2000. Development of dual sulfur oxides and oxygen solid state sensor for "in situ" measurements. **Fuel** (79). 1255-1265.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบอุปกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการ

ผลการทดสอบอุปกรณ์ระดับห้องปฏิบัติการ

การทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ระดับห้องปฏิบัติการ ทำโดยการสร้างถังผสมทรงกระบอกปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร สร้างจาก PVC ที่ทนต่อการกัดกร่อนของ SO_2 มีฝาปิดทั้งสองด้าน มีพัดลมกวนอากาศอยู่ภายใน มีรูสำหรับปล่อย SO_2 เข้าสู่ภายใน สร้างขึ้นเพื่อปรับความเข้มข้น SO_2 ให้อยู่ในช่วง 2,000 ถึง 20,000 ppm โดยมีปริมาตรจริง 2,120 มิลลิลิตร โดยการสูม SO_2 จากถังอัดความดัน มีปริมาตรในการสูม SO_2 ด้วยกระบอกฉีดยา เพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่ระดับต่างๆ ในช่วง 2,000 ถึง 20,000 ppm ดังตารางผนวก 1

ตารางผนวก 1 ค่าความเข้มข้นที่ปรับได้จากการสูม SO_2 จากถังอัดความดันในทรงกระบอกปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร

ปริมาตรในการสูม SO_2 จาก ถังอัดความดัน(ml)	ค่าความเข้มข้น SO_2 จากการ คำนวณ ((ppm)	ค่าความเข้มข้น SO_2 จากการ ไทเทรต (ppm)
4	1,887	-
8	3,773	3,264
12	5,660	5,712
16	7,546	8,160
20	9,433	8,976
24	11,320	11,424
28	13,206	13,056
32	15,093	14,688
36	16,979	16,320
40	18,866	18,768

จากนั้นทำการสูม SO_2 ด้วยกระบอกฉีดยาปริมาตร 2 มิลลิลิตรปล่อยเข้าสู่หน่วยตรวจวัดทรงกระบอกปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยภายในบรรจุเซนเซอร์วัด SO_2 เชื่อมต่อกับ Data logger Agilent เพื่อบันทึกค่า แรงดันไฟฟ้าตอบสนองของเซนเซอร์ ทุกๆ 1 วินาที และเปรียบเทียบกับไทเทรต โดยได้ผลการทดสอบที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ดังต่อไปนี้

ระดับความเข้มข้น 2,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 2 3 และ 4 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 1 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวินาที 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 2 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 2,000 ppm ครั้งที่ 1

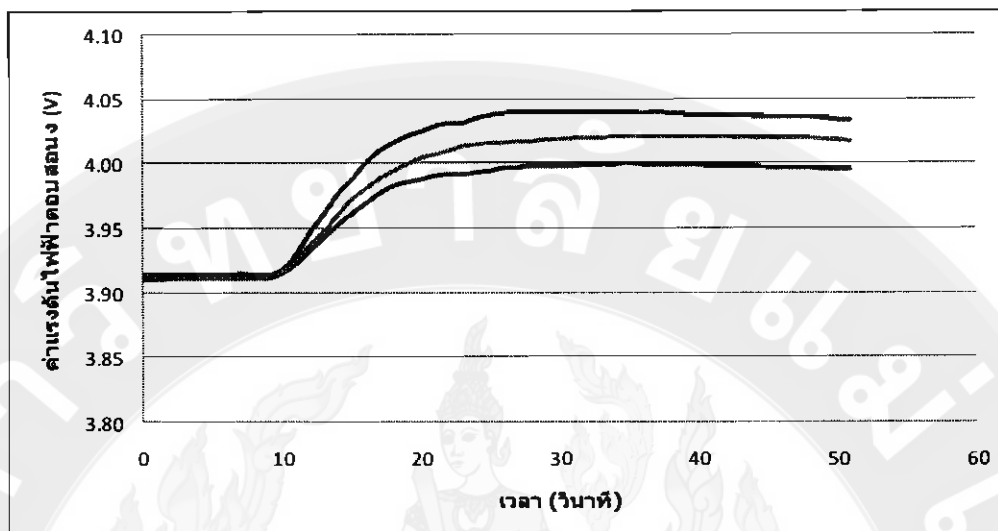
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.913202	19	3.994300	37	4.020854
2	3.912948	20	3.999532	38	4.021001
3	3.912937	21	4.004395	39	4.020864
4	3.912589	22	4.007207	40	4.020684
5	3.912314	23	4.009490	41	4.020758
6	3.912472	24	4.013063	42	4.020420
7	3.912874	25	4.014384	43	4.020452
8	3.912758	26	4.015706	44	4.020251
9	3.912441	27	4.016361	45	4.020188
10	3.912811	28	4.017302	46	4.019659
11	3.916003	29	4.017619	47	4.019807
12	3.925400	30	4.018232	48	4.019437
13	3.936278	31	4.018644	49	4.019268
14	3.948117	32	4.019574	50	4.018792
15	3.960854	33	4.019796	51	4.018211
16	3.972852	34	4.020082	52	4.017133
17	3.980611	35	4.020399		
18	3.988581	36	4.020832		

ตารางผนวก 3 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 2,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.910390	19	3.982662	37	4.000061
2	3.910506	20	3.986182	38	3.999945
3	3.910834	21	3.988148	39	4.000029
4	3.911384	22	3.990981	40	3.999871
5	3.911341	23	3.991953	41	3.999332
6	3.911680	24	3.991964	42	3.998750
7	3.910771	25	3.993602	43	3.998655
8	3.910971	26	3.994723	44	3.998222
9	3.911606	27	3.996382	45	3.998095
10	3.911130	28	3.997144	46	3.997291
11	3.915104	29	3.998179	47	3.997144
12	3.922240	30	3.998201	48	3.996879
13	3.932430	31	3.998518	49	3.996382
14	3.942060	32	3.998444	50	3.996171
15	3.952334	33	3.999226	51	3.996055
16	3.961626	34	3.999490	52	3.995748
17	3.969723	35	3.999786		
18	3.976605	36	4.000114		

ตารางผนวก 4 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 2,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.914269	19	4.016012	37	4.039056
2	3.913910	20	4.021414	38	4.039585
3	3.914502	21	4.024553	39	4.039046
4	3.914238	22	4.028972	40	4.038507
5	3.914248	23	4.030674	41	4.037788
6	3.914280	24	4.031435	42	4.037851
7	3.914206	25	4.034828	43	4.037629
8	3.914386	26	4.037862	44	4.037301
9	3.91409	27	4.038496	45	4.036593
10	3.914206	28	4.039458	46	4.036445
11	3.917874	29	4.039564	47	4.036223
12	3.929533	30	4.039976	48	4.035663
13	3.946869	31	4.039997	49	4.035462
14	3.962081	32	4.040103	50	4.034521
15	3.976393	33	4.040293	51	4.033982
16	3.988687	34	4.040325	52	4.033337
17	4.000399	35	4.040293		
18	4.009427	36	4.039796		



ภาพผนวก 1 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 2,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 2,000 ppm ได้ผลการทดสอบ ดังตารางผนวก 5

ตารางผนวก 5 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 2,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
-	-	-	-	-	-

ที่ระดับความเข้มข้น 2,000 ppm ไม่สามารถทราบค่าได้ เนื่องจากเป็นข้อจำกัดของการไทเทรต ที่ไม่สามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของ SO_2 ที่ระดับความเข้มข้นต่ำกว่า 4,000 ppm ได้

ระดับความเข้มข้น 4,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 6 7 และ 8 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 2 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวันที่ 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 6 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 4,000 ppm ครั้งที่ 1

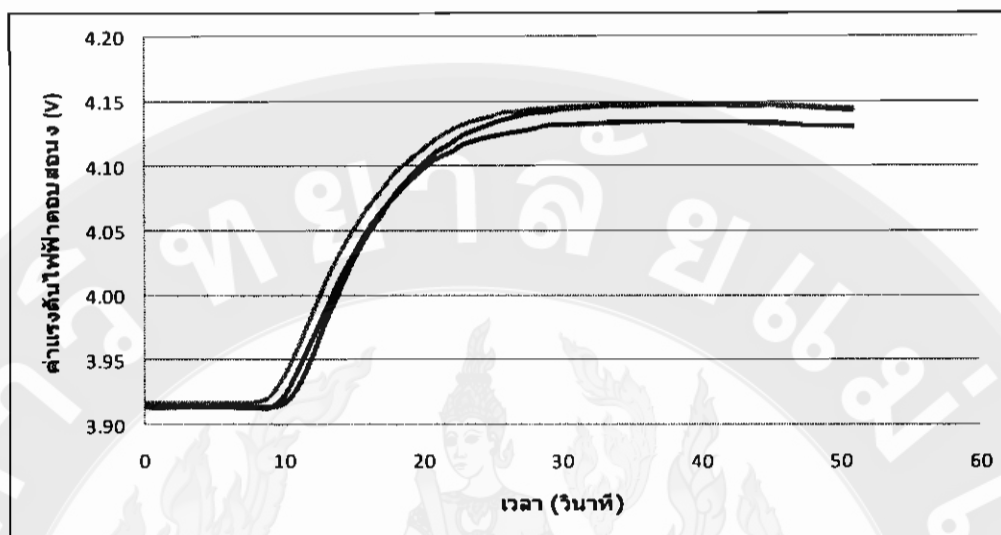
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.913815	19	4.078062	37	4.146475
2	3.913307	20	4.090461	38	4.147078
3	3.913730	21	4.101455	39	4.147057
4	3.913794	22	4.110736	40	4.147025
5	3.913762	23	4.116825	41	4.147036
6	3.913910	24	4.123748	42	4.146930
7	3.913995	25	4.128156	43	4.146285
8	3.914217	26	4.132258	44	4.146285
9	3.914100	27	4.135693	45	4.145915
10	3.914111	28	4.138230	46	4.146592
11	3.916246	29	4.140767	47	4.145577
12	3.928170	30	4.141380	48	4.145482
13	3.950231	31	4.143368	49	4.144826
14	3.977672	32	4.144129	50	4.144150
15	4.001604	33	4.144911	51	4.143220
16	4.025843	34	4.145735	52	4.142786
17	4.045451	35	4.146306		
18	4.061054	36	4.145809		

ตารางผนวก 7 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 4,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.913117	19	4.076223	37	4.133812
2	3.913001	20	4.087660	38	4.134002
3	3.913276	21	4.097047	39	4.134266
4	3.913381	22	4.105292	40	4.134340
5	3.913276	23	4.109933	41	4.133907
6	3.913773	24	4.116381	42	4.133970
7	3.913350	25	4.119816	43	4.133484
8	3.912800	26	4.122321	44	4.133262
9	3.912853	27	4.124404	45	4.132438
10	3.912694	28	4.126190	46	4.132078
11	3.920781	29	4.128082	47	4.131941
12	3.940368	30	4.130746	48	4.131454
13	3.963455	31	4.131412	49	4.130905
14	3.986552	32	4.131528	50	4.130482
15	4.010537	33	4.131962	51	4.130281
16	4.030261	34	4.132459	52	4.129679
17	4.048644	35	4.132829		
18	4.064109	36	4.133241		

ตารางผนวก 8 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 4,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.916426	19	4.094034	37	4.147934
2	3.916595	20	4.103537	38	4.147670
3	3.916637	21	4.112036	39	4.147839
4	3.916648	22	4.120080	40	4.147786
5	3.916785	23	4.126592	41	4.148146
6	3.916553	24	4.131655	42	4.147522
7	3.916616	25	4.135038	43	4.147184
8	3.916722	26	4.137755	44	4.147046
9	3.917071	27	4.141296	45	4.146824
10	3.921077	28	4.141454	46	4.146349
11	3.935886	29	4.143801	47	4.146084
12	3.957303	30	4.143938	48	4.145979
13	3.982704	31	4.144837	49	4.145556
14	4.008274	32	4.145418	50	4.144953
15	4.030483	33	4.146137	51	4.144541
16	4.049257	34	4.146814	52	4.144298
17	4.066212	35	4.146856		
18	4.080018	36	4.147564		



ภาพผนวก 2 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 4,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 4,000 ppm ได้ผลการทดสอบ
ดังตารางผนวก 9

ตารางผนวก 9 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 4,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
2,448	4,896	2,448	2,448	2,448	4,896

ระดับความเข้มข้น 6,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 10 11 และ 12 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 3 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวินาที 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 10 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 6,000 ppm ครั้งที่ 1

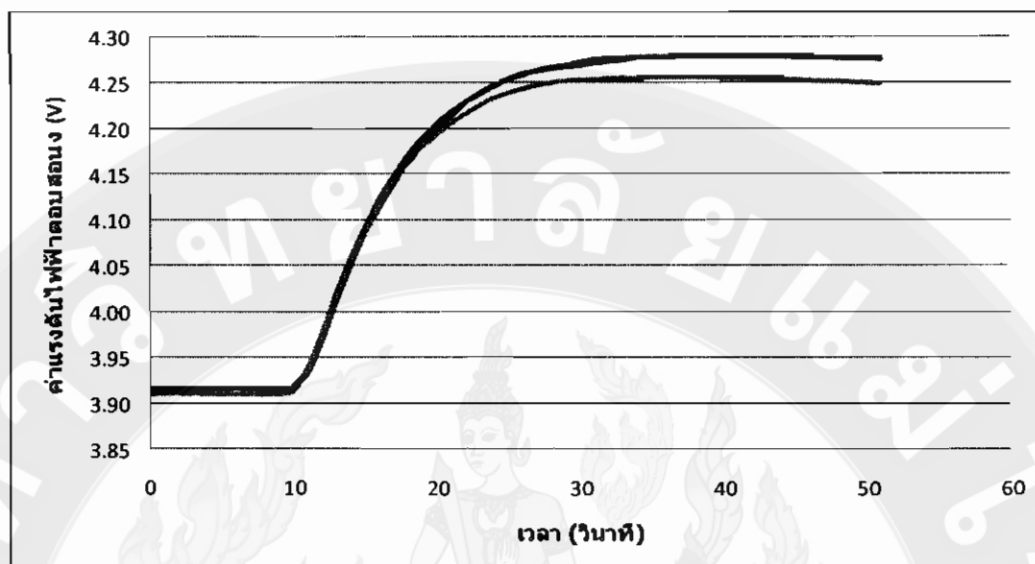
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.915168	19	4.164319	37	4.278302
2	3.915422	20	4.184160	38	4.278863
3	3.915464	21	4.200703	39	4.279243
4	3.915094	22	4.213356	40	4.279106
5	3.915316	23	4.228419	41	4.279423
6	3.915210	24	4.237161	42	4.279603
7	3.915252	25	4.246051	43	4.279021
8	3.915390	26	4.254307	44	4.279254
9	3.915474	27	4.260438	45	4.279106
10	3.915654	28	4.262647	46	4.278482
11	3.916521	29	4.265734	47	4.278059
12	3.932366	30	4.267732	48	4.277774
13	3.968233	31	4.269201	49	4.277615
14	4.011879	32	4.271484	50	4.277541
15	4.050620	33	4.273419	51	4.276918
16	4.086127	34	4.274867	52	4.276558
17	4.113992	35	4.277932		
18	4.139869	36	4.278302		

ตารางผนวก 11 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 6,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.915591	19	4.171919	37	4.278968
2	3.915897	20	4.189995	38	4.279877
3	3.915422	21	4.205978	39	4.279951
4	3.915971	22	4.218821	40	4.280226
5	3.915739	23	4.229307	41	4.280237
6	3.916109	24	4.239191	42	4.279603
7	3.916405	25	4.247869	43	4.280004
8	3.916236	26	4.255026	44	4.279846
9	3.915601	27	4.259275	45	4.279951
10	3.915485	28	4.264455	46	4.279560
11	3.918878	29	4.267732	47	4.278789
12	3.939301	30	4.269772	48	4.278461
13	3.977038	31	4.273271	49	4.277784
14	4.021763	32	4.276252	50	4.277647
15	4.060356	33	4.277383	51	4.277467
16	4.093136	34	4.278059	52	4.276579
17	4.124668	35	4.278588		
18	4.148896	36	4.279212		

ตารางผนวก 12 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 6,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.909365	19	4.161835	37	4.256294
2	3.909819	20	4.179847	38	4.256506
3	3.909935	21	4.192711	39	4.256537
4	3.909682	22	4.205365	40	4.256220
5	3.909502	23	4.215481	41	4.255512
6	3.909322	24	4.225026	42	4.255607
7	3.909491	25	4.233071	43	4.255216
8	3.909544	26	4.238599	44	4.254318
9	3.909195	27	4.243240	45	4.254296
10	3.909365	28	4.247119	46	4.252975
11	3.913033	29	4.249793	47	4.252573
12	3.937144	30	4.25233	48	4.251685
13	3.978063	31	4.252943	49	4.251421
14	4.018591	32	4.253324	50	4.250903
15	4.056899	33	4.254571	51	4.249994
16	4.087502	34	4.255258	52	4.249254
17	4.117543	35	4.255005		
18	4.14212	36	4.256051		



ภาพผนวก 3 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 6,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 6,000 ppm ได้ผลการทดสอบดังตารางผนวก 13

ตารางผนวก 13 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 6,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
7,344	4,896	4,896	4,896	4,896	7,344

ระดับความเข้มข้น 8,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 14 15 และ 16 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 4 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวินาที 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 14 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 8,000 ppm ครั้งที่ 1

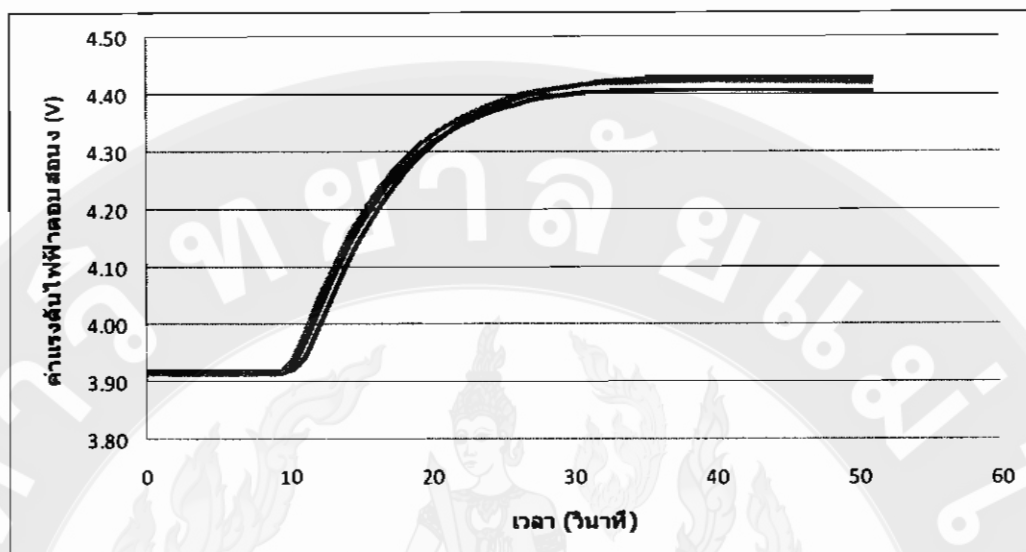
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.912705	19	4.269275	37	4.409537
2	3.912747	20	4.293334	38	4.409569
3	3.912483	21	4.315501	39	4.409981
4	3.912335	22	4.330807	40	4.410711
5	3.912198	23	4.346420	41	4.410626
6	3.912398	24	4.358164	42	4.410616
7	3.912155	25	4.368661	43	4.410584
8	3.912113	26	4.377688	44	4.410520
9	3.912578	27	4.383671	45	4.410288
10	3.912314	28	4.391620	46	4.410129
11	3.920104	29	4.395996	47	4.408988
12	3.961615	30	4.399210	48	4.409231
13	4.019056	31	4.402476	49	4.408470
14	4.075282	32	4.404633	50	4.407751
15	4.126190	33	4.404781	51	4.407370
16	4.171475	34	4.406504	52	4.406863
17	4.208663	35	4.407614		
18	4.243557	36	4.408628		

ตารางผนวก 15 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 8,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.918022	19	4.257489	37	4.428290
2	3.918043	20	4.286622	38	4.429484
3	3.918149	21	4.310258	39	4.429675
4	3.917990	22	4.329993	40	4.430298
5	3.918318	23	4.348354	41	4.430552
6	3.917916	24	4.362868	42	4.430488
7	3.917758	25	4.375278	43	4.430330
8	3.917726	26	4.385130	44	4.430552
9	3.917821	27	4.394104	45	4.430140
10	3.917589	28	4.401303	46	4.429844
11	3.919016	29	4.406937	47	4.430161
12	3.938592	30	4.411768	48	4.429474
13	3.990325	31	4.415045	49	4.428543
14	4.045790	32	4.418808	50	4.428861
15	4.100958	33	4.422286	51	4.428089
16	4.148019	34	4.424590	52	4.427656
17	4.188504	35	4.425404		
18	4.225597	36	4.427508		

ตารางผนวก 16 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 8,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.916415	19	4.284412	37	4.424273
2	3.915485	20	4.308482	38	4.424484
3	3.915908	21	4.328312	39	4.424886
4	3.916172	22	4.344951	40	4.424971
5	3.916426	23	4.359464	41	4.425531
6	3.916257	24	4.371398	42	4.425023
7	3.916077	25	4.382180	43	4.424897
8	3.916035	26	4.391557	44	4.425023
9	3.915696	27	4.400214	45	4.425119
10	3.916436	28	4.405341	46	4.424548
11	3.932768	29	4.409358	47	4.424505
12	3.981605	30	4.412740	48	4.423903
13	4.043232	31	4.416694	49	4.423322
14	4.094764	32	4.419484	50	4.423216
15	4.145101	33	4.421102	51	4.422455
16	4.187807	34	4.421556	52	4.421461
17	4.225016	35	4.422328		
18	4.256981	36	4.423068		



ภาพผนวก 4 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 8,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 8,000 ppm ได้ผลการทดสอบ ดังตารางผนวก 17

ตารางผนวก 17 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 8,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
7,344	7,344	9,792	7,344	9,792	7,344

ระดับความเข้มข้น 10,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 18 19 และ 20 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 5 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวินาที 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 18 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 10,000 ppm ครั้งที่ 1

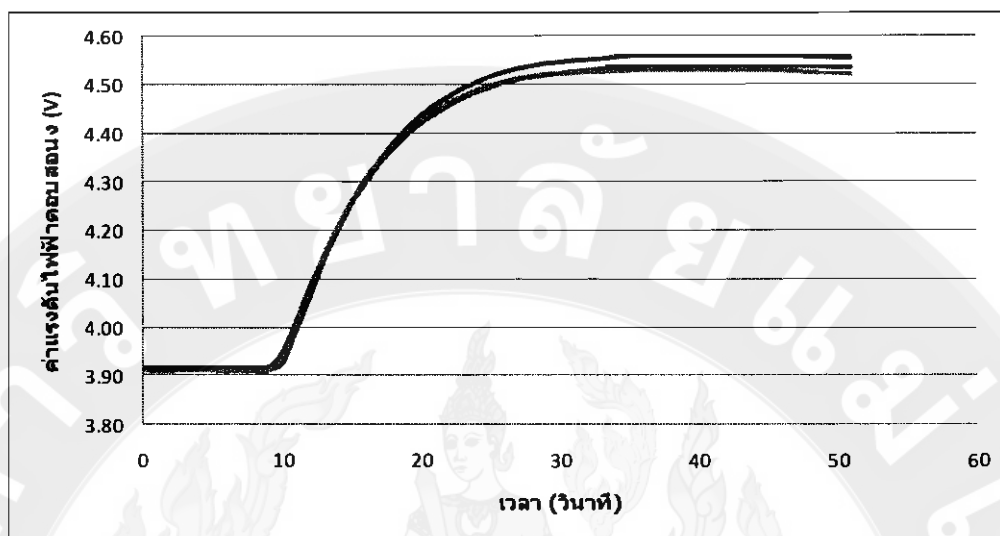
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.914365	19	4.366990	37	4.538077
2	3.914428	20	4.395003	38	4.538870
3	3.914417	21	4.419992	39	4.539250
4	3.914343	22	4.438649	40	4.539916
5	3.914386	23	4.455742	41	4.540350
6	3.914269	24	4.471418	42	4.540772
7	3.914058	25	4.484695	43	4.541290
8	3.914217	26	4.494240	44	4.541481
9	3.914343	27	4.503701	45	4.540572
10	3.916066	28	4.511016	46	4.540202
11	3.946288	29	4.516100	47	4.539895
12	4.009871	30	4.519652	48	4.539705
13	4.081931	31	4.523553	49	4.539113
14	4.145661	32	4.527136	50	4.538235
15	4.201232	33	4.529969	51	4.536227
16	4.252975	34	4.533331	52	4.535625
17	4.296114	35	4.535540		
18	4.335902	36	4.536121		

ตารางผนวก 19 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 10,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา	ค่าแรงดันไฟฟ้า	เวลา	ค่าแรงดันไฟฟ้า	เวลา	ค่าแรงดันไฟฟ้า
(s)	ตอบสนอง (V)	(s)	ตอบสนอง (V)	(s)	ตอบสนอง (V)
1	3.913635	19	4.377815	37	4.560392
2	3.914206	20	4.409062	38	4.560434
3	3.913508	21	4.435319	39	4.561301
4	3.913318	22	4.457116	40	4.560994
5	3.913307	23	4.474663	41	4.560899
6	3.913064	24	4.491376	42	4.560645
7	3.913138	25	4.503838	43	4.560709
8	3.913043	26	4.516333	44	4.560709
9	3.913233	27	4.525487	45	4.560476
10	3.913424	28	4.533320	46	4.560064
11	3.924935	29	4.539007	47	4.559440
12	3.992598	30	4.544018	48	4.558975
13	4.061223	31	4.546819	49	4.55777
14	4.136708	32	4.549810	50	4.557379
15	4.196274	33	4.551692	51	4.556322
16	4.253377	34	4.553732	52	4.555550
17	4.301093	35	4.556946		
18	4.341684	36	4.559366		

ตารางผนวก 20 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 10,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.911288	19	4.375574	37	4.529874
2	3.911204	20	4.405003	38	4.530371
3	3.911151	21	4.427053	39	4.530424
4	3.911479	22	4.444695	40	4.530561
5	3.911384	23	4.461714	41	4.530519
6	3.911320	24	4.475657	42	4.530794
7	3.910570	25	4.487781	43	4.530857
8	3.910749	26	4.497094	44	4.530741
9	3.910612	27	4.505741	45	4.530191
10	3.910813	28	4.512760	46	4.529377
11	3.937768	29	4.517274	47	4.528701
12	4.004099	30	4.521608	48	4.527771
13	4.079500	31	4.522263	49	4.524821
14	4.147987	32	4.523310	50	4.523997
15	4.206063	33	4.525561	51	4.523415
16	4.258091	34	4.526100	52	4.521502
17	4.305205	35	4.527749		
18	4.342583	36	4.528701		



ภาพผนวก 5 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 10,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 10,000 ppm ได้ผลการทดสอบ

ดังตารางผนวก 21

ตารางผนวก 21 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 10,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
9,792	7,344	9,792	7,344	9,792	9,792

ระดับความเข้มข้น 12,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 22 23 และ 24 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 6 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวินาที 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 22 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 12,000 ppm ครั้งที่ 1

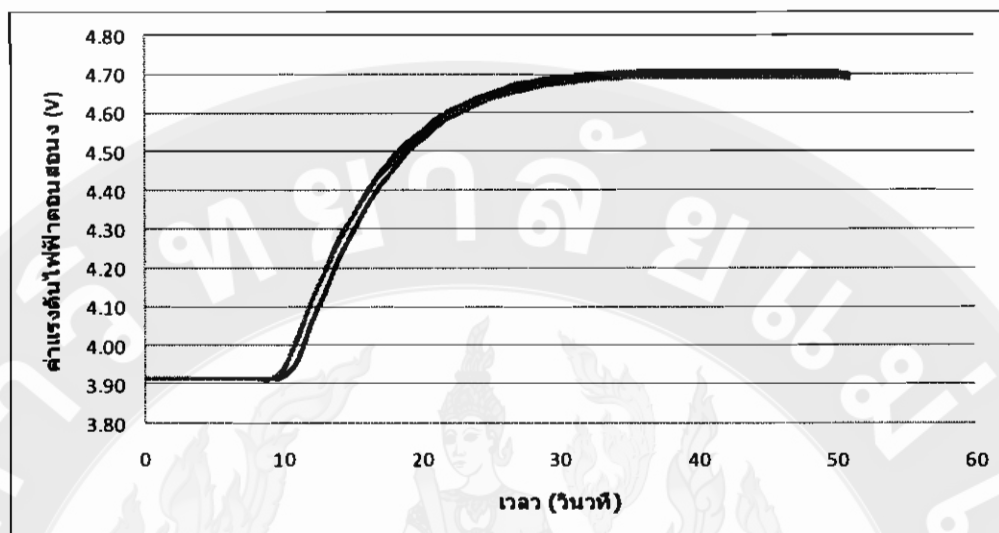
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.915094	19	4.488469	37	4.706087
2	3.915052	20	4.523828	38	4.707366
3	3.915009	21	4.553975	39	4.707831
4	3.915231	22	4.580867	40	4.708233
5	3.914935	23	4.604175	41	4.708540
6	3.914692	24	4.622505	42	4.708751
7	3.914809	25	4.636923	43	4.708741
8	3.914502	26	4.651722	44	4.708392
9	3.915052	27	4.663287	45	4.708233
10	3.914502	28	4.673857	46	4.707715
11	3.934280	29	4.680136	47	4.707620
12	4.019670	30	4.685993	48	4.707007
13	4.106635	31	4.691574	49	4.705897
14	4.192035	32	4.697060	50	4.704607
15	4.269656	33	4.699618	51	4.703328
16	4.336557	34	4.701574	52	4.701880
17	4.395404	35	4.702863		
18	4.443216	36	4.705802		

ตารางผนวก 23 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 12,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.914724	19	4.456947	37	4.700020
2	3.914978	20	4.499145	38	4.700675
3	3.915559	21	4.533214	39	4.701161
4	3.915221	22	4.561565	40	4.701658
5	3.915411	23	4.584778	41	4.702187
6	3.915496	24	4.603488	42	4.702451
7	3.915337	25	4.621543	43	4.702832
8	3.915506	26	4.638245	44	4.702684
9	3.915443	27	4.650126	45	4.701933
10	3.915622	28	4.662674	46	4.701701
11	3.918128	29	4.671172	47	4.701098
12	3.960146	30	4.678847	48	4.701405
13	4.051012	31	4.684058	49	4.700221
14	4.136676	32	4.689079	50	4.699512
15	4.222056	33	4.692028	51	4.699142
16	4.291177	34	4.694586	52	4.697842
17	4.355236	35	4.696997		
18	4.409897	36	4.699047		

ตารางผนวก 24 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 12,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.913307	19	4.478511	37	4.691310
2	3.913307	20	4.513627	38	4.692028
3	3.913297	21	4.542622	39	4.692176
4	3.913276	22	4.569028	40	4.693307
5	3.912916	23	4.592643	41	4.693371
6	3.912800	24	4.610264	42	4.692694
7	3.912800	25	4.625253	43	4.692906
8	3.913096	26	4.637843	44	4.693096
9	3.913001	27	4.647494	45	4.692261
10	3.913128	28	4.655655	46	4.692451
11	3.937208	29	4.663139	47	4.692303
12	4.014575	30	4.672927	48	4.692007
13	4.106783	31	4.676902	49	4.691627
14	4.189688	32	4.680633	50	4.690718
15	4.263387	33	4.685168	51	4.690147
16	4.334782	34	4.687335	52	4.688307
17	4.388586	35	4.688635		
18	4.438660	36	4.690707		



ภาพผนวก 6 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 12,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 12,000 ppm ได้ผลการทดสอบ
ดังตารางผนวก 25

ตารางผนวก 25 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 12,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
9,792	12,240	12,240	12,240	9,792	12,240

ระดับความเข้มข้น 14,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 26 27 และ 28 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 7 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวินาที 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 26 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 14,000 ppm ครั้งที่ 1

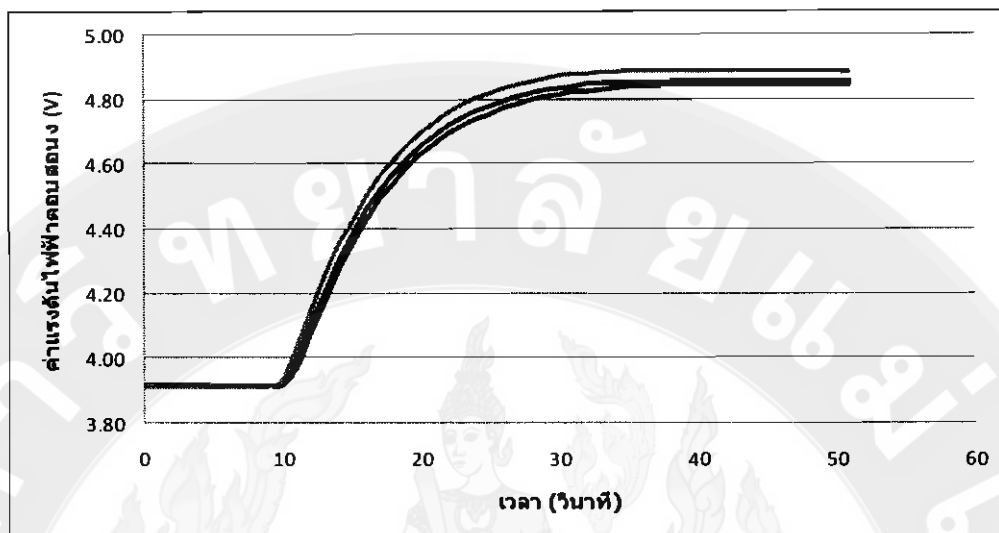
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.912356	19	4.571110	37	4.856783
2	3.912642	20	4.615528	38	4.856931
3	3.912388	21	4.656204	39	4.857174
4	3.912642	22	4.691024	40	4.857861
5	3.912821	23	4.716891	41	4.858495
6	3.912779	24	4.742662	42	4.858390
7	3.912726	25	4.762884	43	4.859542
8	3.913170	26	4.780790	44	4.859404
9	3.913255	27	4.796467	45	4.859457
10	3.913107	28	4.809077	46	4.858749
11	3.918783	29	4.820631	47	4.859130
12	4.001636	30	4.831456	48	4.858506
13	4.101994	31	4.837111	49	4.858326
14	4.202141	32	4.842470	50	4.856223
15	4.300490	33	4.847830	51	4.855969
16	4.383713	34	4.849373	52	4.855345
17	4.459632	35	4.851128		
18	4.518405	36	4.854669		

ตารางผนวก 27 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 14,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.916214	19	4.543436	37	4.840166
2	3.916183	20	4.591438	38	4.841741
3	3.915918	21	4.631617	39	4.842914
4	3.916204	22	4.663805	40	4.843104
5	3.916014	23	4.692853	41	4.843432
6	3.915908	24	4.717451	42	4.844362
7	3.916151	25	4.739385	43	4.844098
8	3.916236	26	4.756488	44	4.844521
9	3.916204	27	4.773148	45	4.844310
10	3.916415	28	4.786329	46	4.844743
11	3.918054	29	4.797756	47	4.844384
12	3.973930	30	4.807967	48	4.844088
13	4.071730	31	4.815769	49	4.843961
14	4.173335	32	4.822756	50	4.843326
15	4.267964	33	4.827418	51	4.843443
16	4.356726	34	4.832386	52	4.842650
17	4.426842	35	4.834373		
18	4.492359	36	4.838654		

ตารางผนวก 28 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 14,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.913783	19	4.615032	37	4.889256
2	3.913815	20	4.658319	38	4.890144
3	3.913413	21	4.699216	39	4.890408
4	3.913794	22	4.731341	40	4.890905
5	3.913995	23	4.759226	41	4.891687
6	3.914396	24	4.784395	42	4.891624
7	3.913815	25	4.804384	43	4.891772
8	3.913582	26	4.821487	44	4.891793
9	3.914005	27	4.835790	45	4.892078
10	3.914111	28	4.847544	46	4.891222
11	3.932208	29	4.857671	47	4.891444
12	4.035737	30	4.865398	48	4.889869
13	4.143294	31	4.873527	49	4.890292
14	4.257468	32	4.879637	50	4.889267
15	4.352519	33	4.882015	51	4.886983
16	4.425668	34	4.885704	52	4.886571
17	4.499938	35	4.887121		
18	4.560910	36	4.888569		



ภาพผนวก 7 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 14,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 14,000 ppm ได้ผลการทดสอบ

ดังตารางผนวก 29

ตารางผนวก 29 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 14,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
12,240	14,688	12,240	12,240	12,240	14,688

ระดับความเข้มข้น 16,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 30 31 และ 32 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 8 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวินาที 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 30 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 16,000 ppm ครั้งที่ 1

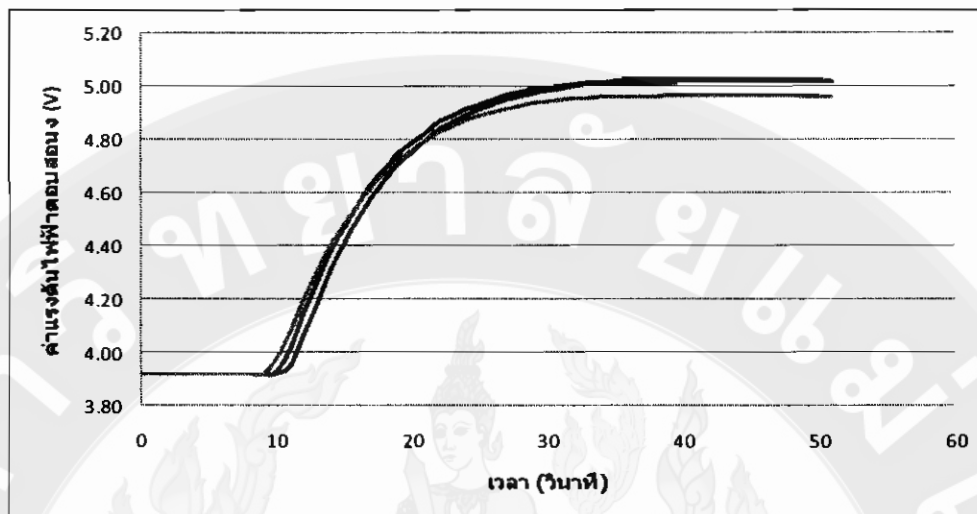
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.917377	19	4.646596	37	5.011104
2	3.916817	20	4.705929	38	5.012383
3	3.917409	21	4.755918	39	5.013979
4	3.917409	22	4.797978	40	5.015713
5	3.917694	23	4.835652	41	5.016548
6	3.917800	24	4.864077	42	5.017140
7	3.917663	25	4.891878	43	5.017595
8	3.917747	26	4.913833	44	5.018208
9	3.917779	27	4.933135	45	5.018134
10	3.917737	28	4.947870	46	5.017626
11	3.918424	29	4.962046	47	5.017785
12	3.947451	30	4.974509	48	5.018165
13	4.060990	31	4.984371	49	5.018134
14	4.183674	32	4.991379	50	5.017806
15	4.305152	33	4.999434	51	5.017415
16	4.413100	34	5.004624	52	5.016601
17	4.502284	35	5.009223		
18	4.578193	36	5.010586		

ตารางผนวก 31 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 16,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.917007	19	4.692049	37	5.022637
2	3.916997	20	4.746520	38	5.023081
3	3.916891	21	4.789205	39	5.023673
4	3.916933	22	4.827893	40	5.023990
5	3.917028	23	4.863538	41	5.024349
6	3.916912	24	4.888897	42	5.024212
7	3.916828	25	4.913537	43	5.024423
8	3.916669	26	4.932902	44	5.025047
9	3.916595	27	4.949974	45	5.026315
10	3.917187	28	4.963970	46	5.025216
11	3.924216	29	4.977320	47	5.024931
12	4.010505	30	4.988102	48	5.024138
13	4.139456	31	4.995840	49	5.023916
14	4.266294	32	5.002214	50	5.022415
15	4.378946	33	5.008039	51	5.020967
16	4.472665	34	5.013715	52	5.019508
17	4.554927	35	5.016083		
18	4.630084	36	5.019561		

ตารางผนวก 32 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 16,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.917737	19	4.676341	37	4.961189
2	3.917261	20	4.722113	38	4.961771
3	3.917515	21	4.759321	39	4.963282
4	3.917229	22	4.794268	40	4.964678
5	3.917652	23	4.822164	41	4.965196
6	3.917356	24	4.849457	42	4.965196
7	3.917462	25	4.870250	43	4.965122
8	3.917028	26	4.886835	44	4.965830
9	3.917018	27	4.903294	45	4.965809
10	3.917726	28	4.915630	46	4.965502
11	3.971774	29	4.927363	47	4.965090
12	4.074531	30	4.935904	48	4.964657
13	4.195132	31	4.943515	49	4.964699
14	4.309412	32	4.950302	50	4.963018
15	4.403058	33	4.953769	51	4.961274
16	4.482845	34	4.956517	52	4.959794
17	4.556798	35	4.958420		
18	4.620972	36	4.960756		



ภาพผนวก 8 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 16,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 16,000 ppm ได้ผลการทดสอบ
ดังตารางผนวก 33

ตารางผนวก 33 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 16,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
14,688	14,688	14,688	14,688	14,688	14,688

ระดับความเข้มข้น 18,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 34 35 และ 36 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 9 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวินาที 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 34 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 18,000 ppm ครั้งที่ 1

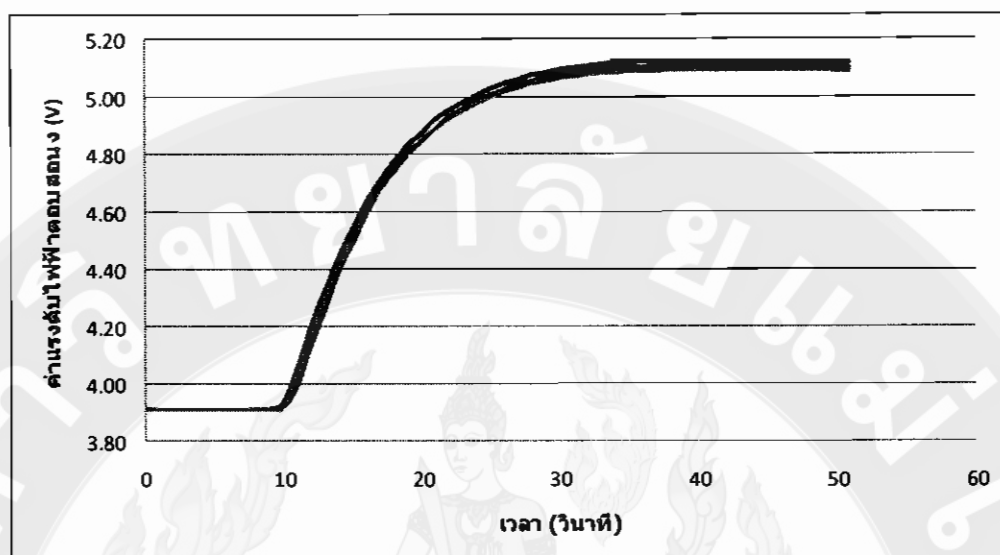
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.913128	19	4.776340	37	5.122456
2	3.913170	20	4.832597	38	5.122614
3	3.913561	21	4.877671	39	5.123069
4	3.913741	22	4.922976	40	5.123735
5	3.914111	23	4.954583	41	5.124697
6	3.914079	24	4.984276	42	5.125289
7	3.914343	25	5.008715	43	5.125416
8	3.914100	26	5.030914	44	5.125490
9	3.913498	27	5.048387	45	5.124855
10	3.913318	28	5.061759	46	5.124454
11	3.936013	29	5.075966	47	5.124084
12	4.058580	30	5.085458	48	5.123544
13	4.203198	31	5.095818	49	5.122255
14	4.332794	32	5.103587	50	5.121378
15	4.444505	33	5.110310	51	5.119739
16	4.546132	34	5.114982	52	5.117276
17	4.636458	35	5.117287		
18	4.708265	36	5.120585		

ตารางผนวก 35 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าคอบสนองที่ความเข้มข้น 18,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า คอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า คอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า คอบสนอง (V)
1	3.912853	19	4.740210	37	5.102646
2	3.912684	20	4.800483	38	5.104898
3	3.91280	21	4.849775	39	5.105596
4	3.912599	22	4.891634	40	5.106399
5	3.913001	23	4.928357	41	5.106589
6	3.913022	24	4.959424	42	5.107297
7	3.913223	25	4.986940	43	5.106304
8	3.913360	26	5.006929	44	5.106674
9	3.913043	27	5.025290	45	5.106864
10	3.913064	28	5.041865	46	5.106663
11	3.915506	29	5.056283	47	5.106779
12	4.000642	30	5.067731	48	5.105870
13	4.134679	31	5.075617	49	5.105120
14	4.266928	32	5.085110	50	5.104316
15	4.396261	33	5.090797	51	5.103407
16	4.497200	34	5.095511	52	5.100585
17	4.594397	35	5.099613		
18	4.676289	36	5.100870		

ตารางผนวก 36 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 18,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.913434	19	4.748486	37	5.090469
2	3.913181	20	4.805219	38	5.092604
3	3.913519	21	4.849225	39	5.093957
4	3.913455	22	4.890588	40	5.094274
5	3.913424	23	4.924784	41	5.094623
6	3.913540	24	4.953378	42	5.095310
7	3.913445	25	4.978821	43	5.094697
8	3.913508	26	4.999572	44	5.094634
9	3.913128	27	5.019529	45	5.094909
10	3.912980	28	5.033525	46	5.095194
11	3.920326	29	5.046675	47	5.094782
12	4.039035	30	5.057330	48	5.094264
13	4.168526	31	5.066368	49	5.093577
14	4.302456	32	5.072583	50	5.093312
15	4.410425	33	5.078957	51	5.091907
16	4.512284	34	5.083027	52	5.090025
17	4.605465	35	5.086526		
18	4.679016	36	5.088756		



ภาพผนวก 9 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 18,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 18,000 ppm ได้ผลการทดสอบ ดังตารางผนวก 37

ตารางผนวก 37 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 18,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
14,688	17,136	17,136	17,136	17,136	14,688

ระดับความเข้มข้น 20,000 ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ได้ผลการทดสอบเฉลี่ย ดังตารางผนวก 38 39 และ 40 ตามลำดับ และมีแนวโน้มดังภาพผนวก 10 ค่าตอบสนองจะเริ่มคงที่ในวินาที 31 – 40 ทั้ง 3 ครั้ง

ตารางผนวก 38 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 20,000 ppm ครั้งที่ 1

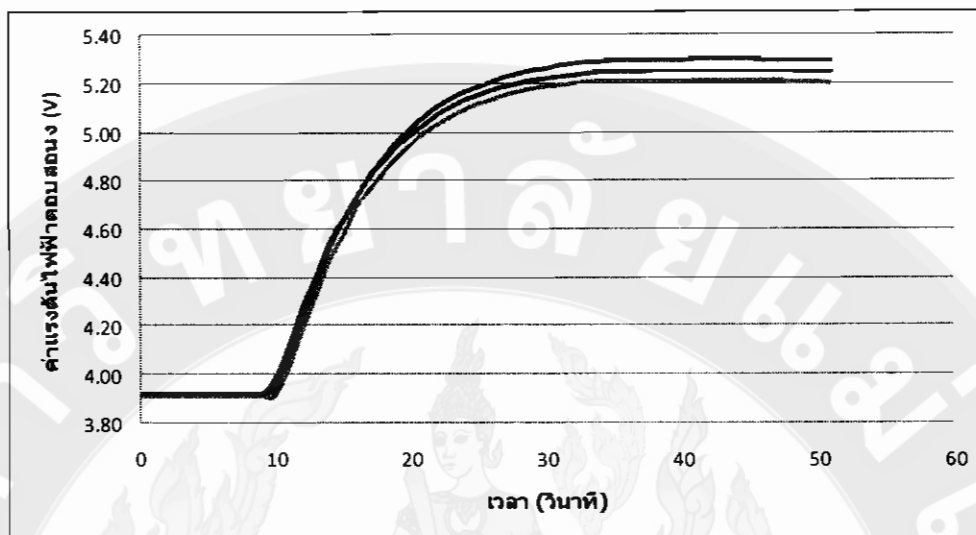
เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.919248	19	4.882005	37	5.246534
2	3.919301	20	4.944255	38	5.248881
3	3.919290	21	4.992415	39	5.251524
4	3.919660	22	5.034687	40	5.252391
5	3.920094	23	5.072985	41	5.252126
6	3.920305	24	5.104644	42	5.252422
7	3.920041	25	5.129887	43	5.252369
8	3.920453	26	5.152529	44	5.252422
9	3.919882	27	5.172275	45	5.252443
10	3.920252	28	5.188396	46	5.252084
11	3.981858	29	5.200594	47	5.251503
12	4.122808	30	5.211281	48	5.250699
13	4.276854	31	5.220414	49	5.250477
14	4.415700	32	5.228998	50	5.249801
15	4.547231	33	5.235467	51	5.248596
16	4.648213	34	5.241386	52	5.244685
17	4.738360	35	5.245076		
18	4.819669	36	5.246016		

ตารางผนวก 39 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 20,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.914565	19	4.896645	37	5.295054
2	3.914195	20	4.964149	38	5.295413
3	3.914174	21	5.019550	39	5.296058
4	3.914132	22	5.066960	40	5.296787
5	3.913984	23	5.104856	41	5.297580
6	3.914365	24	5.137878	42	5.297876
7	3.914565	25	5.166895	43	5.298701
8	3.914502	26	5.189484	44	5.298616
9	3.914491	27	5.209738	45	5.298373
10	3.914809	28	5.228110	46	5.297834
11	3.949501	29	5.243120	47	5.297369
12	4.083421	30	5.255139	48	5.296734
13	4.238958	31	5.263743	49	5.296650
14	4.381884	32	5.271957	50	5.295466
15	4.524515	33	5.279652	51	5.293542
16	4.643118	34	5.285308	52	5.292781
17	4.739195	35	5.288320		
18	4.825790	36	5.291671		

ตารางผนวก 40 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ความเข้มข้น 20,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)	เวลา (s)	ค่าแรงดันไฟฟ้า ตอบสนอง (V)
1	3.907388	19	4.839521	37	5.212740
2	3.907472	20	4.897787	38	5.213860
3	3.907631	21	4.949593	39	5.214304
4	3.907758	22	4.996527	40	5.214389
5	3.908202	23	5.034000	41	5.214516
6	3.908022	24	5.066209	42	5.214082
7	3.908191	25	5.094095	43	5.214029
8	3.907969	26	5.116769	44	5.214220
9	3.908128	27	5.136007	45	5.213575
10	3.908191	28	5.153386	46	5.211683
11	3.912885	29	5.166631	47	5.211154
12	4.038200	30	5.177043	48	5.210330
13	4.184974	31	5.186725	49	5.208934
14	4.332667	32	5.194368	50	5.206218
15	4.472221	33	5.201524	51	5.204918
16	4.581681	34	5.205668	52	5.201598
17	4.694724	35	5.208004		
18	4.765103	36	5.211641		



ภาพผนวก 10 ผลการทดสอบค่าแรงดันไฟฟ้าตอบสนองที่ระดับความเข้มข้น 20,000 ppm

ทำการไทเทรตจำนวน 6 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้น 20,000 ppm ได้ผลการทดสอบ

ดังตารางผนวก 41

ตารางผนวก 41 ค่าจากการไทเทรตที่ระดับความเข้มข้น 20,000 ppm

ความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต					
ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6
17,136	19,584	19,584	17,136	19,584	19,584



ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 กับห้องรม SO_2 กับผลลำไยสดระดับอุตสาหกรรม

ผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 กับห้องรม SO_2 กับผลล้าไยสระดับอุตสาหกรรม

ทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ที่ประกอบด้วยหน่วยตรวจวัด SO_2 และหน่วยประมวลผล ในระหว่างการรม SO_2 กับผลล้าไยสระดับอุตสาหกรรมโดยการสูบลำตัวอย่าง SO_2 จากห้องรม ด้วยกระบอกฉีดยาปริมาตร 2 มิลลิกรัม สูบลำตัวอย่าง SO_2 ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรม 60 นาที ปล่องเข้า สู่หน่วยตรวจวัด SO_2 ส่งสัญญาณเป็นแรงดันไฟฟ้าไปยังหน่วยประมวลผล เพื่อแปลงสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเป็นดิจิตอลและคำนวณค่าความเข้มข้น SO_2 แสดงผลความเข้มข้นเป็นตัวเลขในหน่วย ppm ทำการทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ที่ระดับความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรม 6,000 ppm 8,000 ppm และ 12,000 ppm ได้ผลการทดสอบดังตารางผนวก 42 - 50 ตามลำดับ

ตารางผนวก 42 ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรม 60 นาที ที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรม 6,000 ppm ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้น SO_2 จากอุปกรณ์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น SO_2 จากการไทเทรต (ppm)				เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	17,284	19,584	19,584	17,136	18,768	$\pm 1,413.35$
10	17,294	19,584	17,136	-	18,360	$\pm 1,730.99$
20	13,919	12,240	12,240	-	12,240	± 0.00
30	11,137	9,792	12,240	12,240	11,424	$\pm 1,413.35$
40	6,035	7,344	7,344	-	7,344	± 0.00
50	8,017	9,732	7,344	-	8,538	$\pm 1,688.57$
60	5,932	7,344	7,344	7,344	7,344	± 0.00

ตารางผนวก 43 ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาที ที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 6,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากอุปกรณ์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากการไทเทรต (ppm)				เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	24,863	26,928	26,928	24,480	26,112	±1,413.35
10	25,209	26,928	24,480	24,480	25,296	±1,413.35
20	20,835	24,480	19,584	24,480	22,848	±2,826.71
30	13,712	12,240	14,688	17,136	14,688	±2,448.00
40	9,968	12,240	9,792	12,240	11,424	±1,413.35
50	8,529	9,792	9,792	9,792	9,792	±0.00
60	6,257	7,344	7,344	7,344	7,344	±0.00

ตารางผนวก 44 ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาที ที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 6,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากอุปกรณ์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากการไทเทรต (ppm)				เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	25,776	24,480	26,928	24,480	25,296	±1,413.35
10	24,543	24,480	24,480	24,480	24,480	±0.00
20	21,584	19,584	24,480	24,480	22,848	±2,826.71
30	14,086	12,240	12,240	14,688	13,056	±1,413.35
40	10,586	9,732	12,240	12,240	11,404	±1,447.99
50	8,736	9,732	9,732	9,732	9,732	±0.00
60	6,561	7,344	7,344	7,344	7,344	±0.00

ตารางผนวก 45 ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรม 60 นาที ที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรม 8,000 ppm ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากอุปกรณ์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากการไทเทรต (ppm)				เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	19,713	22,032	29,376	22,032	24,480	±4,240.06
10	31,170	24,480	44,064	29,376	32,640	±10,191.84
20	25,695	29,376	24,480	26,928	26,928	±2,448.00
30	16,962	19,584	22,032	19,584	20,400	±1,413.35
40	14,646	17,136	14,688	19,584	17,136	±2,448.00
50	10,845	12,240	12,240	14,688	13,056	±1,413.35
60	8,317	9,792	9,792	12,240	10,608	±1,413.35

ตารางผนวก 46 ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรม 60 นาที ที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรม 8,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากอุปกรณ์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากการไทเทรต (ppm)				เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	23,639	24,480	26,928	24,480	25,296	±1,413.35
10	23,274	31,824	24,480	24,480	26,928	±4,240.00
20	19,681	22,032	22,032	22,032	22,032	±0.00
30	15,597	17,136	17,136	19,584	17,952	±1,413.35
40	11,224	14,688	12,240	14,688	13,872	±1,413.35
50	9,686	12,240	12,240	12,240	12,240	±0.00
60	8,272	9,792	9,792	9,792	9,792	±0.00

ตารางผนวก 47 ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาที ที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 8,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากอุปกรณ์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากการไทเทรต (ppm)				เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	22,675	26,928	24,480	24,480	25,296	±1,413.35
10	24,270	29,376	29,376	26,928	28,560	±1,413.35
20	21,795	22,032	22,032	19,584	21,216	±1,413.35
30	18,247	22,032	14,688	19,584	18,768	±3,739.38
40	14,945	19,584	19,584	12,240	17,136	±4,240.06
50	12,629	12,240	12,240	14,688	13,056	±1,413.35
60	8,987	9,792	9,792	9,792	9,792	±0.00

ตารางผนวก 48 ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาที ที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm ครั้งที่ 1

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากอุปกรณ์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากการไทเทรต (ppm)				เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	26,749	29,376	29,376	34,272	31,008	±2,826.71
10	30,223	36,720	31,824	39,168	35,904	±3,739.38
20	25,045	22,032	26,928	29,376	26,112	±3,739.38
30	18,865	24,480	22,032	22,032	22,848	±1,413.35
40	14,267	17,136	12,240	17,136	15,504	±2,826.71
50	12,179	14,688	12,240	14,688	13,872	±1,413.35
60	11,536	12,240	12,240	9,792	11,424	±1,413.35

ตารางผนวก 49 ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาที ที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm ครั้งที่ 2

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากอุปกรณ์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากการไทเทรต (ppm)				เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	27,510	31,824	29,376	26,928	29,376	±2,448.00
10	24,852	26,928	29,376	22,032	26,112	±3,739.38
20	22,819	26,928	26,928	26,928	26,928	±0.00
30	18,686	22,032	19,584	22,032	21,216	±1,413.35
40	13,893	17,136	17,136	17,136	17,136	±0.00
50	10,568	14,688	14,688	17,136	15,504	±1,413.35
60	8,940	12,240	9,792	12,240	11,424	±1,413.35

ตารางผนวก 50 ผลการทดสอบอุปกรณ์ ภาคสนาม ทุก 10 นาที ตลอดระยะเวลาในการรวม 60 นาที ที่ความเข้มข้นเมื่อสิ้นสุดการรวม 12,000 ppm ครั้งที่ 3

เวลา (นาที)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากอุปกรณ์ (ppm)	ค่าความเข้มข้น SO ₂ จากการไทเทรต (ppm)				เฉลี่ย
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
0	27,719	26,928	29,376	31,824	29,376	±2,448.00
10	35,127	36,720	36,720	36,720	36,720	±0.00
20	30,386	29,376	29,376	-	29,376	±0.00
30	23,664	24,480	22,032	26,928	24,480	±2,448.00
40	19,572	19,584	19,584	-	19,584	±0.00
50	14,723	14,688	17,136	-	15,912	±1,730.99
60	12,209	9,792	12,240	12,240	11,424	±1,413.35



ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธี Repeated measurement
ด้วยโปรแกรม Statview™ v.5

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Statview™ v.5 เพื่อเปรียบเทียบการใช้
อุปกรณ์ตรวจวัด SO₂ กับการไทเทรต ในการรวม SO₂ กับผลล้าไฮสค มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กรอกข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตามเข้าไปในโปรแกรม (ภาพผนวก 11)

StatView - [502 data.xlsx]

File Edit View Text Analyze Layout Manage Window Help

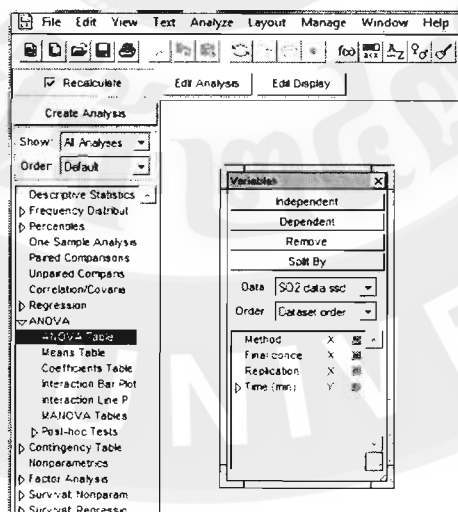


Compact Expand Criteria: No Criteria

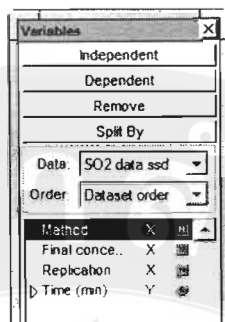
				Time (min)													
Method		Final concentration	Replication	0		10		20		30		40		50		60	
Type	Category	Category	Category	Real	Real	Real	Real	Real	Real	Real	Real	Real	Real	Real	Real	Real	
Source	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	User Entered	
Class	Nominal	Nominal	Nominal	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	Continuous	
Format	*	*	*	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	Free Format Fixed	
Dec Places	*	*	*	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
1	Titrate	6000 ppm	1	18788.00	18360.00	12240.00		11424.00		7344.00		8538.00				7344.00	
2	Titrate	6000 ppm	2	26112.00	25296.00	22848.00		14688.00		11424.00		9792.00				7344.00	
3	Titrate	6000 ppm	3	25296.00	24480.00	22848.00		13056.00		11404.00		9732.00				7344.00	
4	Titrate	8000 ppm	1	24480.00	32640.00	26028.00		20400.00		17136.00		13056.00				10608.00	
5	Titrate	8000 ppm	2	25296.00	26928.00	22012.00		17952.00		13672.00		12240.00				9792.00	
6	Titrate	8000 ppm	3	25296.00	28560.00	21216.00		18768.00		17136.00		13056.00				9792.00	
7	Titrate	12000 ppm	1	31088.00	35984.00	28112.00		22848.00		15504.00		13672.00				11424.00	
8	Titrate	12000 ppm	2	29376.00	26112.00	25926.00		21216.00		17136.00		15504.00				11424.00	
9	Titrate	12000 ppm	3	29376.00	36720.00	29376.00		24480.00		19584.00		15912.00				11424.00	
10	Device	6000 ppm	1	17284.00	17294.00	13819.00		11137.00		6035.00		8017.00				5832.00	
11	Device	6000 ppm	2	24863.00	25225.00	20835.00		13712.00		9968.00		8529.00				5257.00	
12	Device	6000 ppm	3	25776.00	24543.00	21584.00		14086.00		10586.00		8736.00				6561.00	
13	Device	8000 ppm	1	19713.00	31170.00	25695.00		16962.00		14646.00		10845.00				8317.00	
14	Device	8000 ppm	2	23639.00	23274.00	19681.00		15597.00		11224.00		9696.00				5272.00	
15	Device	8000 ppm	3	22675.00	24270.00	21795.00		18247.00		14545.00		12629.00				8967.00	
16	Device	12000 ppm	1	26749.00	38223.00	25045.00		18665.00		14267.00		12179.00				10536.00	
17	Device	12000 ppm	2	27510.00	24652.00	22016.00		18696.00		13893.00		10568.00				5946.00	
18	Device	12000 ppm	3	27719.00	35127.00	30386.00		23664.00		19572.00		14723.00				12209.00	

ภาพผนวก 11 การกรอกข้อมูลตัวแปรต้นและตัวแปรตาม

2. ทำการเลือกแสดงตาราง ANOVA เพื่อแสดงผล โดยเลือกตัวแปรต้นและตัวแปรตามสำหรับการวิเคราะห์ดังภาพผนวก 12 และ 13 ตามลำดับ

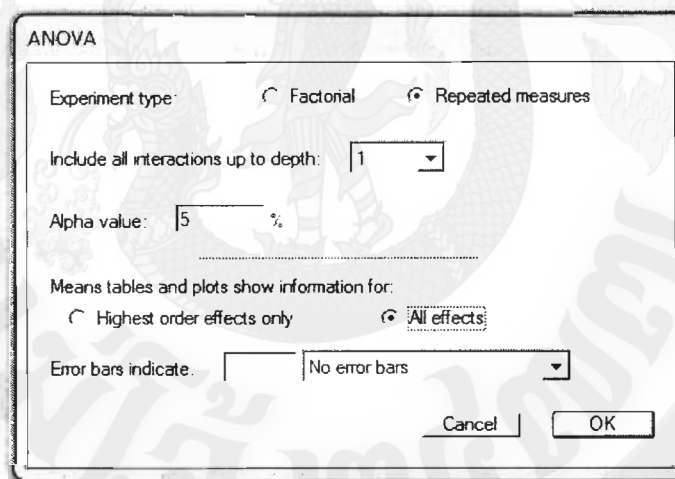


ภาพผนวก 12 การเข้าคำสั่งในการแสดงตาราง ANOVA



ภาพผนวก 13 การเลือกตัวแปรต้นและตัวแปรตามเข้าในคำสั่ง

3. ทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures ใช้ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ได้กำหนดไว้ และใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 0.05 ดังภาพผนวก 14 และได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพผนวก 15



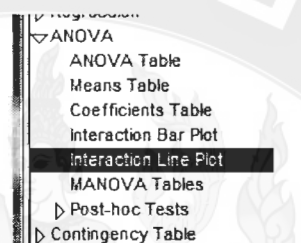
ภาพผนวก 14 การเข้าคำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures

ANOVA Table for Time (min)

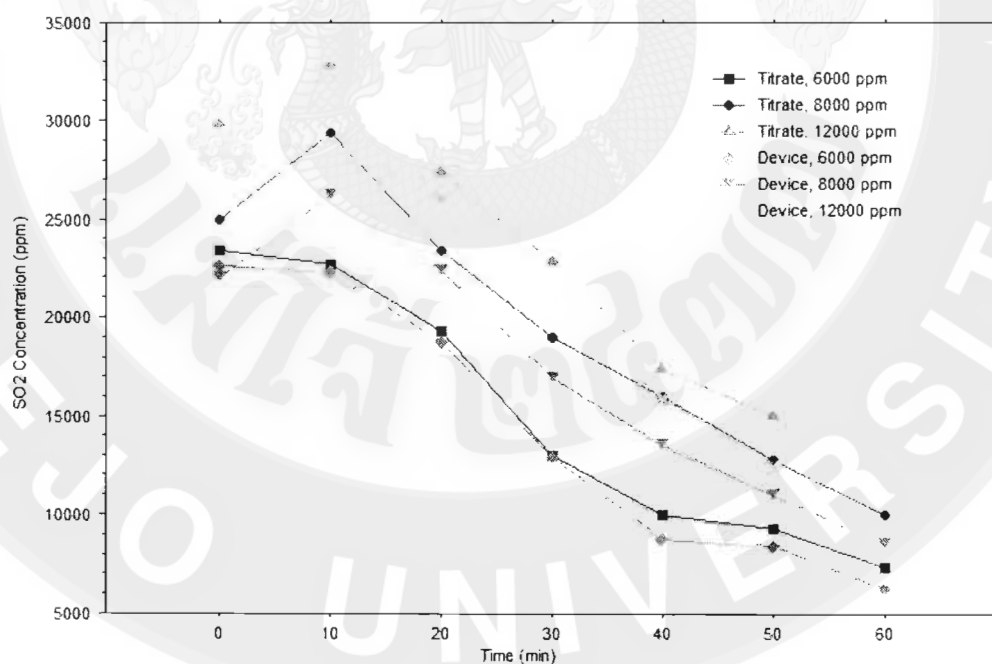
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value	Lambda	Power
Method	1	83288598.127	83288598.127	3.673	.0794	3.673	.411
Final concentration	2	956995490.111	478497745.056	21.101	.0001	42.201	1.000
Replication	2	96981986.730	48490993.365	2.138	.1606	4.277	.345
Subject(Group)	12	272124025.476	22677002.123				
Category for Time (min)	6	5420350969.984	903391828.331	278.567	< .0001	1671.402	1.000
Category for Time (min) * Method	6	5182130.873	863688.479	.266	.9508	1.598	.117
Category for Time (min) * Final concentra...	12	100214466.444	8351205.537	2.575	.0067	30.902	.962
Category for Time (min) * Replication	12	62859596.825	5238299.735	1.615	.1065	19.383	.787
Category for Time (min) * Subject(Group)	72	233495745.302	3242996.463				

ภาพผนวก 15 ผลการวิเคราะห์โดยการเข้าคำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures

4. เลือกการแสดงผลในรูปแบบของกราฟ เพื่อวิเคราะห์ถึงแนวโน้มในการตรวจวัด SO_2 เปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มข้นที่ได้จากอุปกรณ์กับการไทเทรต ดังภาพผนวก 16 และทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures ใช้ตัวแปรต้นและตัวแปรตามที่ได้กำหนดไว้ และใช้ระดับความเชื่อมั่นที่ 0.05 ดังภาพผนวก 14 ได้ผลการวิเคราะห์ดังภาพผนวก 17



ภาพผนวก 16 การเข้าคำสั่งในการแสดงกราฟ โดยใช้คำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures



ภาพผนวก 17 ผลการวิเคราะห์โดยใช้คำสั่งการวิเคราะห์ข้อมูลแบบ Repeated measures โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟ



ภาคผนวก ง

การหาปริมาณ SO_2 ตกค้างในผลลำไยสดหลังการรม

โดยวิธี Modified Monier-Williams

การวิเคราะห์หาปริมาณ SO_2 ตกค้างในเนื้อและเปลือกของลำไย ด้วยวิธี Modified Monier-Williams (สถาบันอาหาร, 2541) ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

1. หลักการ วิธี Modified Monier-Williams เป็นวิธีที่ใช้หาปริมาณ SO_2 ที่มีอยู่ในผลไม้รวม SO_2 โดยการกลั่นตัวอย่างเพื่อสกัด SO_2 ในสถานะที่เป็นกรด และดักจับก๊าซ SO_2 ที่สกัดได้ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จากนั้นนำมาไทเทรตด้วยสารมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อหาปริมาณ SO_2 ที่อยู่ในผลไม้

2. อุปกรณ์ ประกอบด้วย

2.1 ชุดเครื่องแก้ว (ภาพผนวก 18) ได้แก่

- 2.1.1 ขวดก้นกลมชนิดสองคอ ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 2.1.2 ท่อนำก๊าซไนโตรเจน
- 2.1.3 คอนเดนเซอร์
- 2.1.4 Conical flask ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 2.1.5 Dreschel bottle head ขาว 130 มิลลิลิตร
- 2.1.6 ท่อแก้ว
- 2.1.7 หลอดทดลอง

2.2 อุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่

- 2.2.1 ขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 มิลลิลิตร
- 2.2.2 กระบอกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.2.3 บีกเกอร์ ขนาด 50 100 250 มิลลิลิตร
- 2.2.4 สายยาง
- 2.2.5 เต้าไฟฟ้า
- 2.2.6 ปากคืบ
- 2.2.7 ถ้วยพลาสติกพร้อมฝาปิด
- 2.2.8 กระบอกน้ำกลั่น
- 2.2.9 ขาดังพร้อมที่ยึด
- 2.2.10 เครื่องชั่ง ความละเอียด 0.01 กรัม
- 2.2.11 ถังบรรจุก๊าซไนโตรเจนพร้อมมาตรวัดความดัน (Regulator)
- 2.2.12 ขวดรูปกรวย
- 2.2.13 คู่มือไฟฟ้า
- 2.2.14 โดคูความชื้น

2.2.15 ถ้วยอะลูมิเนียมพร้อมฝาปิด

2.2.16 บิวเรต ขนาด 25 มิลลิลิตร

2.3 สารเคมี ได้แก่

2.3.1 เมทิลีนบลู (Methylene blue)

2.3.2 เมทิลเรด (Methyl red)

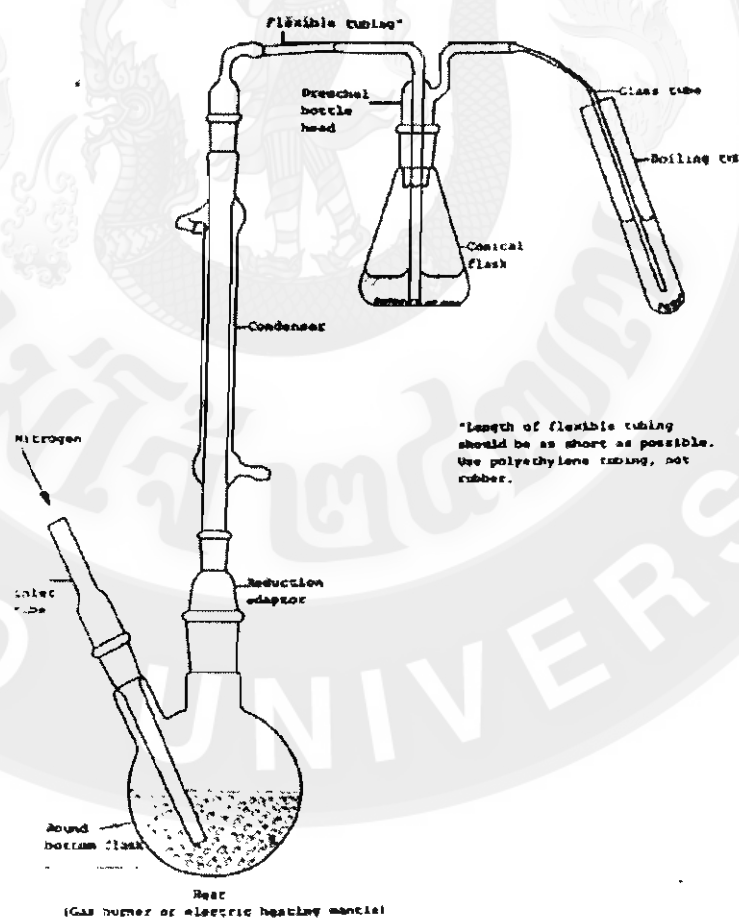
2.3.3 โซเดียมไฮดรอกไซด์

2.3.4 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 35 เปอร์เซ็นต์

2.3.5 กรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 36-38 เปอร์เซ็นต์

2.3.6 เอทานอล 95 เปอร์เซ็นต์

2.3.7 โซเดียมเมตาไบซัลไฟด์



ภาพผนวก 18 ชุดเครื่องแก้วสำหรับวิเคราะห์ SO_2 ที่ตกค้างในเนื้อและในเปลือกกล้วย
ที่มา: สถาบันอาหาร (2541)

2.4 การเตรียมสารเคมี ประกอบด้วย

2.4.1 เมทิลเรดอินดิเคเตอร์ ซึ่งเมทิลลิ้นบลู 0.05 กรัม และเมทิลเรด 0.1 กรัม ผสมสารทั้งสองชนิดด้วยเอทานอล 95% จำนวน 100 มิลลิลิตร สารละลายที่ได้เก็บในขวดสีชา

2.4.2 สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 และ 0.01 นอร์มัล ถ้าต้องการเตรียม NaOH ความเข้มข้น 0.1 และ 0.01 นอร์มัล ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ต้องชั่งสาร NaOH จำนวน 4 กรัม และ 0.4 กรัม มาละลายในน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรครบ 1,000 มิลลิลิตร ตามลำดับ

2.4.3 สารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ โดยเตรียมจาก H_2O_2 ความเข้มข้น 30 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นถ้าต้องการเตรียมสารละลาย H_2O_2 3 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ต้องใช้ H_2O_2 จำนวน 100 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนได้ปริมาตรครบ 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นจึงหยดเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ลงไปประมาณ 5-7 หยด จนได้สารละลายเป็นสีม่วง ซึ่งสารละลายที่ได้ในขั้นตอนนี้มีสภาพเป็นกรด ดังนั้นจึงต้องทำการปรับสภาพให้เป็นกลางโดยการใช้ NaOH ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล หยดลงไป จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนจากสีม่วงเป็นสีเขียวอ่อน ๆ ซึ่ง H_2O_2 ที่เตรียมได้นี้ ควรนำไปใช้ทันทีหรือควรเก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส

3. การเตรียมตัวอย่าง ประกอบด้วย

3.1 ทำการแยกส่วนเปลือกและเนื้อผลลำไยออกจากกัน โดยต้องระวังไม่ให้อุปกรณ์หรือเครื่องมือที่ได้สัมผัสกับเปลือกผลลำไยไปสัมผัสกับเนื้อผลลำไย เพราะอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนและส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในส่วนของปริมาณ SO_2 ตกค้างที่วิเคราะห์ได้

3.2 ทำการชั่งน้ำหนัก โดยแยกระหว่างส่วนของเปลือกและเนื้อผลลำไย แล้วนำไปใส่ด้วยพลาสติก

3.3 กรณีที่ยังไม่ได้ทำการวิเคราะห์ทันที ให้เติมน้ำกลั่นให้ท่วมเปลือกและเนื้อผลลำไย แล้วปิดฝาไว้

4. การวิเคราะห์ ประกอบด้วย

4.1 เทตัวอย่างเปลือกและเนื้อผลลำไยลงในขวดก้นกลมชนิด 2 คอ แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปให้ได้ประมาณครึ่งหนึ่งของขวดก้นกลม (Round bottom flask) หรือประมาณ 200-250 มิลลิลิตร

4.2 นำไปประกอบเข้ากับชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในการสกัด

4.3 เทสารละลาย H_2O_2 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ลงใน Conical flask ขนาด 250 มิลลิลิตร ประมาณ 100 มิลลิลิตร และใส่ลงใน Boiling tube ประมาณครึ่งหลอด

4.4 นำไปประกอบเข้ากับชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในการสกัด

4.5 ใส่กรด HCl เข้มข้น (36-38 เปอร์เซ็นต์) ประมาณ 20 มิลลิลิตร ลงในขวด
ก้นกลม

4.6 สวมท่อนำก๊าซในโตรเจน เข้ากับขวดก้นกลม โดยให้มีอัตราการไหลของ
ฟองก๊าซ 1 ฟองต่อวินาที

4.7 เปิดน้ำให้ไหลผ่านเข้าไปในท่อคอนเดนเซอร์ (Condenser cone)

4.8 เปิดเตาไฟฟ้าเพื่อทำการต้มตัวอย่าง

4.9 รอจนกระทั่งตัวอย่างผลล้าใบในขวดก้นกลมเดือดแล้วจึงจับเวลา ซึ่งจะใช้เวลาในการต้มประมาณ 50-60 นาที (ถ้าตัวอย่างมีปริมาณ SO_2 ตกค้าง สารละลาย H_2O_2 ที่อยู่ในขวดรูปชมพู่ และ Boiling tube จะเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนไปเป็นสีชมพู)

4.10 ปิดเตาสำหรับให้ความร้อน

4.11 ถอดท่อนำก๊าซในโตรเจนออก

4.12 นำสารละลาย H_2O_2 ที่อยู่ใน Boiling tube มารวมกับสารละลาย H_2O_2 ที่อยู่ในขวดรูปชมพู่ จากนั้นจึงนำไปไทเทรตกับสารละลาย NaOH จนถึงจุดยุติซึ่งจะได้สารละลายที่มีสีเขียวอ่อน (โดยส่วนเปลือกผลล้าใบให้ใช้ NaOH ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล และในส่วนเนื้อผลให้ใช้ NaOH ความเข้มข้น 0.01 นอร์มัล)

5. การคำนวณหาปริมาณ SO_2 ตกค้าง

การคำนวณหาปริมาณ SO_2 ตกค้างในเปลือกและเนื้อแสดงดังสมการ 11

$$\text{ปริมาณ } \text{SO}_2 \text{ ตกค้าง (ppm)} = \frac{N(\text{NaOH}) \times V(\text{NaOH}) \times 32 \times 1,000}{W} \quad (11)$$

โดย

$N(\text{NaOH})$ = Normality ของ NaOH

$V(\text{NaOH})$ = จำนวนมิลลิลิตรของ NaOH ที่ใช้ในการไทเทรต

32 = มิลลิกรัมสมมูลของ SO_2

W = น้ำหนักของตัวอย่างเปลือกหรือเนื้อผลล้าใบ (กรัม)



ภาคผนวก จ

ภาพบางส่วนจากการเก็บข้อมูลภาคสนาม

ภาพบางส่วนจากการเก็บข้อมูลภาคสนาม



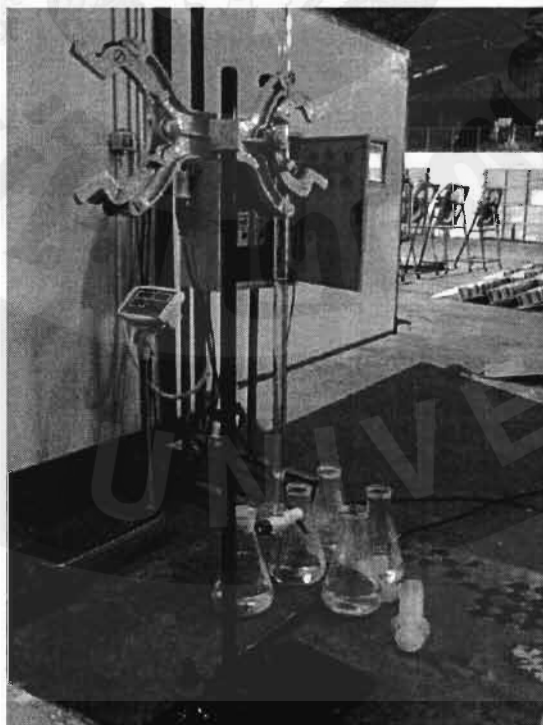
ภาพผนวก 19 ลำไยสดในห้องรม SO_2 กับผลลำไยสดระดับอุตสาหกรรม



ภาพผนวก 20 ลำไยสดก่อนเข้าห้องรมในโรงงานรม SO_2 กับผลลำไยสดระดับอุตสาหกรรม



ภาพผนวก 21 หอกำจัด SO_2 จากห้องรม SO_2 ก่อนปล่อยสู่บรรยากาศ



ภาพผนวก 22 ชุดอุปกรณ์ไทเทรต จากการสุ่ม SO_2 จากห้องรม



ภาพผนวก 23 ถังอัดความดันบรรจุ SO_2 ความบริสุทธิ์ 99.99%



ภาพผนวก 24 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัด SO_2 ในการเก็บข้อมูลภาคสนาม



ภาคผนวก จ

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

นายนราธิป สุจินดา

เกิดเมื่อ

23 พฤษภาคม 2529

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2544 จบมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนคาราวิทยาลัย
จังหวัดเชียงใหม่

พ.ศ. 2547 จบมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนคาราวิทยาลัย
จังหวัดเชียงใหม่

พ.ศ. 2551 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอาหาร)
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

ประสบการณ์

พ.ศ. 2551- ผู้ช่วยนักวิจัย คณะวิศวกรรมและอุตสาหกรรมเกษตร

พ.ศ. 2553 มหาวิทยาลัยแม่โจ้

ผลงานทางวิชาการ

นราธิป สุจินดา จาคูพงศ์ วาฤทธิ์ จักรพงษ์ พิมพ์พิมล ชนวัฒน์
นิทัศน์วิจิตร และสมเกียรติ จตุรงค์กล้าเลิศ. 2554. ค่าตอบสนองของอุปกรณ์
ตรวจวัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ความเข้มข้นสูงที่ใช้ในการยืดอายุผลลำไย
สด. ใน งานสัมมนาวิชาการวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวแห่งชาติ ครั้งที่ 9, 23-
24 มิถุนายน 2554 ณ โรงแรมพญาปาร์ค บีช รีสอร์ท. ชลบุรี: ศูนย์
นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว.