รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ต้นแบบไร่กาแฟอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์ และปัญญาประดิษฐ์ เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมไทย

Development of Smart Coffee Farm Using IoT, Sensor and Artificial Intelligence Technology for Upgrading Thai Coffee Industry

โดย ผศ. ดร. ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ และคณะ

เดือน ตุลาคม ปี 2565

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ต้นแบบไร่กาแฟอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์ และปัญญาประดิษฐ์ เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมไทย

Development of Smart Coffee Farm Using IoT, Sensor and Artificial Intelligence Technology for Upgrading Thai Coffee Industry

โดย ผศ. ดร. ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ

ผศ. ดร. ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ สังกัด ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยมหิดล หัวหน้าโครงการ

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เพราะได้รับความกรุณา แนะนำ ช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งจาก เกษตรกรผู้ปลูกกาแฟ ผู้ประกอบการ และผู้ผลิตกาแฟ ณ จังหวัดเชียงใหม่ ได้แก่ วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง อ.ดอยสะเก็ด กลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อ.ดอยสะเก็ด กลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านแม่ตอนหลวง อ.ดอยสะเก็ด กลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง อ.แม่ออน กลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกา แม่กำปอง อ.แม่ออน โครงการหลวงแม่หลอด อ.แม่แตง กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ อ.แม่แตง ที่ได้กรุณาให้แนวคิดข้อแนะนำหลายประการ ในการลงพื้นที่สำรวจ และเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อการศึกษา ทำให้งานวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บุคคลกลุ่มตัวอย่าง ที่ให้ความร่วมมือในการเก็บตัวอย่างข้อมูลอย่างเต็มที่ทำให้การศึกษาครั้งนี้สำเร็จ และขอขอบคุณผู้ให้ความช่วยเหลืออีกหลายท่าน ซึ่งไม่สามารถกล่าวนามในที่นี้ได้หมด

ผศ.ดร. ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ

หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อเรื่อง ต้นแบบไร่กาแฟอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์ และปัญญาประดิษฐ์ เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมไทย

หัวหน้าโครงการวิจัย ผศ. ดร. ธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ

คำสำคัญ การบริโภคกาแฟ เทคโนโลยีไอโอที การเกษตรแบบแม่นยำ อุตสาหกรรมแปรรูปกาแฟ และจมูกอิเล็กทรอนิกส์

บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีความต้องการในการบริโภคกาแฟสูงขึ้นทุกปี ในขณะที่ปัจจุบันกำลังการผลิตกาแฟในประเทศยังไม่เพียงพอทำให้ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศจำนวนมาก ถึงแม้เมล็ดกาแฟของไทยจะมีคุณภาพค่อนข้างดี โดยเฉพาะกาแฟพันธุ์อะราบิกาทางภาคเหนือนั้น ขึ้นชื่อว่ามีคุณภาพระดับโลก สามารถจดทะเบียนสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์และได้รับการยอมรับจากวงการกาแฟ ว่ามีรสชาติหอมอร่อย และมีเอกลักษณ์ แต่ด้วยการแข่งขันของกาแฟจากประเทศเพื่อนบ้าน เช่น ลาว และ เวียดนาม ที่มีราคาถูกกว่ามาก ทำให้เกษตรกรและผู้ประกอบการไทย ต้องมีการปรับตัว นำเทคโนโลยีที่สูงขึ้นเข้ามาใช้ เพื่อช่วยในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้สูงขึ้น การพัฒนาเทคโนโลยีที่จะมาช่วยเกษตรกรและผู้ประกอบการตั้งแต่ต้นน้ำไปจนถึงปลายน้ำจึงมีความสำคัญ โครงการนี้จึงมีเป้าหมายในการพัฒนาเทคโนโลยีทั้งที่เป็น Pre-Harvest Technology สำหรับช่วยเหลือเกษตรกรในการดูแลการเพาะปลูกกาแฟในพื้นที่ต่าง ๆ ไปจนถึง Post-Harvest Technology ที่จะช่วยเหลือผู้ประกอบการในการศึกษาและพัฒนารสชาติ และกลิ่นของกาแฟไปสู่เกรดพรีเมี่ยม เพื่อให้สามารถแข่งขันกับกาแฟราคาถูกจากประเทศเพื่อนบ้านได้ จากการลงพื้นที่และเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงการพัฒนาเทคโนโลยีให้สอดคล้องกับบริบทของเกษตรกรและผู้ประกอบการในประเทศไทย ทำให้โครงการวิจัยนี้สามารถพัฒนา ต้นแบบอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอทีสำหรับเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมในไร่กาแฟ ที่สามารถติดตั้งได้จริงในพื้นที่ปลูกกาแฟ สามารถส่งข้อมูลกลับมายังส่วนกลางเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมและกลิ่นของกาแฟในแต่ละพื้นที่ได้ นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาอุปกรณ์เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับใช้ในการเก็บข้อมูลกลิ่นของกาแฟชนิดต่าง ๆ สามารถใช้เป็นข้อมูลในการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของเมล็ดกาแฟไทยเพื่อให้ไปสู่ระดับพรีเมี่ยม และสามารถแข่งขันกับเมล็ดกาแฟจากต่างประเทศได้ต่อไป

สารบัญ

		หน้า
	สารบัญตาราง	
	สารบัญภาพ	
	ข้อมูลทั่วไปและผลผลิตที่ได้จากโครงการวิจัย	
	บทที่ 1 บทนำ	1
1.1	หลักการและความสำคัญ	1
1.2	ทฤษฎีและสมมติฐานของโครงการวิจัย	4
1.3	กรอบแนวคิดของการวิจัย	5
	บทที่ 2 ข้อมูลพื้นฐานและองค์ประกอบสำคัญของกาแฟในไร่	8
2.1	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกาแฟ	8
2.1.1	สายพันธุ์ของกาแฟ	8
2.1.2	ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกาแฟอะราบิกา (Arabica Coffee Botany)	9
2.1.3	การปลูกกาแฟพันธุ์อะราบิกา	10
2.1.4	การเก็บเกี่ยวกาแฟ	11
2.1.5	ปัญหาที่พบในไร่กาแฟ	11
2.1.6	การแปรรูปกาแฟ	12
2.1.7	การคั่วกาแฟ (Roasting)	13
2.2	รายละเอียดพื้นที่การสำรวจที่ปลูกกาแฟ	13
2.2.1	วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	15
2.2.2	กลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	20
2.2.3	กลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านแม่ตอนหลวง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	26
2.2.4	กลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่	31
2.2.5	กลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกาแม่กำปอง อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่	37
2.2.6	โครงการหลวงแม่หลอด อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่	42
2.2.7	กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่	46
2.3	รูปแบบฐานข้อมูลสภาพแวดล้อมในไร่กาแฟ	51
2.3.1	ข้อมูลสภาพแวดล้อมทางการเกษตร (microclimate, meso-climate, macroclimate)	51
2.3.2	ตัวอย่างผลการศึกษาสภาพแวดล้อมทางการเกษตร และการนำไปใช้ประโยชน์	52

	บทที่ 3 ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับเซนเซอร์และเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์	59
3.1	ข้อมูลพื้นฐานและหลักการของเซนเซอร์	59
3.1.1	แผนที่ติดตั้งเซนเซอร์ไอโอทีเพื่อตรวจวัดสภาพแวดล้อมในพื้นที่เพาะปลูกกาแฟ	59
3.1.1.1	แผนที่ไร่กาแฟสำหรับติดตั้งเซนเซอร์ไอโอทีในโครงการ	59
3.1.1.2	การทดสอบสัญญาณไอโอที	64
3.1.2	สถาปัตยกรรมของระบบไร่กาแฟอัจฉริยะ	73
3.1.2.1	ทฤษฎีเกษตรแม่นยำ และ เทคโนโลยีคู่แฝดดิจิทัล	73
3.1.2.2	สถาปัตยกรรมของระบบไร่กาแฟอัจฉริยะ	80
3.1.3	รูปแบบเซนเซอร์ไอโอทีชนิดต่างๆ ที่พัฒนาขึ้น	84
3.1.3.1	ชนิดและคุณสมบัติของเซนเซอร์ตรวจวัดชนิดต่างๆ	84
3.1.3.2	การประกอบอุปกรณ์สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอที	86
3.1.3.3	ผลการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ	92
3.2	หลักการและผลงานศึกษาเบื้องต้นของกลิ่นกาแฟ ด้วยเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์	95
3.2.1	ทฤษฎีและหลักการของเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์	95
3.2.2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลิ่น และเรื่องของกลิ่นกาแฟ	99
	บทที่ 4 ผลการดำเนินงานการติดตั้งเซนเซอร์ และการทดสอบด้วยจมูกอิเล็กทรอนิกส์	109
4.1	ผลการดำเนินงานของเซนเซอร์	109
4.1.1	การติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูก	109
4.1.1.1	การพัฒนาสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอที	109
4.1.1.2	ผลการทดสอบสถานีในระดับห้องปฏิบัติการ	116
4.1.2	ผลการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูกจริง	118
4.1.2.1	สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด	119
4.1.2.2	สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน บ้านพ่อหลวง ธีรเมศร์	122
4.1.2.3	สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน โครงการหลวงตีนตก	125
4.1.2.4	สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง โครงการหลวงม่อนเงาะ	128
4.1.3	ระบบฐานข้อมูลและเว็บไซต์แสดงผล สถาปัตยกรรม รูปแบบการรับส่งข้อมูล	131
4.1.4	ผลการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูก	137
4.1.4.1	การใช้งานเว็บไซต์สำหรับแสดงผลข้อมูล	137
4.1.4.2	ผลข้อมูลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างแต่ละสถานี	139

4.1.5	การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ของตัวแปรต่าง ๆ	152
4.1.6	ต้นทุนของอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอที	153
4.2	ผลการดำเนินงานของเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์	154
4.2.1	การทดลองตรวจวัดกลิ่นกาแฟด้วยเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์	154
4.2.2	วิธีการทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	156
4.2.3	ผลการวิเคราะห์กลิ่นเบื้องต้น	160
4.2.4	สรุปผลการตรวจวัดกลิ่นของกาแฟด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น	176
4.2.5	การพัฒนาจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการตรวจวัดกาแฟ	177
4.2.5.1	การพัฒนาเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจวัดกาแฟ	177
4.2.5.2	การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับตรวจวัดกลิ่นกาแฟ	184
4.2.5.3	ผลการตรวจวัดกลิ่นกาแฟขั้นต้น	193
4.2.6	ผลการศึกษาคุณภาพกลิ่นกาแฟจากความหลากหลายแหล่งการเพาะปลูก	203
4.2.7	ผลการพัฒนาซอฟต์แวร์รูปแบบปรับปรุงใหม่	213
4.2.8	ผลการพัฒนาการตรวจวัดกลิ่นกาแฟขณะคั่วด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	219
4.2.9	ผลการพัฒนาซอฟต์แวร์รูปแบบปรับปรุงใหม่	222
	บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	226
	เอกสารอ้างอิง	228

สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	แสดงแสดงผลของการเก็บเกี่ยวกาแฟต่อคุณภาพเมล็ด	11
ตารางที่ 2	แสดงข้อมูลไร่กาแฟที่ทำการสำรวจระหว่างวันที่ 11-15 กุมภาพันธ์ 2563 จังหวัดเชียงใหม่	13
ตารางที่ 3	แสดงข้อมูลตำแหน่งไร่กาแฟสำหรับติดตั้งเซนเซอร์ไอโอทีในพื้นที่อำเภอดอยสะเก็ด อำเภอแม่ออน และ อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่	60
ตารางที่ 4	แสดงรายการซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในการพัฒนาระบบจัดการข้อมูล ระบบฐานข้อมูล และระบบแสดงผลของเซนเซอร์ไอโอทีในโครงการ	64
ตารางที่ 5	แสดงผลการทดสอบสัญญาณ IoT ในบริเวณพื้นที่ปลูกกาแฟต่าง ๆ ในจังหวัดเชียงใหม่	72
ตารางที่ 6	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยี NB-IoT และ 4G กับความต้องการอุปกรณ์เซอร์ไอโอทีในโครงการ	72
ตารางที่ 7	แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลย NB-IoT และ 4G กับความต้องการของอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอทีในโครงการ	80
ตารางที่ 8	แสดงคุณสมบัติของสถานีเซนเซอร์ไอโอที เพื่อตรวจวัดสภาพแวดล้อมในพื้นที่เพาะปลูก	85
ตารางที่ 9	แสดงข้อมูลเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งในสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศอัจฉริยะ	86
ตารางที่ 10	แสดงผลการทดสอบการทำงานของสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการ	93
ตารางที่ 11	แสดงข้อมูลเบื้องต้นของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิดในเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	97
ตารางที่ 12	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟดิบส่วนที่ไม่ระเหย	102
ตารางที่ 13	แสดงกลุ่มของสารระเหยที่ส่งผลต่อกลิ่นของกาแฟคั่วบด	103
ตารางที่ 14	แสดงกลุ่มของสารระเหยที่มีลักษณะกลิ่นคล้ายกัน: ความเข้มข้นในกาแฟอะราบิกาคั่วกลางจากประเทศโคลอมเบีย	104
ตารางที่ 15	แสดงระดับการคั่วเมล็ดกาแฟ	106
ตารางที่ 16	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟคั่ว (โดยน้ำหนักแห้ง)	107
ตารางที่ 17	แสดงข้อมูลเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งในสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศอัจฉริยะ	109
ตารางที่ 18	แสดงผลการทดสอบการทำงานข้อสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการ	116
ตารางที่ 19	แสดงข้อมูลสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตของกาแฟ	136
ตารางที่ 20	แสดงวันที่ทำการติดตั้งสถานี	140
ตารางที่ 21	สรุปข้อมูลสภาพแวดล้อมของพื้นที่เก็บข้อมูลทั้ง 4 จุด	140
ตารางที่ 22	แสดงความถี่ของอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงระยะเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล	144

ตารางที่ 23	แสดงปริมาณพลังงานที่พืชได้รับต่ำสุดและสูงสุดในแต่ละวันของแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล	147
ตารางที่ 24	แสดงปริมาณน้ำฝนสะสมตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บข้อมูลของแต่ละพื้นที่	147
ตารางที่ 25	แสดงข้อมูลโครงสร้างต้นทุนของระบบเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับไร่กาแฟอัจฉริยะ	153
ตารางที่ 26	แสดงข้อมูลไร่กาแฟ ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเล และระดับการคั่วที่แตกต่างกัน	155
ตารางที่ 27	แสดงพื้นที่ปลูกกาแฟ ข้อมูลระดับน้ำทะเล และระดับการคั่วที่แตกต่างกัน	157
ตารางที่ 28	แสดงตัวอย่างกาแฟที่ใช้ในการทดสอบกลิ่น จากพื้นที่ปลูกกาแฟในจังหวัดเชียงใหม่	157
ตารางที่ 29	แสดงสภาวะการวิเคราะห์เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ E-Nose MU	160
ตารางที่ 30	แสดงข้อมูลเบื้องต้นของแก๊สเซนเซอร์แต่ละชนิดในเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	161
ตารางที่ 31	แสดงส่วนประกอบของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	178
ตารางที่ 32	แสดงรายละเอียดของเครื่องคั่วกาแฟ	183
ตารางที่ 33	แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดกลิ่นของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	199
ตารางที่ 34	แสดงชนิดกาแฟและปริมารที่ในการทดสอบ	197
ตารางที่ 35	แสดงชนิดสารตัวอย่าง น้ำหนัก และสภาวะการคั่วกาแฟที่อุณหภูมิ 200°C	201
ตารางที่ 36	แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดกลิ่นของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	205
ตารางที่ 37	แสดงผลการทดสอบระดับความเข้มของกลิ่นเมล็ดกาแฟด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	207
ตารางที่ 38	แสดงการเปรียบเทียบกลิ่นกาแฟตัวอย่างกับกลิ่นกาแฟที่ผ่านการคั่วที่ระยะเวลาแตกต่างกัน	223

สารบัญภาพ

		หน้า
ภาพที่ 1	แสดงแนวคิดของโครงการนี้ ซึ่งจะทำให้เกิด “คู่แฝดดิจิทัล” (Digital Twin) ของไร่กาแฟ และทำให้ผู้ประกอบการและเกษตรกรสามารถดูแลไร่กาแฟได้อย่างแม่นยำ	3
ภาพที่ 2	แสดงแนวคิดของโครงการต้นแบบไร่กาแฟอัจฉริยะ	4
ภาพที่ 3	แสดงสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมในไร่กาแฟ	6
ภาพที่ 4	แสดงประโยชน์ที่ได้จากการนำเทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์ และปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการเกษตร	6
ภาพที่ 5	แสดงประสบการณ์ของคณะวิจัยโครงการนี้ โดยการนำเทคโนโลยีที่กล่าวถึงในโครงการไปติดตั้งในพื้นที่ต่าง ๆ	7
ภาพที่ 6	แสดงลักษณะเมล็ดกาแฟพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา	8
ภาพที่ 7	แสดงลำต้นกาแฟสายพันธุ์อะราบิกา	9
ภาพที่ 8	แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขตของไร่ พิกัด X 19.00378, พิกัด Y 99.287443	15
ภาพที่ 9	แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	16
ภาพที่ 10	แสดงลักษณะต้นกาแฟอายุ 1 ปี (1, 2) ดอกกาแฟ (3) และเมล็ดกาแฟ (4)	17
ภาพที่ 11	แสดงเครื่องสีเมล็ดกาแฟของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ (ยังไม่เปิดใช้งาน)	18
ภาพที่ 12	แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด	18
ภาพที่ 13	แสดงกิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	19
ภาพที่ 14	แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขต พิกัด X 18.99182, พิกัด Y 99.342934	20
ภาพที่ 15	แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันกลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	21
ภาพที่ 16	แสดงต้นและผลกาแฟพันธุ์อะราบิกา	22
ภาพที่ 17	แสดงสถานที่ตากเมล็ดกาแฟกลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	23
ภาพที่ 18	แสดงเครื่องคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟ	23
ภาพที่ 19	แสดงเครื่องคั่วกาแฟ	24
ภาพที่ 20	แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด	24

ภาพที่ 21	แสดงกิจกรรมสำรวจไร่กาแฟกลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	25
ภาพที่ 22	แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขตของไร่ พิกัด X 18.94559, พิกัด Y 99.358468	26
ภาพที่ 23	ถ่ายสภาพพื้นที่ปัจจุบันกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านแม่ตอนหลวง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	27
ภาพที่ 24	แสดงสถานที่ตากเมล็ดกาแฟ	28
ภาพที่ 25	แสดงเครื่องสีเมล็ดกาแฟ (เซอรี่)	29
ภาพที่ 26	แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด (ตราห้วยไร่)	29
ภาพที่ 27	แสดงกิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านแม่ตอนหลวง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่	30
ภาพที่ 28	แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขต พิกัด X 18.885592, พิกัด Y 99.360113	31
ภาพที่ 29	แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบัน ที่ระดับความสูงประมาณ 1,300 เมตร	32
ภาพที่ 30	แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบัน ที่ระดับความสูงประมาณ 1,500 เมตร	32
ภาพที่ 31	แสดงเครื่องคั่วกาแฟ	34
ภาพที่ 32	แสดงห้องบรรจุกาแฟ	34
ภาพที่ 33	แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด (ตรากำปอง คอฟฟี่)	35
ภาพที่ 34	แสดงกิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟกลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่	36
ภาพที่ 35	แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขต พิกัด X 18.866525, พิกัด Y 99.356217	37
ภาพที่ 36	แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันกลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกาแม่กำปอง อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่	38
ภาพที่ 37	แสดงลานตากกาแฟ	39
ภาพที่ 38	แสดงเครื่องคั่วกาแฟ	40
ภาพที่ 39	แสดงห้องบรรจุกาแฟ	40
ภาพที่ 40	แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด (ตราดอยแม่กำปอง คอฟฟี่)	41
ภาพที่ 41	แสดงกิจกรรมสำรวจไร่กาแฟ	41
ภาพที่ 42	แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขตของไร่ พิกัด X 19.101526, พิกัด Y 98.773285	42
ภาพที่ 43	แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันโครงการหลวงแม่หลอด อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่	43
ภาพที่ 44	แสดงกิจกรรมสำรวจไร่กาแฟโครงการหลวงแม่หลอด อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่	45
ภาพที่ 45	แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขต พิกัด X 19.114856, พิกัด Y 98.710489	46
ภาพที่ 46	แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันกาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่	47
ภาพที่ 47	แสดงลักษณะลำต้นและผลกาแฟ	48

ภาพที่ 48	แสดงสถานที่ตากกาแฟ	49
ภาพที่ 49	แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด (ตราเนอมู คอฟฟี่)	49
ภาพที่ 50	แสดงกิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่	50
ภาพที่ 51	แสดงแผนผังแสดงการบูรณาการข้อมูลต่างๆ เพื่อให้เกษตรกรนำมาใช้ทำการเกษตรแบบที่มีภูมิต้านทานต่อสภาพภูมิอากาศ (Climate-Smart Agriculture)	51
ภาพที่ 52	แสดงตัวอย่างแง่มุมของการนำข้อมูลตรวจวัดจากสถานีเซนเซอร์ไอโอทีไปใช้ประโยชน์	53
ภาพที่ 53	แสดงตัวอย่างการนำเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมในไร่นา ไปติดตั้งในพื้นที่ปลูกถั่วแระ	56
ภาพที่ 54	แสดงตารางการเพาะปลูกในรอบปี ซึ่งจะเห็นได้ว่ารอบการเพาะปลูกที่ 1 มีผลผลิตแย่กว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2	56
ภาพที่ 55	แสดงค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ในไร่ถั่วแระในเวลากลางวัน ซึ่งรอบการเพาะปลูกที่ 1 มีค่าสูงกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 ทำให้ต้นถั่วแระมีโรคมากกว่า	57
ภาพที่ 56	แสดงค่าเฉลี่ยของ dew point ในไร่ถั่วแระในเวลาเช้า ซึ่งรอบการเพาะปลูกที่ 1 มีค่าสูงกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 ทำให้ต้นถั่วแระมีโรคมากกว่า เนื่องจากมีโอกาสเกิดหยดน้ำที่ใบมากกว่า	57
ภาพที่ 57	แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดต่ำสุดในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี จะพบว่ารอบการเพาะปลูกที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่างเดือน พ.ค. - พ.ย.	58
ภาพที่ 58	แสดงค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดต่ำสุดในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี จะพบว่ารอบการเพาะปลูกที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่างเดือน พ.ค. - พ.ย.	58
ภาพที่ 59	แสดงตำแหน่งของไร่กาแฟทั้ง 7 พื้นที่ในบริเวณอำเภอดอยสะเก็ด อำเภอแม่ออน และอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่	59
ภาพที่ 60	แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง อำเภอดอยสะเก็ด	60
ภาพที่ 61	แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟกลุ่มวิสาหกิจรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อำเภอดอยสะเก็ด	61
ภาพที่ 62	แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟกลุ่มวิสาหกิจกาแฟเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด	61
ภาพที่ 63	แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟสหกรณ์ชุมชนแม่กำปอง อำเภอแม่ออน	62
ภาพที่ 64	แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟไร่กาแฟป้อหลวงธีรเมศร์ อำเภอแม่ออน	62
ภาพที่ 65	แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟสถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด อำเภอแม่แตง	63
ภาพที่ 66	แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟไร่กาแฟเดอมูร์ อำเภอแม่แตง	63
ภาพที่ 67	แสดงสถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซนเซอร์ไอโอทีที่จะพัฒนาขึ้นในโครงการ	65
ภาพที่ 68	แสดงตัวอย่างหน้าเว็บไซต์สำหรับแสดงผลการทดสอบสัญญาณไอโอที	65

ภาพที่ 69	แสดงสถาปัตยกรรมของเทคโนโลยี LoRaWAN	67
ภาพที่ 70	แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ทดสอบสัญญาณ LoRaWAN	67
ภาพที่ 71	แสดงการทดสอบสัญญาณ LoRaWAN ภาคสนาม	68
ภาพที่ 72	แสดงข้อดีของเทคโนโลยี NB-IoT	69
ภาพที่ 73	แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ทดสอบสัญญาณ NB-IoT	69
ภาพที่ 74	แสดงการทดสอบสัญญาณ NB-IoT ภาคสนาม	70
ภาพที่ 75	แสดงตัวอย่างการทดสอบสัญญาณ 4G โดยใช้แอพพลิเคชัน Speed Test	71
ภาพที่ 76	แสดงแนวคิดของ Precision Agriculture	75
ภาพที่ 77	แสดงการไหลของข้อมูลระหว่างโลกกายภาพกับโลกดิจิทัล ซึ่งแสดงพัฒนาการจาก Digital Model มาสู่ Digital Twin	78
ภาพที่ 78	แสดงข้อดีของเทคโนโลยี NB-IoT	80
ภาพที่ 79	แสดงตัวอย่างการทำงานของ MQTT Broker	81
ภาพที่ 80	แสดงตัวอย่างการใช้งาน Node Red ผ่านทาง Web Browser	82
ภาพที่ 81	แสดงตัวอย่างโครงสร้างการทำงานของ InfluxDB	82
ภาพที่ 82	แสดงตัวอย่างของ User Interaction layer โดยใช้ซอฟต์แวร์ Grafana	83
ภาพที่ 83	แสดงสถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซนเซอร์ไอโอทีที่จะพัฒนาขึ้นในโครงการ	83
ภาพที่ 84	แสดงสถานีเซนเซอร์ไอโอทีที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อติดตั้งในไร่กาแฟ	84
ภาพที่ 85	แสดงภาพส่วนประกอบของสถานีเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ	88
ภาพที่ 86	แสดงสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมจริงสำหรับที่จะนำไปติดตั้งในไร่กาแฟ	89
ภาพที่ 87	แสดงตู้สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม	90
ภาพที่ 88	แสดงเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม	90
ภาพที่ 89	แสดงภาพโครงร่างวิศวกรรมของเสาสำหรับติดตั้งสถานี	91
ภาพที่ 90	แสดงการติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการ	92
ภาพที่ 91	แสดงข้อมูลที่ได้จาการทดสอบสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมตลอดระยะเวลา 1 เดือน	94
ภาพที่ 92	แสดงหลักการทำงานของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ เทียบกับกลไกการรับกลิ่นของมนุษย์	95
ภาพที่ 93	แสดงองค์ประกอบของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose)	97
ภาพที่ 94	แสดงวงล้อกลิ่นและรสชาติกาแฟ (Coffee Taster’s Flavor Wheel)	99
ภาพที่ 95	แสดงการทดสอบดมกลิ่นกาแฟด้วยจมูกมนุษย์	100
ภาพที่ 96	แสดงระดับคะแนนความเข้มข้น (Intensity Score) ของกาแฟ	101
ภาพที่ 97	แสดงภาพส่วนประกอบของสถานีเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ	111

ภาพที่ 98	แสดงสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมจริงสำหรับที่จะนำไปติดตั้งในไร่กาแฟ	112
ภาพที่ 99	แสดงตู้สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม	113
ภาพที่ 100	แสดงเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม	114
ภาพที่ 101	แสดงภาพโครงร่างวิศวกรรมของเสาสำหรับติดตั้งสถานี	115
ภาพที่ 102	แสดงการติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการ	116
ภาพที่ 103	แสดงข้อมูลที่ได้จาการทดสอบสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมตลอดระยะเวลา 1 เดือน	118
ภาพที่ 104	แสดงพื้นที่ติดตั้งสถานี 2 จุดแรกที่สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด และ เขตอำเภอแม่ออน ติดตั้งที่บ้านแม่กำปอง	118
ภาพที่ 105	แสดงข้อดีของเทคโนโลยี NB-IoT	131
ภาพที่ 106	แสดงตัวอย่างการทำงานของ MQTT Borker	132
ภาพที่ 107	แสดงตัวอย่างการใช้งาน Node Red ผ่านทาง Web Browser	133
ภาพที่ 108	แสดงตัวอย่างโครงสร้างการทำงานของ InfluxDB	133
ภาพที่ 109	แสดงตัวอย่างของ User Interaction layer โดยใช้ซอฟต์แวร์ Grafana	134
ภาพที่ 110	แสดงสถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซนเซอร์ไอโอทีที่จะพัฒนาขึ้นในโครงการ	134
ภาพที่ 111	แสดงแผนผังการทำงานของระบบแจ้งเตือนข้อมูล	136
ภาพที่ 112	แสดงตัวอย่างการแจ้งเตือนข้อมูลผ่านแอพพลิเคชัน Line	136
ภาพที่ 113	แสดงข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายสัปดาห์ของแต่ละพื้นที่	141
ภาพที่ 114	แสดงผลข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายสัปดาห์ของแต่ละพื้นที่	142
ภาพที่ 115	แสดงผลข้อมูลอุณหภูมิของดินเฉลี่ยรายสัปดาห์ของแต่ละพื้นที่	143
ภาพที่ 116	แสดงความถี่ของอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล	144
ภาพที่ 117	แสดงข้อมูลความชื้นในดินเฉลี่ยรายสัปดาห์ในแต่ละพื้นที่	145
ภาพที่ 118	แสดงข้อมูลพลังงานสะสมที่พืชได้รับในแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บข้อมูล	146
ภาพที่ 119	แสดงปริมาณน้ำฝนสะสมรายวันของแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล	147
ภาพที่ 120	แสดงข้อมูลทิศทางลมของสถานีโครงการหลวงม่อนเงาะตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล	148
ภาพที่ 121	แสดงข้อมูลทิศทางลมของสถานีโครงการหลวงแม่หลอดตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล	149
ภาพที่ 122	แสดงข้อมูลทิศทางลมของสถานีโครงการหลวงตีนตกตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล	150
ภาพที่ 123	แสดงข้อมูลทิศทางลมของสถานีบ้านแม่กำปองตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล	151

ภาพที่ 124	แสดง Correlation Heatmap ของตัวแปรสภาพแวดล้อมต่าง ๆ	152
ภาพที่ 125	แสดงการจัดการทดลองวัดกลิ่นตัวอย่างด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	156
ภาพที่ 126	แสดงตัวอย่างกาแฟที่ใช้ในการทดสอบกลิ่น	158
ภาพที่ 127	แสดงตัวอย่างกาแฟที่ใช้ในการทดสอบกลิ่นทั้ง 3 แบบ	159
ภาพที่ 128	แสดงสัญญาณเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างกาแฟ	162
ภาพที่ 129	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟแบบคั่วกลาง	163
ภาพที่ 130	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟแบบคั่วเข้ม	163
ภาพที่ 131	แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของเมล็ดกาแฟแบบคั่วกลางและคั่วเข้ม	164
ภาพที่ 132	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟแบบคั่วกลาง (Coffee Beans)	165
ภาพที่ 133	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟแบบคั่วเข้ม (Coffee Beans)	166
ภาพที่ 134	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของผงกาแฟแบบคั่วกลาง	167
ภาพที่ 135	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของผงกาแฟแบบคั่วเข้ม	167
ภาพที่ 136	แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของตัวอย่างผงกาแฟ (Coffee Powder)	168
ภาพที่ 137	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นผงกาแฟแบบคั่วกลาง (Coffee Powder)	169
ภาพที่ 138	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นผงกาแฟแบบคั่วเข้ม (Coffee Powder)	170
ภาพที่ 139	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของกาแฟชงแบบคั่วกลาง	171
ภาพที่ 140	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของกาแฟชงแบบคั่วเข้ม	171
ภาพที่ 141	แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของกาแฟแบบชง (Brewed Coffee)	172
ภาพที่ 142	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นกาแฟชงแบบคั่วกลาง	172
ภาพที่ 143	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟชงแบบคั่วเข้ม	173
ภาพที่ 144	แสดงระดับความเข้มข้นกลิ่นของกาแฟแบบคั่วกลางทั้ง 3 รูปแบบ	174

ภาพที่ 145	แสดงระดับความเข้มข้นกลิ่นของกาแฟแบบคั่วเข้มทั้ง 3 รูปแบบ	174
ภาพที่ 146	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟแบบคั่วกลาง	175
ภาพที่ 147	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟแบบคั่วเข้ม	175
ภาพที่ 148	แสดงส่วนประกอบของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	178
ภาพที่ 149	แสดงระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบพกพา	179
ภาพที่ 150	แสดงเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคั่วกาแฟ (Coffee Roaster)	181
ภาพที่ 151	แสดงเครื่องคั่วกาแฟพร้อมระบบควบคุมแบบดิจิทัล	183
ภาพที่ 152	แสดงหน้าจอและปุ่มการทำงานของเครื่องคั่วกาแฟ (Lasantec)	183
ภาพที่ 153	แสดงแผนการทดลองการทดสอบกลิ่น	193
ภาพที่ 154	แสดงกาแฟเมล็ดพันธุ์อะราบิกาจากพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย	194
ภาพที่ 155	แสดงกาแฟเมล็ดพันธุ์อะราบิกาจากต่างประเทศ	194
ภาพที่ 156	แสดงการเตรียมตัวอย่างกาแฟเพื่อทำการทดสอบกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	196
ภาพที่ 157	แสดงการเตรียมตัวอย่างกาแฟและตรวจวัดกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์	196
ภาพที่ 158	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟสาร (Coffee Beans)	198
ภาพที่ 159	แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของเมล็ดกาแฟสาร (Coffee Beans)	198
ภาพที่ 160	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟสาร (Coffee Beans)	199
ภาพที่ 161	แสดงผลการคั่วกาแฟที่อุณหภูมิ 200°C	200
ภาพที่ 162	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟคั่วบด (Roasted Beans)	201
ภาพที่ 163	แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบด (Roasted Coffee)	202
ภาพที่ 164	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟคั่วที่อุณหภูมิ 200°C (Roasted Coffee Beans)	202
ภาพที่ 165	แสดงเมล็ดกาแฟดิบจากโครงการหลวงแม่หลอด โครงการหลวงม่อนเงาะ โครงการหลวงตีนตก และหมู่บ้านแม่กำปอง	205
ภาพที่ 166	แสดงเมล็ดกาแฟคั่วจากโครงการหลวงแม่หลอด โครงการหลวงม่อนเงาะ โครงการหลวงตีนตก และหมู่บ้านแม่กำปอง	206

ภาพที่ 167	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟดิบ	208
ภาพที่ 168	แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟคั่ว	208
ภาพที่ 169	แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ต่อกลิ่นเมล็ดกาแฟดิบ	209
ภาพที่ 170	แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ต่อกลิ่นเมล็ดกาแฟคั่ว	209
ภาพที่ 171	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟดิบ	211
ภาพที่ 172	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟคั่ว	211
ภาพที่ 173	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟดิบเปรียบเทียบกับคั่ว	212
ภาพที่ 174	แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี HCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟ	212
ภาพที่ 175	แสดงอัตราการตอบสนองของเซนเซอร์รายหัวทั้ง 8 เซนเซอร์	219
ภาพที่ 176	แสดงระดับความเข้มข้นรวมของเมล็ดกาแฟโคลัมเบียตั้งแต่เริ่มต้นและสิ้นสุดการคั่ว	220
ภาพที่ 177	แสดงข้อมูลแผนภาพกลิ่นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการคั่วกาแฟด้วย PCA	221
ภาพที่ 178	แสดงข้อมูลแผนภาพกลิ่นตั้งแต่เริ่มต้นการแตกของเมล็ดกาแฟจนถึงสิ้นสุดการคั่วกาแฟด้วย PCA	221
ภาพที่ 179	แสดงแผนภาพข้อมูลระดับกลิ่นของกาแฟตัวอย่างที่ 1 (sample 1)	224
ภาพที่ 180	แสดงแผนภาพข้อมูลระดับกลิ่นของกาแฟตัวอย่างที่ 2 (sample 2)	224
ภาพที่ 181	แสดงแผนภาพข้อมูลระดับกลิ่นของกาแฟตัวอย่างที่ 3 (sample 3)	225

ข้อมูลทั่วไปของโครงการวิจัย

1. ชื่อโครงการ

ภาษาไทย ต้นแบบไร่กาแฟอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์ และปัญญาประดิษฐ์ เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมไทย

English Development of Smart Coffee Farm Using IoT, Sensor and Artificial Intelligence Technology for Upgrading Thai Coffee Industry

ชื่อหน่วยงาน มหาวิทยาลัยมหิดล

ชื่อหัวหน้าโครงการ (ผู้รับผิดชอบโครงการ)

ชื่อ-นามสกุล นายธีรเกียรติ์ เกิดเจริญ

ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

โทรศัพท์ 083-2454499

อีเมล์ teerakiat@yahoo.com

งบประมาณโครงการ (บาท) 2,674,465 บาท

ระยะเวลาดำเนินงานโครงการ (เดือน) 12 เดือน

2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

2.1 เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์และดิจิทัลชนิดต่างๆ วิทยาศาสตร์ข้อมูลและปัญญาประดิษฐ์ สำหรับการเพาะ ปลูกกาแฟแบบเกษตรแม่นยำ (Pre-harvest) ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมในไร่นา เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดดิน เซนเซอร์ตรวจวัดพืช เซนเซอร์ตรวจวัดอากาศ เป็นต้น โดรนติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดสิ่งแวดล้อม ถ่ายภาพ และทำแผนที่ผลผลิต เทคโนโลยีไอโอที และ คลาวด์อินเทอร์เน็ต เทคโนโลยีการวิเคราะห์ข้อมูลทาง Data Science

2.2 เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเซนเซอร์และดิจิทัลชนิดต่าง ๆ สำหรับอุตสาหกรรมแปรรูปกาแฟ (Post-harvest) ได้แก่ เซนเซอร์ดมกลิ่นกาแฟ (Aroma Sensors) การทำข้อมูลกลิ่นกาแฟ (Digitization of Coffee Aroma) อโรมาแกรม (Aromagram) การนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาช่วยการคัปปิ้ง และเพิ่มมูลค่ากาแฟแปรรูป

2.3 ส่งมอบเทคโนโลยี Pre-harvest และ Post-harvest ในข้อ (1) และ (2) แบบพร้อมใช้งาน ไปช่วยเกษตรกร

ผู้ปลูกกาแฟ และ ผู้ประกอบการผู้ผลิตกาแฟ โดยทดสอบกับกาแฟอะราบิกา เพื่อขยายไปสู่กาแฟโรบัสตาต่อไป

3. ขอบเขตและกิจกรรมการดำเนินงาน

<u>3.1 รูปแบบในการวิจัย</u>

(1) Laboratory Research เป็นการทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อพัฒนาเทคโนโลยีและสร้างอุปกรณ์ ได้แก่

- Plant Sensor Module (การเจริญเติบโตของพืช สภาพการเปียกของใบ โรค และแมลง)
- Microclimate Module (แสงแดด ปริมาณน้ำฝน การไหลของมวลอากาศ อุณหภูมิและความชื้นในอากาศ อุณหภูมิและความชื้นในดิน อินทรีย์วัตถุในดิน)
- Soil Module (อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นอินทรีย์วัตถุของดิน)
- Wireless Networks และระบบพลังงาน
- Sensor Drone โดรนติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดสิ่งแวดล้อม ถ่ายภาพ และทำแผนที่ผลผลิต
- การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ การสร้างชิ้นส่วนบางชนิดด้วย 3D printing
- การพัฒนาระบบฐานข้อมูลบนคลาวด์อินเทอร์เน็ต อัลกอริทึมในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วย Data Science

(2) Field Research เป็นการปฏิบัติงาน และทดลองภาคสนาม เพื่อนำอุปกรณ์ที่พัฒนาจากห้องปฏิบัติการไปติดตั้งในพื้นที่ปลูกกาแฟ เป็นการสาธิตเทคโนโลยีเพื่อเก็บข้อมูล ประสิทธิภาพในการทำงาน และรวบรวมปัญหาจากผู้ใช้มาปรับปรุง รวมทั้งเป็นการปรับหาพารามิเตอร์ที่ดีที่สุด (Optimization) เพื่อให้อุปกรณ์มีอายุการใช้งานคงทนในพื้นที่ใช้จริง มีการนำเครื่องตรวจกลิ่นกาแฟที่พัฒนาโดยคณะวิจัยเข้าไปใช้ในพื้นที่ เพื่อช่วยในกระบวนการแปรรูป เช่น การคั่ว การสร้างสูตรกาแฟ ร่วมกับผู้ประกอบการ โดยมีพื้นที่ทดลอง/สาธิต ดังนี้

- วิสาหกิจชุมชนดอยสะเก็ด ร่วมกับ บริษัทรอยัล บลอสซั่ม คอนซัลแตนท์ จำกัด ซึ่งมีพื้นที่ปลูกกาแฟใน อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่ มากกว่า 2,000 ไร่
- วิสาหกิจชุมชนดอยหลวง ร่วมกับ บริษัท เกษตรดอยหลวง จำกัด ซึ่งมีพื้นที่ปลูกกาแฟใน อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ จำนวน 300 ไร่

(3) Development Research เป็นการพัฒนาต้นแบบของผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ ได้แก่ การพัฒนาต้นแบบเชิงพาณิชย์ร่วมกับเอกชนเพื่อทดสอบตลาด และขยายการใช้ประโยชน์ไปสู่พื้นที่ที่ใหญ่ขึ้น

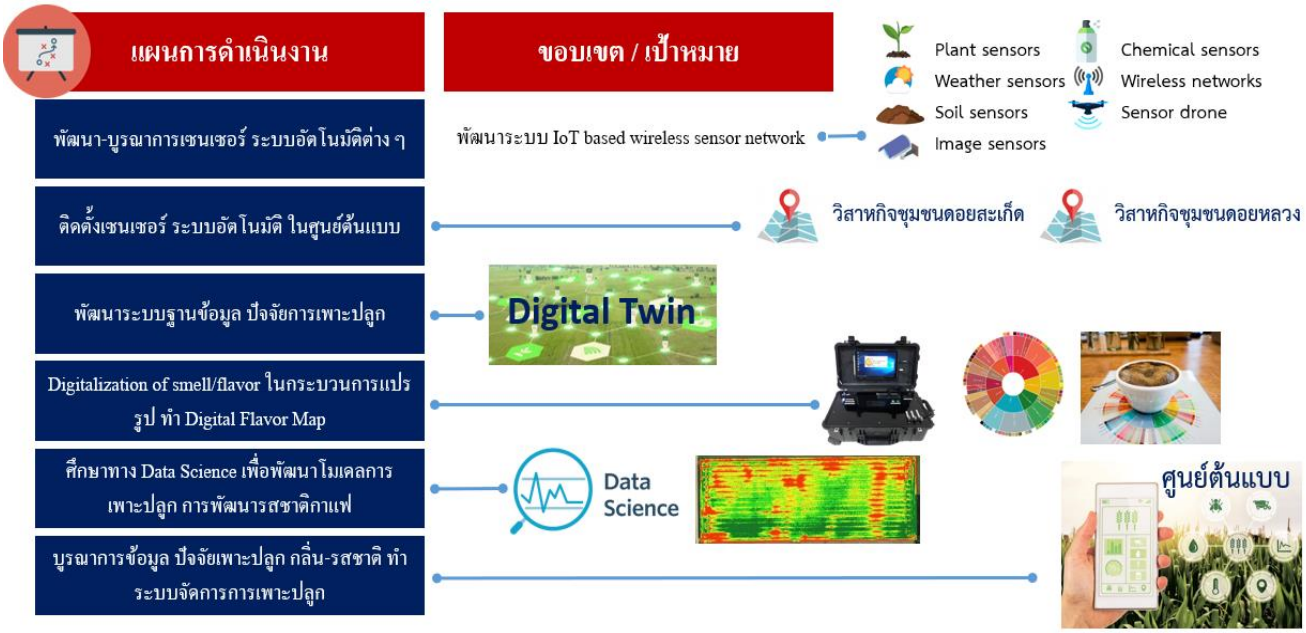
3.2 ขอบเขตของการพัฒนาเทคโนโลยี

(1) พัฒนาเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายในไร่นา สำหรับตรวจวัดปัจจัยการเพาะปลูก และผลผลิตกาแฟโดยมีขอบเขต ดังนี้

- เป็นเทคโนโลยีการตรวจวัดแบบเรียลไทม์ (Real Time)
- เทคโนโลยีสื่อสารอยู่บนพื้นฐานของเทคโนโลยี Zigbee, WIFI, 4G และคลื่นวิทยุย่าน IoT เช่น NB-IoT, LORA
- การตรวจวัดปัจจัยการเพาะปลูก ได้แก่ แสงแดด ความเร็วและทิศทางลม ปริมาณน้ำฝน ความชื้นในอากาศและในดิน สภาพอินทรีย์ธาตุของดิน โรคแมลง อัตราการเจริญเติบโตของพืช สภาพผลผลิต

(2) พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานของไร่ ได้แก่ ระบบสื่อสาร ระบบพลังงานโดยแผนงานวิจัยนี้จะใช้เครือข่าย WIFI และ เครือข่าย Zigbee ที่พัฒนาขึ้นเอง รวมไปถึง 4G และคลื่นวิทยุย่าน IoT ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงและราคาถูก เหมาะสำหรับงานเกษตรกรรม นอกจากนี้ยังต้องมี ระบบพลังงานที่จะป้อนพลังงานแก่เครือข่ายเซนเซอร์ เครือข่ายกล้อง

(3) พัฒนาฐานข้อมูลของไร่ โมเดลการเพาะปลูก รวมไปถึงระบบตัดสินใจ (Decision Support System) App บนระบบสมาร์ทโฟนที่เกษตรกรสามารถเข้าถึงผ่านเครือข่ายไร้สายในไร่นาและบนระบบคลาวด์อินเทอร์เน็ต



ภาพแสดงแนวคิดของโครงการต้นแบบไร่กาแฟอัจฉริยะ

4. วิธีการ/ขั้นตอนการดำเนินงานโครงการ

(1) พัฒนาและบูรณาการชุดเซนเซอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูก ภายใต้ระบบ IoT

- Plant Sensor Module (การเจริญเติบโตของพืช สภาพการเปียกของใบ โรค และ แมลง)
- Microclimate Module (แสงแดด ปริมาณน้ำฝน การไหลของมวลอากาศ อุณหภูมิและความชื้นในอากาศ อุณหภูมิและความชื้นในดิน อินทรีย์วัตถุในดิน)
- Soil Module (อุณหภูมิ ความชื้น ความเป็นอินทรีย์วัตถุของดิน)
- Wireless Networks และระบบพลังงาน
- โดรนถ่ายภาพ และทำแผนที่ผลผลิต

(2) นำเซนเซอร์ที่ผลิตได้ ไปติดตั้งและทดสอบในแปลงปลูกทดลอง ของเกษตรกรและผู้ประกอบการ ใน อ.ดอยสะเก็ด และ อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ ทำแผนที่แปลงปลูกทดลอง เก็บพิกัดต่าง ๆ ในแปลงปลูกทดลอง ศึกษาประวัติผลผลิตใน แบ่งโซนการติดตั้งเซนเซอร์ ทำแผนที่ดิจิทัลโดยใช้ drone

(3) พัฒนาระบบฐานข้อมูลปัจจัยการเพาะปลูก ที่เก็บได้จากเซนเซอร์ตรวจวัดต่าง ๆ

(4) ศึกษาปัจจัยการเพาะปลูก ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการเพาะปลูกกับผลผลิตที่ได้

(5) พัฒนาระบบซอฟต์แวร์ Smart Farm ระบบช่วยตัดสินใจ (Decision Support System) และ App บนสมาร์ทโฟน เปิดให้เกษตรกรทดสอบระบบดังกล่าว

(6) นำเครื่องตรวจวัดกลิ่นกาแฟ (Electronic Nose) มาช่วยในกระบวนการแปรรูป เช่น การคั่ว การสร้างสูตรกาแฟ

(7) ศึกษาเพื่อจัดทำฐานข้อมูลกลิ่นกาแฟ นำข้อมูลกลิ่นกาแฟดิจิทัลมาช่วยในการสร้างสูตรกาแฟที่มีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว ศึกษาเปรียบเทียบการ cupping เพื่อสร้างอะโรมาแกรมของกาแฟ

(8) บูรณาการข้อมูลต่างๆ จากพื้นที่การเพาะปลูก และข้อมูลของกลิ่น-รสชาติกาแฟ ศึกษาทาง Data Science เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเพาะปลูก และการแสดงออกด้านรสชาติ

(9) ขยายขนาดของโครงการนำร่อง ไปสู่พื้นที่อื่น ๆ ที่มีความสนใจ ด้วยการจัดอบรม ออกบูท และ โรดโชว์

5. รายละเอียดโดยย่อของโครงการวิจัย

กิจกรรม	เดือน											
	ไตรมาส ๑			ไตรมาส ๒			ไตรมาส ๓			ไตรมาส ๔		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(1) พัฒนาและบูรณาการชุดเซนเซอร์ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูก												
(2) นำเซนเซอร์ที่ผลิตได้ ไปติดตั้งและทดสอบในแปลงปลูกทดลอง												
(3) พัฒนาระบบฐานข้อมูลปัจจัยการเพาะปลูก ที่เก็บได้จากเซนเซอร์ตรวจวัด												
(4) ศึกษาปัจจัยการเพาะปลูกความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการเพาะปลูกกับผลผลิตที่ได้												
(5) พัฒนาระบบซอฟต์แวร์ Smart Farm ระบบช่วยตัดสินใจ (Decision Support System) และ App บนสมาร์ทโฟน												
(6) นำเครื่องตรวจวัดกลิ่นกาแฟ (Electronic Nose) มาช่วยในกระบวนการแปรรูป เช่น การคั่ว การสร้างสูตรกาแฟ												
(7) ศึกษาเพื่อจัดทำฐานข้อมูลกลิ่นกาแฟ นำข้อมูลกลิ่น												

กาแฟดิจิทัลมาช่วยในการสร้างสูตรกาแฟที่มีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว ศึกษาเปรียบเทียบการ cupping เพื่อสร้างอะโรมาแกรมของกาแฟ												
(8) บูรณาการข้อมูลจากพื้นที่การเพาะปลูก และข้อมูลของกลิ่น-รสชาติกาแฟ ศึกษาทาง Data Science เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเพาะปลูก และ การแสดงออกด้านรสชาติ												
(9) สรุปผล เขียนรายงาน เผยแพร่ผลงานผ่านช่องทางต่าง ๆ												

6. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

(1) *ได้เทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์และดิจิทัลสำหรับการเพาะปลูกกาแฟแบบแม่นยำ* ที่สามารถนำไปใช้ช่วยลดต้นทุนในไร่กาแฟ และเพิ่มคุณภาพและปริมาณผลผลิตต่อไร่ โดยการนำเทคโนโลยีมาใช้ในพื้นที่นำร่อง จะนำมาสู่การลดต้นทุนด้านการใช้ทรัพยากรต่าง ๆ เช่นน้ำ และ สารเคมี ในระดับ 20-80% มีการเพิ่มผลผลิต 20-50%

(2) *เกิดพื้นที่สาธิตการเพาะปลูกกาแฟแบบเกษตรแม่นยำ* สำหรับเป็นศูนย์เรียนรู้ต้นแบบให้เกษตรกรปลูกกาแฟคุณภาพสูง เพื่อขยายผลไปสู่พื้นที่ปลูกกาแฟอื่น ๆ ในภาคเหนือ

(3) *ส่งเสริมวิสาหกิจเริ่มต้น หรือ สตาร์ทอัพ*ที่ดำเนินธุรกิจทางด้านการพัฒนาเทคโนโลยี และระบบสมาร์ทฟาร์ม เซนเซอร์ ระบบอัตโนมัติ สำหรับภาคเกษตรและอาหาร

(4) *เกิดเกษตรกรรุ่นใหม่ด้านการปลูกและแปรรูปกาแฟ* ใน 2 พื้นที่ทดลอง (ดอยหลวง และ ดอยสะเก็ด) ได้จำนวน 50-100 ราย โครงการนี้จะช่วยดึงดูดแรงงานรุ่นใหม่ ๆ คนหนุ่มสาวให้หันมาสนใจการทำเกษตรมากขึ้น จะเกิดแรงงานที่มีคุณภาพสูงขึ้นในภาคเกษตร ช่วยยกระดับเกษตรให้ก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น

(5) *มีการส่งมอบพร้อมใช้งาน*สำหรับเทคโนโลยีทั้ง Pre-harvest กับ Post-harvest มาใช้กับกาแฟ จะทำให้กาแฟเกิดการปรับปรุงด้านภาพลักษณ์ มีการวิจัยด้านรสชาติ สร้าง Gimmick ในตัวผลิตภัณฑ์ อันเป็นผลให้ *กาแฟอะราบิกาภาคเหนือของไทยสามารถอัพเกรดไปสู่ระดับพรีเมียม* ซึ่งจะทำให้มูลค่าเพิ่มไปได้ 100-300 %

7. ตัวชี้วัดผลผลิต

(1) *ได้ศูนย์ต้นแบบไร่กาแฟอัจฉริยะ* จำนวน 2 แห่ง ที่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์ และปัญญาประดิษฐ์ เพื่อการเพาะปลูกและแปรรูปกาแฟ ที่เกษตรกรสามารถเข้ามาเรียนรู้และนำไปพัฒนาต่อยอดในพื้นที่เพาะปลูกของตนเองได้

(2) เกิดการพัฒนา*ผู้ประกอบการ*ทางด้านการผลิตกาแฟอะราบิกาในภาคเหนือ จำนวน 2 แห่ง

(3) เกิดการพัฒนา*วิสาหกิจเริ่มต้นหรือบริษัทสตาร์ทอัพ* จำนวน 2 บริษัท

(4) มีการพัฒนา*นักศึกษาระดับปริญญาโท และ ปริญญาเอก* ทางด้าน Smart Agriculture จำนวน 3 คน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 หลักการและความสำคัญ

ปัจจุบัน ประเทศไทยมีการบริโภคกาแฟสูงขึ้นทุกปี โดยความต้องการของอุตสาหกรรมแปรรูปกาแฟของไทยมีมากถึง 9 หมื่น ถึง 1 แสนตัน ต่อปี แต่เรากลับสามารถผลิตได้เพียงไม่ถึง 3 หมื่นตันต่อปี ทำให้ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศจำนวนมาก ถึงแม้เมล็ดกาแฟของไทยจะมีคุณภาพค่อนข้างดี โดยเฉพาะกาแฟพันธุ์อะราบิกาทางภาคเหนือนั้น ขึ้นชื่อว่ามีคุณภาพระดับโลก สามารถจดทะเบียนสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์และได้รับการยอมรับจากวงการกาแฟ ว่ามีรสชาติหอมอร่อย และมีเอกลักษณ์ แต่ด้วยการแข่งขันของกาแฟจากประเทศเพื่อนบ้าน เช่น ลาว และเวียดนาม ที่มีราคาถูกกว่ามาก ทำให้เกษตรกรและผู้ประกอบการไทย ต้องมีการปรับตัว นำเทคโนโลยีที่สูงขึ้นเข้ามาใช้ เพื่อช่วยในการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันให้สูงขึ้น

จากการออกสำรวจสถานการณ์การเพาะปลูกกาแฟทางภาคเหนือ โดยเฉพาะจังหวัดเชียงใหม่ และสัมภาษณ์ผู้ประกอบการกาแฟ ได้ทราบความต้องการของกลุ่มผู้ผลิตกาแฟดังนี้

- ปัจจุบันการดูแลรักษาต้นกาแฟ ทำได้ยากขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป (Climate Change) ทำให้การคาดคะเนสถานการณ์ต่าง ๆ การควบคุมผลผลิต ทำได้ยากขึ้นเรื่อย ๆ
- เกษตรกรจึงมีความต้องการเทคโนโลยีในการเก็บข้อมูลต่าง ๆ ในพื้นที่เพาะปลูก เพื่อนำมาสู่การสร้างโมเดลการเพาะปลูก เพื่อใช้เพิ่มพื้นที่เพาะปลูกได้ การเตือนภัยล่วงหน้า การทำนายเรื่องโรคและแมลง
- ต้องการเทคโนโลยีเพื่อช่วยลดต้นทุน เช่น การรดน้ำอัตโนมัติ การเก็บเกี่ยว การควบคุมผลผลิตให้มีปริมาณและคุณภาพสม่ำเสมอ ระบบอัตโนมัติ การลดการใช้แรงงาน และการเพิ่มผลผลิต
- การนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาใช้สร้างเอกลักษณ์ของกาแฟ ความน่าเชื่อถือ และน่าบริโภค ทำให้เพิ่มมูลค่ากาแฟ การนำเทคโนโลยีเซนเซอร์มาช่วยดูแลควบคุมคุณภาพการผลิต การคั่วกาแฟ รวมไปถึงการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นเฉพาะตัว

ปัจจัยที่สำคัญ 4 อย่างในงานเกษตรกรรม (กสิกรรม) อันได้แก่ ดิน น้ำ ฟ้า พืช เป็นสิ่งที่เกษตรกรต้องทำการทำนุบำรุง เพื่อที่จะได้ผลผลิตสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยทั่วไปปัจจัยข้อที่สาม หรือ “ฟ้า” (แสงและอากาศ) นั้นอาจจะควบคุมได้ค่อนข้างยาก (นอกเสียจากจะทำเกษตรกรรมในโรงเรือน เช่น การทำไร่บนอาคารสูง (Vertical

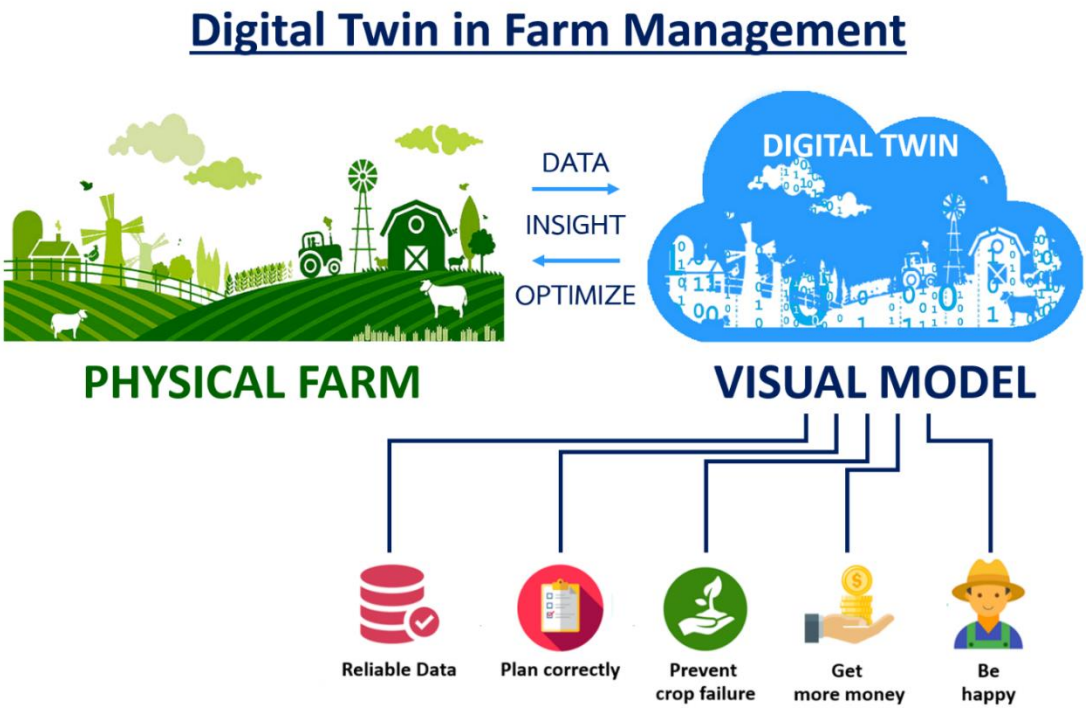
Farming) เป็นต้น) ปัจจัยอื่นๆ ที่เหลือนั้นถือว่าเป็นสิ่งที่เกษตรกรสามารถรับมือได้ ขึ้นอยู่กับเงินทุนและเทคโนโลยีที่มี

ในอดีตที่ผ่านมา การดูแลปัจจัยที่เหลือ 3 อย่าง ได้แก่ ดิน น้ำ และ พืช ในพื้นที่ไร่นานั้น มักเป็นการดูแลแบบพื้นที่กว้าง กล่าวคือให้การดูแลเท่าๆ กันตลอดทั้งไร่ เช่น ให้ปุ๋ยสูตรเดียวกัน เป็นปริมาณเท่า ๆ กันตลอดทั้งไร่นา โดยไม่ได้คำนึงว่าพื้นที่ย่อย ๆ นั้นมีความแตกต่างกัน เช่น ความอุดมสมบูรณ์ของดินในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน ความชื้นของดินไม่เท่ากัน โครงสร้างของดินไม่เท่ากัน ซึ่งก็มีผลทำให้พืชในแต่ละบริเวณให้ผลผลิตทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพไม่เท่ากัน แต่การดูแลกลับดูแลให้เท่า ๆ กัน ซึ่งแทนที่จะเป็นผลดีกลับเป็นผลเสีย เพราะดินในบริเวณที่มีความอุดมสมบูรณ์มากอยู่แล้ว หากได้ปุ๋ยเพิ่มเข้าไปอีกจนมากเกินไป อาจทำให้ดินเสียได้ ในขณะที่ดินบริเวณที่ขาดธาตุอาหาร ก็จะได้ส่วนแบ่งของปุ๋ยเท่า ๆ กันกับดินที่อุดมสมบูรณ์อยู่แล้ว ทำให้พืชในบริเวณนั้นไม่สามารถเติบโตได้เต็มที่ การให้ยาฆ่าแมลงแบบเก่า มักจะฉีดพ่นไปทั่ว ๆ โดยไม่ได้คำนึงว่าบริเวณใดมีแมลงมาก บริเวณใดมีแมลงน้อย ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น อีกทั้งยังเป็นภัยต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งจริง ๆ แล้ว หากการฉีดพ่นยาฆ่าแมลงเป็นไปอย่างฉลาด และสามารถปรับอัตราได้ตามความหนาแน่นของแมลงในพื้นที่ต่าง ๆ จะทำให้ทั้งประหยัด มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม การให้น้ำก็เช่นเดียวกัน ในไร่นาหลาย ๆ แห่งที่มีระบบรดน้ำ ก็มักจะให้น้ำในอัตราที่เท่า ๆ กันทั้งไร่ทั้ง ๆ ที่ดินในแต่ละบริเวณซึ่งมีโครงสร้างทางทั้งทางกายภาพและเคมีแตกต่างกัน จะอุ้มน้ำหรือกักเก็บความชื้นได้ไม่เท่ากัน ทำให้ในไร่นาแบบนั้น ก็จะมีทั้งพืชที่กำลังขาดน้ำปะปนอยู่กับพืชที่สำลักน้ำ

ปัญหาที่กล่าวมานี้จะยิ่งทวีความสำคัญขึ้นไปอีก หากการเกษตรทำในพื้นที่ที่มีความแตกต่างเชิงภูมิประเทศในแต่ละพื้นที่ย่อย ๆ เช่น มีความลาดเอียงที่แตกต่างกัน มีพื้นที่ใกล้น้ำหรือใกล้เขาหรือใกล้ป่า พื้นที่ย่อย ๆ เหล่านั้นย่อมมีคุณสมบัติของดินที่แตกต่างจากพื้นที่อื่น ๆ ไม่นับสภาพภูมิอากาศย่อย (Microclimate) ซึ่งมีความแตกต่างอยู่แล้ว ดังนั้นการดูแลผืนที่ดินแบบเฉลี่ยทำเท่า ๆ กันในพื้นที่กว้าง ย่อมเป็นเรื่องที่ไม่ถูกต้อง อย่างไรก็ตาม การดูแลดินด้วยวิธีใหม่ ที่คำนึงถึงความแตกต่างของแต่ละบริเวณในไร่นา เป็นงานที่ละเอียดอ่อน และใช้แรงงานมาก

การนำเทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์และปัญญาประดิษฐ์ เข้ามาใช้จัดการปัญหาที่กล่าวมานั้นน่าจะเป็นทางออกที่ประเทศไทยถ้าไม่เลือกทำวันนี้ ก็ต้องทำเร็ว ๆ นี้ ด้วยการใช้เทคโนโลยีนี้ เกษตรกรสามารถทราบว่าที่ดินบริเวณใดมีปัจจัยแวดล้อมที่แตกต่างกันอย่างไร ความอุดมสมบูรณ์แตกต่างกันมากเพียงไร การเจริญเติบโตของพืชมีความแตกต่างกันขนาดไหน อันจะนำไปสู่การจัดการความแตกต่างนั้นได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้พืชได้สิ่งที่พืชต้องการอย่างพอดีไม่มากไม่น้อยเกินไป ข้อมูลต่าง ๆ ที่เก็บได้ด้วยเครือข่ายเซนเซอร์นี้ สามารถนำมาจัดทำโมเดลความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการเพาะปลูกกับผลผลิต ซึ่งจะทำให้การดูแลไร่นาในอนาคตอยู่บนพื้นฐานของความเชื่อมโยง

ระหว่าง Input และ Output ได้ ซึ่งโมเดลนี้จะช่วยให้เกษตรกรปรับอัตราการให้ปุ๋ย การให้น้ำ การใช้ทรัพยากรต่าง ๆ อันจะนำมาซึ่งการให้สิ่งที่พืชต้องการที่สอดคล้องกับผลผลิตที่ได้

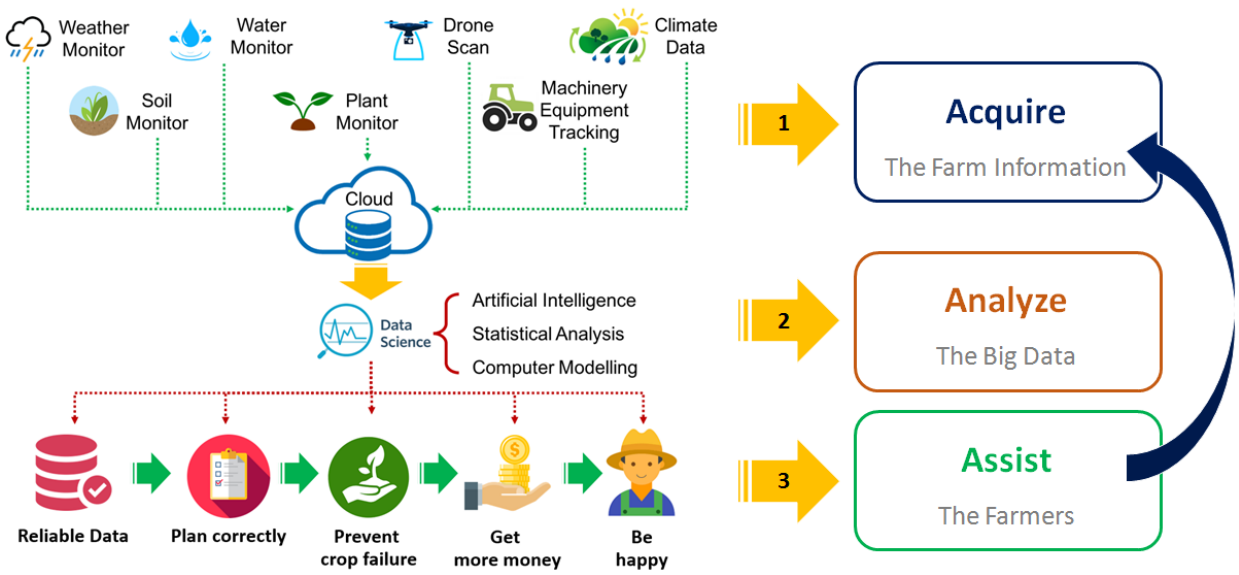


ภาพที่ 1 แสดงแนวคิดของโครงการนี้ ซึ่งจะทำให้เกิด “คู่แฝดดิจิทัล” (Digital Twin) ของไร่กาแฟ และทำให้ผู้ประกอบการและเกษตรกรสามารถดูแลไร่กาแฟได้อย่างแม่นยำ

โครงการนี้ นอกจากจะนำเทคโนโลยีในระดับไร่นา (Pre-harvest) มาใช้เพื่อช่วยทำให้เกิดไร่กาแฟอัจฉริยะแล้ว ยังมีการนำเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว (Post-harvest) มาช่วยปรับปรุงคุณภาพของกาแฟให้ดีขึ้น มีความเป็นพรีเมียมมากขึ้น โดยจะนำเทคโนโลยีเซนเซอร์ตรวจวัดกลิ่นของกาแฟ เพื่อมาช่วยพัฒนาขั้นตอนกระบวนการผลิต เช่น การคั่ว การบด หรือการแปรรูป รวมไปถึงการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นเฉพาะตัว ของผู้ประกอบการ

จากการที่คณะวิจัยมีเทคโนโลยีด้านการเกษตร (AgTech) ที่ค่อนข้างพร้อมใช้ และได้รับการทดสอบ (Field Validation) กับผู้ประกอบการเกษตร-อาหาร มาค่อนข้างหลากหลาย ทำให้เชื่อว่า จะสามารถนำเทคโนโลยีที่มีอยู่นี้มาช่วยเหลือเกษตรกรและผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมกาแฟของไทยได้

1.2 ทฤษฎีและสมมติฐานของโครงการวิจัย



ภาพที่ 2 แสดงแนวคิดของโครงการต้นแบบไร่กาแฟอัจฉริยะ

1) การเกษตรแบบแม่นยำสูง (Precision Farming) ตั้งอยู่บนพื้นฐานของแนวคิดที่ว่าสภาพแวดล้อมต่างๆ รอบต้นพืชที่ทำการเพาะปลูก อันได้แก่ พันธุ์พืชที่ปลูก ดิน น้ำ แสง อากาศ ในไร่นามีความแตกต่างกันในแต่ละบริเวณ แม้ว่าจะอยู่ในไร่เดียวกันก็ตาม สภาพล้อมรอบที่แตกต่างนี้มีผลให้การเกิดผลผลิตแตกต่างกันได้ ดังนั้นการปรับการดูแลให้เหมาะสมกับสภาพที่แตกต่างนั้น จะทำให้สามารถสร้างผลผลิตอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด

2) เมื่อเชื่อว่าสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน แม้แต่ภายในไร่เดียวกันก็มีความสำคัญ เพื่อที่จะจัดการการใช้ทรัพยากร เช่น การให้ปุ๋ย ให้น้ำ ให้สารเคมี ได้เหมาะสมตามที่ควรจะเป็น โดยจะให้แตกต่างกันตามสภาพพื้นที่ย่อย ๆ แทนที่จะให้เท่ากันหมดทั้งไร่ ก่อนอื่นเราจะต้องรู้ข้อมูลนั้นก่อนว่า สภาพแวดล้อมนั้น ๆ มีความแตกต่างกันจริงหรือไม่ โครงการนี้มีเป้าหมายเพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซนเซอร์ทั้งแบบติดตั้งบนพื้นดินและบนหุ่นยนต์บินได้ (Sensor Drone) ที่สามารถเก็บข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพาะปลูกอันได้แก่ แสงแดด ลม ความชื้น ปริมาณน้ำฝน ปริมาณน้ำในดิน การเจริญเติบโตของพืชและผลผลิต ศัตรูโรคพืชต่าง ๆ โดยเซนเซอร์จะถูกนำไปติดตั้งตามตำแหน่งต่าง ๆ ในไร่กาแฟ เพื่อทำการเก็บข้อมูลว่า สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ในเรื่องของพื้นที่เพาะปลูกย่อย พันธุ์ที่ใช้เพาะปลูก วิธีการดูแลที่แตกต่าง จะให้ผลผลิตที่แตกต่างกันอย่างไรได้บ้าง ทั้งนี้ข้อมูลต่าง ๆ นี้จะถูกอัพโหลดขึ้นไปอยู่บนระบบคลาวด์อินเทอร์เน็ต และถูกวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึมทาง Data Science เพื่อหาความหมายและประโยชน์ที่ซ่อนอยู่ในข้อมูลนั้น ๆ

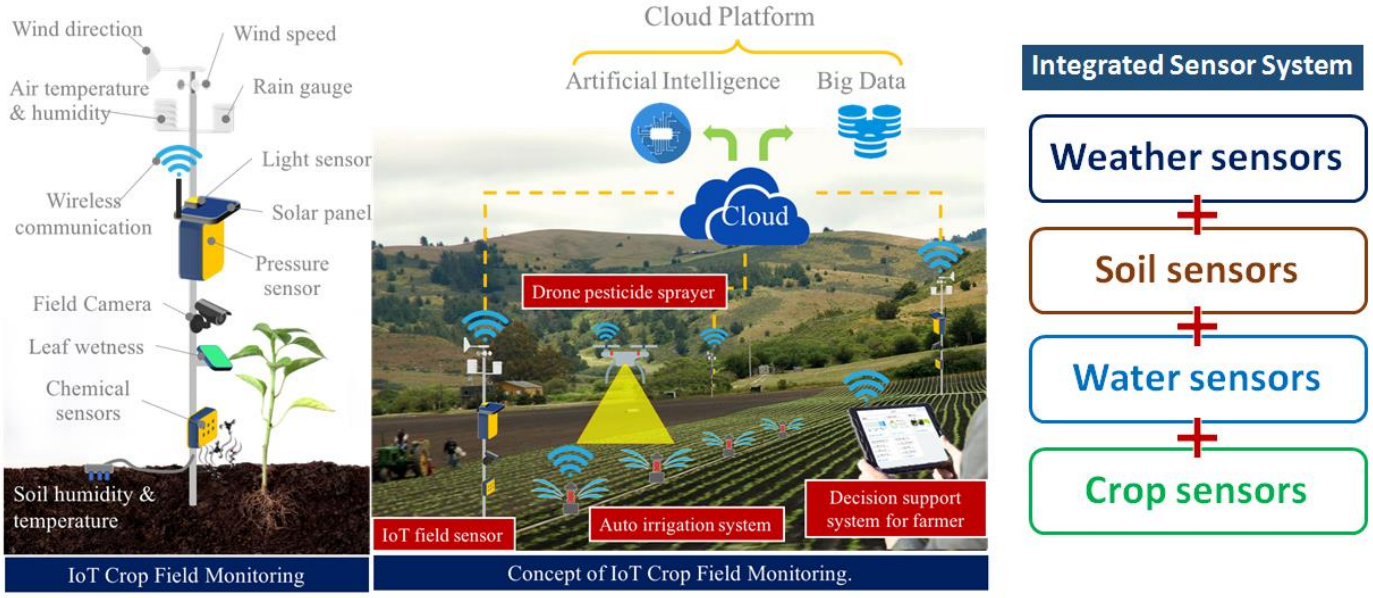
3) โครงการนี้จะศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการเพาะปลูกกับสภาพผลผลิต ซึ่งจะช่วยให้เกษตรกรดำเนินการต่าง ๆ เช่น การให้ปุ๋ย การรดน้ำ การกำจัดศัตรูพืช ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดต้นทุน ซึ่งข้อมูลต่าง ๆ จะถูกบันทึกในฐานข้อมูล ที่สามารถเข้าถึงได้ง่ายผ่าน App บนสมาร์ทโฟน ซึ่ง App นี้จะเชื่อมโยงข้อมูลในพื้นที่เพาะปลูกกับความเคลื่อนไหวทางการตลาด ช่วยอำนวยความสะดวกให้เกษตรกรสามารถรู้ถึงสภาพผลผลิตของกาแฟในแหล่งอื่น ๆ ได้

1.3 กรอบแนวคิดของการวิจัย

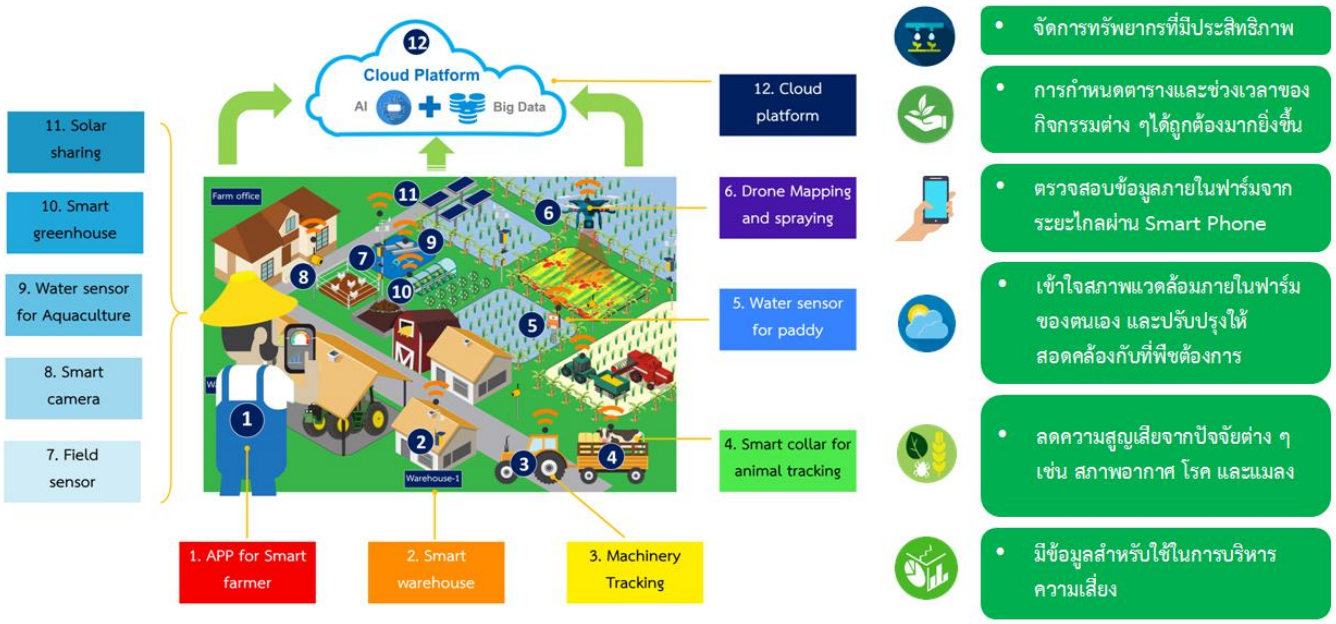
โครงการนี้มีเป้าหมายพัฒนาอุตสาหกรรมกาแฟไทย ให้มีขีดความสามารถในการแข่งขันเพิ่มขึ้น เพื่อสามารถแข่งขันกับกาแฟจากต่างประเทศที่ราคาถูกกว่า ไม่ว่าจะเป็น ลาว เวียดนาม รวมไปถึง กาแฟออสเตรเลียที่กำลังจะได้อานิสงส์จากข้อตกลง FTA โดยประกอบด้วยเทคโนโลยี 2 รูปแบบ ดังนี้

- Pre-Harvest Technology: เทคโนโลยีนี้จะมาช่วยเกษตรกรและผู้ประกอบการในช่วงการดูแลการเพาะปลูก ซึ่งเกษตรกรและผู้ประกอบการไร่กาแฟต้องการต่อสู้กับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป การลดต้นทุนด้านปุ๋ย น้ำ และ แรงงาน การต่อสู้กับโรคและแมลง
- Post-Harvest Technology: เทคโนโลยีนี้จะมาช่วยผู้ประกอบการในช่วงหลังการเก็บเกี่ยวกาแฟไปแล้ว ตั้งแต่เรื่องของการคั่วกาแฟ บรรจุภัณฑ์ รสชาติ ความมีเอกลักษณ์ของกาแฟ ซึ่งผู้ประกอบการไทยมีโจทย์เกี่ยวกับการทำอย่างไรจะทำให้กาแฟไทยแตกต่างจากกาแฟอื่น ๆ การไปสู่เกรดพรีเมียมเพื่อหนีการแข่งขันโดยตรงกับกาแฟราคาถูกจากประเทศเพื่อนบ้าน

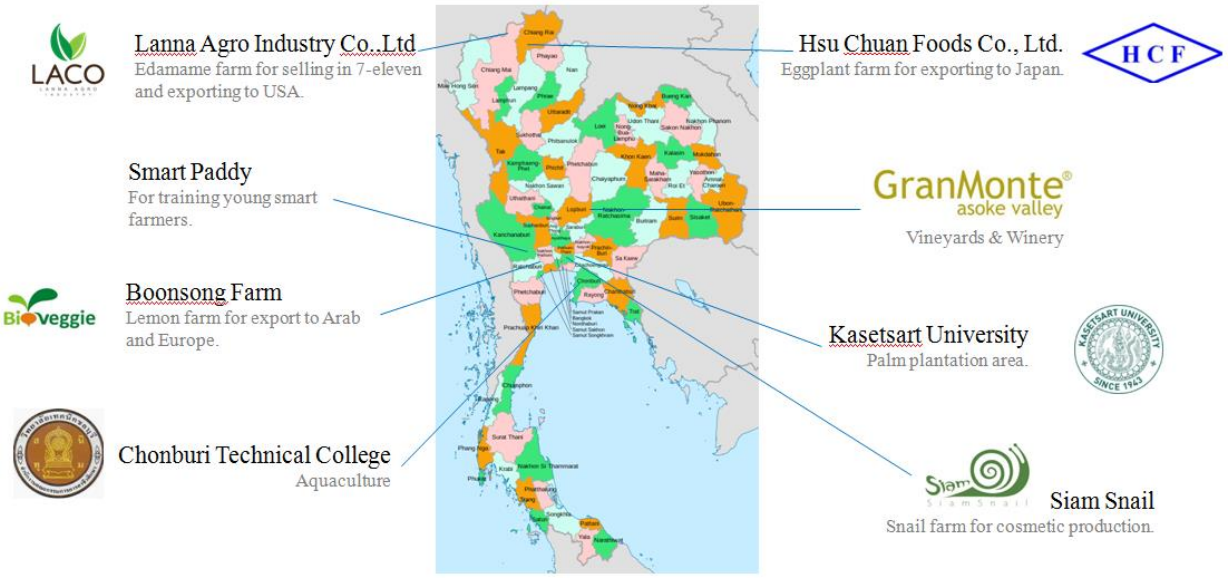
จะเห็นได้ว่า โครงการภายใต้แผนงานนี้ มีการเชื่อมโยงและพึ่งพากันจากช่วง Pre-harvest → Post-harvest ซึ่งข้อมูลที่ได้จากช่วง Pre-harvest ได้แก่ พารามิเตอร์ในการเพาะปลูก น้ำ แสง สภาพอากาศ สภาพโรคและแมลง จะเชื่อมต่อไปสู่ข้อมูลในช่วง Post-harvest ได้แก่ สภาพผลผลิต ราคา กลิ่นและรสชาติ ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลก็จะนำไปสู่การค้นหาเทคนิคการดูแลกาแฟเพื่อให้ได้คุณภาพ ปริมาณผลผลิต และราคาที่ดีขึ้นได้



ภาพที่ 3 แสดงสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมในไร่กาแฟ



ภาพที่ 4 แสดงประโยชน์ที่ได้จากการนำเทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์ และปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการเกษตร



ภาพที่ 5 แสดงประสบการณ์ของคณะวิจัยโครงการนี้ โดยการนำเทคโนโลยีที่กล่าวถึงในโครงการไปติดตั้งในพื้นที่ต่าง ๆ รายละเอียดเพิ่มเติมที่ http://www.smartfarmthailand.com/

บทที่ 2
ข้อมูลพื้นฐานและองค์ประกอบสำคัญของกาแฟในไร่

2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับกาแฟ

2.1.1 สายพันธุ์ของกาแฟ

กาแฟที่ถูกค้นพบมีอยู่หลากหลายสายพันธุ์ แต่ที่นิยมนำมาบริโภคกันโดยทั่วไปจะมีอยู่ 4 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อะราบิกา (Arabica), พันธุ์โรบัสตา (Robusta), พันธุ์เอ็กซ์เซลซา (Excelsa), พันธุ์ลิเบอริกา (Liberica) ซึ่งใน 2 สายพันธุ์หลังนั้นไม่เป็นที่นิยมในการนำมาปลูกเท่าใดนัก เนื่องจากกลิ่นและรสชาติด้อยกว่าพันธุ์อะราบิกา และพันธุ์โรบัสตา

ภาพที่ 6 แสดงลักษณะเมล็ดกาแฟพันธุ์อะราบิกาและพันธุ์โรบัสตา

พันธุ์อะราบิกา (Arabica) มีลักษณะเมล็ดที่ค่อนข้างเรียวและส่วนผ่าตรงกลางนั้นจะมีลักษณะเหมือนรูปตัว S ในภาษาอังกฤษ พื้นที่ที่ใช้ปลูกกาแฟอะราบิกาให้ได้ผลผลิตที่ดีและมีคุณภาพควรจะเป็นพื้นที่สูง อากาศเย็น โดยพื้นที่ปลูกควรอยู่เหนือจากระดับของน้ำทะเลขึ้นไปประมาณ 800 – 1,000 เมตร หรือมากกว่า 1,000 เมตร จึงพบกาแฟพันธุ์อะราบิกาในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย เช่น เชียงราย เชียงใหม่ เป็นต้น

พันธุ์โรบัสตา (Robusta) มีลักษณะของเมล็ดอวบอ้วนและส่วนผ่าตรงกลางจะเป็นเส้นตรง กาแฟพันธุ์โรบัสตาจะปลูกในพื้นที่ต่ำ โดยความสูงจากระดับน้ำทะเลเพียง 500 – 600 เมตร เนื่องจากพันธุ์นี้ต้องปลูกในพื้นที่อากาศชุ่มชื้น เพื่อให้ได้ผลผลิตและคุณภาพที่ดี จึงพบว่านิยมปลูกในแถบภาคใต้ของประเทศไทย เช่น ชุมพร ระนอง สุราษฎร์ธานี เป็นต้น กลิ่นของสายพันธุ์กาแฟโรบัสตาจะค่อนข้างออกไปทางฉุน รสชาติก็จะเข้มข้นและขมกว่าพันธุ์อะราบิกา ส่วนมากจะถูกนำไปผลิตเป็นกาแฟสำเร็จรูป กาแฟพันธุ์โรบัสตาได้รับความนิยมรองลงมาจากพันธุ์อะราบิกา

2.1.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของกาแฟอะราบิกา (Arabica Coffee Botany)

1) รากกาแฟ (Root)

กาแฟมีรากแก้วที่อ้วนสั้น มีความยาวไม่เกิน 45 เซนติเมตร และมีจำนวนรากแขนงแตกออกมาจากรากแก้วได้ประมาณ 4-8 ราก หยั่งลึกลงไปในดินได้ประมาณ 2-3 เมตร หรือมากกว่านั้น จากรากที่หยั่งลึกลงไปในดินจะมีรากอีกจำนวนมากที่แตกออกมา มีความยาว 1-2 เมตร แผ่กระจายขนานไปกับดินในระดับใต้ผิวดินที่ไม่ลึกมากนัก

2) ลำต้นกาแฟ (Stem)

เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่จะสูงถึง 6 เมตรหรือมากกว่านั้น แต่โดยทั่วไปประมาณ 5 เมตร ต้นกาแฟทั่วไปเหมือนลำต้นพืชใบเลี้ยงคู่ชนิดอื่น ๆ ลำต้นมีกิ่งแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ กิ่งตั้ง และ กิ่งนอน กิ่งตั้งหมายถึงกิ่งที่ตั้งตรงขึ้นไปข้างบน รวมไปถึงลำต้นหลักของต้นกาแฟด้วย กิ่งนอนเป็นกิ่งที่เกิดจากกิ่งตั้งซึ่งอาจเป็นกิ่งตั้งแรกหรือที่สอง เรียกว่า กิ่งนอนที่ 1 (Primary Fruiting Branch) จากกิ่งนอนที่ 1 นี้อาจเกิดกิ่งนอนที่ 2 (Secondary Fruiting Branch) จากกิ่งนอนให้ผลที่ 2 ก็อาจเกิดกิ่งนอนที่ 3 หรือ 4 อีกก็ได้

ภาพที่ 7 แสดงลำต้นกาแฟสายพันธุ์อะราบิกา

3) ใบ (Leaf)

ใบเกิดที่ข้อในด้านตรงข้ามกันเป็นคู่ ๆ ใบแก่เต็มที่ด้านบนใบจะมีสีเขียวเข้มเป็นมัน ใบอ่อนจะมีสีเขียวหรือน้ำตาล มักเรียกทั่ว ๆ ไปว่ากาแฟยอดแดงหรือยอดเขียว

4) ดอก (Flower)

กาแฟจะอกดอกเป็นช่อในลักษณะเป็นกลุ่ม ตาดอกทั้ง 6 ตา นับออกไปจากโคนเป็นตาที่ 1-6 นั้น ตาที่สร้างดอกมักเป็นตาที่ 3 หรือ 4 ช่อดอกแต่ละช่อหรือแต่ละกลุ่มประกอบไปด้วยดอก 4 ดอก

5) การผสมเกสร (Pollination)

การถ่ายละอองเกสรจะเกิดขึ้นภายในดอกเดียวกัน (Self-pollination) ส่วนการผสมข้ามดอกเกิดจากอิทธิพลของลมและแมลง

6) ลักษณะผลและเมล็ด (Structure of coffee berry and beans)

ตั้งแต่ดอกบานไปจนกระทั่งถึงผลแก่จะใช้เวลาประมาณ 7-8 เดือน ขนาดของผลโดยทั่วไป จะมีความยาวประมาณ 1.5 เซนติเมตร ผลที่แก่เต็มที่แล้วมีรูปร่างค่อนข้างรี (oval - elliptic) มีก้านผลสั้น เมื่อผลยังดิบอยู่จะมีสีเขียว เมื่อสุกจะมีสีเหลือง ส้ม หรือแดงถึงแดงเข้มขึ้นอยู่กับพันธุ์กาแฟ ผลกาแฟแบ่งออกเป็น 7 ส่วน

7) ต้นกล้า

ต้นกล้าเริ่มงอกใบจริง เมื่ออายุ 6 เดือน ถึง 1 ปี สามารถนำไปปลูกได้

2.1.3 การปลูกกาแฟพันธุ์อะราบิกา

ขั้นตอนในการปลูกกาแฟ มีดังนี้:

- เตรียมพื้นที่ปลูก โดยมีระยะปลูก 2x2 เมตร
- ขุดหลุมขนาด 30x30x30 ซม.
- รองก้นหลุมด้วยปุ๋ยหมัก
- คลุมโคนต้นด้วยหญ้าหรือใบไม้

<u>สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการปลูกกาแฟ</u>

- อากาศเย็น อุณหภูมิ 15-25 องศาเซลเซียส
- พื้นที่มีร่มรำไร มีแสงส่องถึงเพียงพอ
- ถ้าปลูกที่ความสูง 800 เมตร จากระดับน้ำทะเลขึ้นไป จะควบคุมคุณภาพได้ดีกว่า
- พื้นที่มีความชื้นสูง (น้ำฝน 1,750 – 2,000 มิลลิเมตรต่อปี)
- ดินเป็นกรดอ่อนถึงกลาง (pH 4.5 – 5.5) หน้าดินลึก ระบายน้ำได้ดี

2.1.4 การเก็บเกี่ยวกาแฟ

การเก็บเกี่ยวผลผลิตที่เป็นผลสดของกาแฟในประเทศไทยเป็นการเก็บเกี่ยวด้วยแรงงานเกษตรกร โดยการผลิตเฉพาะผลที่สุกแก่จากช่อผลในช่วงต้นหรือปลายฤดูที่มีผลกาแฟสุกเต็มที่ ควรเก็บเกี่ยวผลสุก 80 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ที่มีสีแดง และผลที่มีสีเหลือง-เหลืองเข้ม โดยเก็บทีละข้อ ไม่ควรเก็บแบบรูด การเก็บเกี่ยวที่มีผลสุกเกินไป จะทำให้ได้เมล็ดกาแฟที่มีกลิ่นรสไม่ดี เช่น อาจมีกลิ่นเปรี้ยว หรือรสเปรี้ยวที่เกิดจากการหมักของสารประกอบที่อยู่ภายในเนื้อผลนานเกินไป

ตารางที่ 1 แสดงผลของการเก็บเกี่ยวกาแฟต่อคุณภาพเมล็ด

การเก็บเกี่ยวกาแฟ	**ผลลัพธ์ที่ได้**
เก็บผลเขียว	มีรสชาติเฉพาะเมล็ดกาแฟอ่อน (เขียว: Green Flavor)
เก็บผลสุกงอม	มีรสชาติเฉพาะเมล็ดสุกงอม (หมัก: Fermented)
เก็บผลร่วงตามพื้น	มีรสชาติหมักและเกิดราทำให้มีรสชาติเฉพาะกลิ่นรา (Fermented, Mouldy หรือ Musty)
เก็บผลสดไว้นานหลายวันก่อนนำออกตาก	มีรสชาติหมักและรสชาติกลิ่นรา (Fermented และ Mouldy)

2.1.5 ปัญหาที่พบในไร่กาแฟ

- มอดเจาะผลกาแฟ (ศัตรูพืช)

มอดเป็นแมลงปีกแข็งขนาดเล็ก ลำตัวสีดำ มอดเป็นศัตรูพืชที่สำคัญต่อการปลูกกาแฟในหลายพื้นที่ ซึ่งสามารถสร้างความเสียหายให้กับผลผลิตกาแฟได้มากถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เชื้อราและเชื้อแบคทีเรียจะเข้าไปทำลายผลกาแฟตรงที่ถูกเจาะ ทำให้ผลร่วง ผลผลิตและคุณภาพของกาแฟลดลง

- หนอนเจาะกิ่งกาแฟ/หนอนกาแฟแดง (Red Coffee Borer)

ตัวหนอนมีลำตัวสีแดง โดยจะเจาะเข้าไปกินเนื้อเยื่อภายในกิ่งและลำต้น ทำให้กิ่งและลำต้นแห้งตาย ระบาดมากช่วง เดือน เมษายน - มิถุนายน และ เดือน กันยายน

- ด้วงหนวดยาวกาแฟ (White Coffee Stem-borer)

ด้วงหนวดยาวกาแฟเป็นแมลงที่สำคัญและสร้างความเสียหายอย่างมาก พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นกาแฟที่ปลูกในสภาพกลางแจ้ง โดยเฉพาะกาแฟที่มีอายุมากกว่า 5 ปี หนอนมีสีขาวอมฟ้า มีลำตัวและปีก ยาว 15-20 เซนติเมตร ต้นกาแฟที่ถูกหนอนเจาะทำลายจะแสดงอาการใบเหลือง เหี่ยว และมีอาการยืนต้นตายในที่สุด

- เพลี้ยหอยเขียว (Green Coffee Scale)

เป็นเพลี้ยหอยเกราะอ่อน รูปร่างรี สีเหลืองปนเขียว หลังนูน ทั้งตัวอ่อนและตัวเต็มวัยดูดกินน้ำเลี้ยงบริเวณกิ่ง ก้าน และใบ ทำให้ใบร่วง ต้นกาแฟชะงักการเจริญเติบโต และทรุดโทรมลง หากระบาดในระยะติดผลจะทำให้ผล อ่อนมีขนาดเล็กลง เมล็ดลีบและผลร่วง

- เพลี้ยแป้งกาแฟ (Coffee Mealybug)

เป็นเพลี้ยแป้งรูปไข่ สีชมพูปนม่วงอ่อน มีไขสีขาวปกคลุมอยู่รอบลำตัว เพลี้ยจะดูดกินน้ำเลี้ยงบริเวณยอดอ่อน กิ่ง ก้าน ใบ ทำให้ยอดหงิกงอผิดรูป ต้นชะงักการเจริญเติบโตและทรุดโทรมลง อีกทั้งยังเป็นแหล่งเพาะเชื้อรา

2.1.6 การแปรรูปกาแฟ

หลังจากเก็บเกี่ยวควรแปรรูปทันที ไม่ควรทิ้งผลกองรวมกันมากกว่า 24 ชั่วโมง เนื่องจากกระบวนการหมักในผลกาแฟ จะทำให้เกิดการดูดกลืนกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เช่น กลิ่นดิน กลิ่นเชอร์รี่เน่า (สถาบันวิจัยพืชสวน, 2561) การแปรรูปเมล็ดกาแฟ สามารถทำได้ 3 วิธี คือ การแปรรูปด้วยวิธีเปียก (Wet Process), การแปรรูปด้วยวิธีแห้ง (Dry Process) และ การแปรรูปด้วยวิธี Honey Process

<u>วิธีการแบบเปียก (Wet Process)</u>

การแปรรูปแบบเปียกใช้เวลา 1-2 สัปดาห์

- ขั้นแรกเริ่มจากเก็บผลเชอรี่มาปลอกเปลือกออก ซึ่งต้องทำในวันเดียวกันกับที่เก็บผลเพื่อป้องกันไม่ให้ผลเน่าเสีย
- จากนั้นนำมากำจัดเมือกที่ติดอยู่โดยการนำไปแช่น้ำ แช่ทิ้งไว้ประมาณ 24-36 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้เป็นการล้างทำความสะอาดด้วย
- นำผลกาแฟไปตากแดดให้แห้งบนลานซีเมนต์หรือบนตะแกรงที่ยกสูงจากพื้นดินเพื่อให้ความชื้นระบายออกได้มากยิ่งขึ้น ใช้เวลาตากประมาณ 7 วันจนกว่าเมล็ดกาแฟจะแห้ง กาแฟที่ได้ในขั้นตอนนี้เรียกว่ากาแฟกะลา
- จากนั้นนำไปสีเอากะลา (เปลือกแข็ง) ออก จึงจะได้เป็นกาแฟ หรือเมล็ดกาแฟดิบ เรียกอีกชื่อว่ากาแฟเขียว (Green been)

<u>วิธีการแบบแห้ง (Dry Process)</u>

การแปรรูปแบบแห้ง เหมาะกับการผลิตกาแฟในปริมาณมาก นิยมใช้กับกาแฟพันธุ์โรบัสตา

- ขั้นตอนการทำคือ นำผลเชอรี่ที่เก็บได้มาตากแดดบนลานซีเมนต์

- ในระหว่างวันต้องหมั่นไถกลับด้านเพื่อให้เมล็ดกาแฟแห้งอย่างทั่วถึง ซึ่งต้องใช้เวลาประมาณ 15 วัน หรือจนกว่าจะแห้งดี ขั้นตอนนี้จะได้กาแฟกะลา
- จากนั้นนำไปสีเปลือกแข็งแห้งออก จะได้สารกาแฟของเมล็ดกาแฟดิบ

Honey Process

- ขั้นแรกเริ่มจากเก็บผลเชอรี่มาแช่น้ำ ล้างทำความสะอาด และคัดแยกสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดลอยทิ้ง
- สีเปลือกนอกของผลกาแฟออก
- นำกาแฟที่ขัดเมือกแล้วไปตากประมาณ 15-25 วัน
- กลับด้านเป็นประจำ เนื่องจากเปลือกจะเคลือบด้วยเมล็ด

2.1.7 การคั่วกาแฟ (Roasting)

การคั่วกาแฟ คือ กระบวนการให้ความร้อนกับเมล็ดกาแฟดิบ จนเกิดการเปลี่ยนแปลงของสารในเมล็ดกาแฟดิบกลายเป็นสารที่ให้กลิ่นและรสชาติ การคั่วกาแฟจะให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 180 – 240 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 10 – 20 นาที อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการคั่วจะมีผลต่อความหอมและรสชาติกาแฟ ระดับของการการคั่วโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ คั่วอ่อน คั่วกลาง และคั่วเข้ม

2.2 รายละเอียดพื้นที่การสำรวจที่ปลูกกาแฟ

ในการวิจัยครั้งนี้ คณะวิจัยได้เดินทางไปสำรวจข้อมูลในพื้นที่ไร่กาแฟของผู้ประกอบการ วิสาหกิจชุมชน สหกรณ์ชุมชน และสถาวิจัยโครงการหลวง ในพื้นที่อำเภอดอยสะเก็ด อำเภอแม่ออน และอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์และคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมในการติดตั้งเซนเซอร์ไอโอที

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลไร่กาแฟที่ทำการสำรวจระหว่างวันที่ 11-15 กุมภาพันธ์ 2563 จังหวัดเชียงใหม่

	ชื่อ	รหัสทะเบียน	ที่อยู่	ผู้ติดต่อ	พื้นที่ปลูก (ไร่)	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)	ผลผลิต
1	วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง	6-50-05-13/1-0037	132 หมู่ 5 ต.ป่าเมี่ยง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่ 50220	นายวิทูลย์ ป้องวนาชล	1,000	563	10 ตันต่อเดือน
2	วิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ	6-50-05-14/1-0024	20 หมู่ 1 ต.เทพเสด็จ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่ 50220	คุนายดรัณภพ แก้วกิจเจริญ	180	1,126	20 ตันต่อปี (เชอรี่)

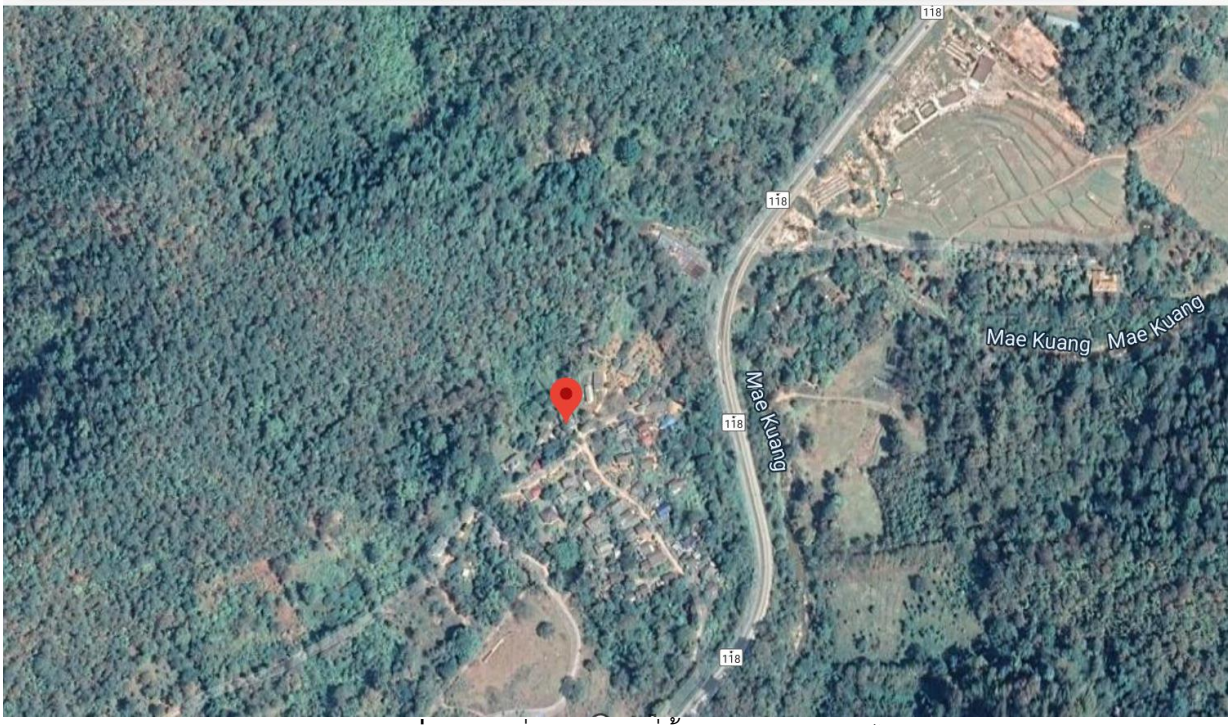
3	กลุ่มวิสาหกิจชุมชนกาแฟสดบ้านแม่ตอน (กาแฟเทพเสด็จ)	6-50-05-14/1-0007	94/1 หมู่ที่ 4 ต.เทพเสด็จ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่ 50220	นายวิสิทธิ์ เกตุรัตน์	300	1,148	30 ตันต่อปี (กะลา)
4	กลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง	-	หมู่ที่ 3 บ้านแม่กำปอง ต.ห้วยแก้ว อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่ 50130	นายธีรเมศร์ ขจรพัฒนภิรมย์	100	1,232	3 ตันต่อปี (กะลา)
5	กลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกาแม่กำปอง	-	52 หมู่ 3 บ้านแม่กำปอง ต.ห้วยแก้ว อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่ 50130	นายประดิษ ถมมา	150	1,140	1 ตันต่อปี (กะลา)
6	สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด	โครงการหลวง	91 หมู่ 10 ต.สบเปิง อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ 50150	นายอนุชา ศรีมา	30	692	5.5 ตันต่อปี (กะลา)
7	กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์	6-50-06-09/1-0023	105/2 หมู่ 2 ต.ป่าแป๋ อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่ 50150	คุณวิชาญ บัวสา	50	890	4-5 ตันต่อปี (กะลา)

*ความสูงจากระดับน้ำทะเลใช้ข้อมูลจาก Google Earth

2.2.1 วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อกลุ่ม/ไร่:	วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง
รหัสทะเบียน:	6-50-05-13/1-0037
ที่ตั้งเลขที่:	132 หมู่ที่ 5 ตำบลป่าเมี่ยง อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220
ลักษณะการประกอบกิจการ:	กลุ่มวิสาหกิจชุมชน
ประธานกลุ่มฯ:	นายวิทูลย์ ป้องวนาชล
โทรศัพท์:	086-185-5411
พื้นที่ปลุกกาแฟทั้งหมด:	1,000 ไร่
จำนวนเกษตรกรผู้เข้าร่วม:	เกษตรกรจาก 3 หมู่บ้าน (หมู่ที่ 1, 2 และ 3)
ความสูงจากระดับน้ำทะเล:	563 เมตร



ภาพที่ 8 แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขตของไร่

พิกัด X 19.00378, พิกัด Y 99.287443

ภาพที่ 9 แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง เป็นวิสาหกิจชุมชนที่ครอบคลุมพื้นที่ 3 หมู่บ้านของตำบลป่าเมี่ยง อำเภอดอยสะเก็ด ได้แก่ เกษตรกรผู้ปลูกกาแฟจากหมู่ที่ 1, 2 และ 3 โดยวิสาหกิจชุมชนฯ จะรับซื้อเมล็ดกาแฟทั้งแบบเชอรี่และกะลาจากเกษตรกร หลังจากนั้นจะส่งเมล็ดกาแฟไปยังโรงสีเมล็ดกาแฟและโรงคั่วกาแฟดอยช้าง อำเภอแม่สรวย จังหวัดเชียงราย เนื่องจากโรงคั่วของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ ยังดำเนินการก่อสร้างไม่แล้วเสร็จ

2. ข้อมูลการปลูกกาแฟ

1) สภาพแวดล้อมและพื้นที่

วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง ตั้งอยู่บนพื้นที่เป็นบริเวณเชิงเขาและที่ราบระหว่างหุบเขา เนื้อดินร่วนซุย เป็นดินร่วนปนทราย

2) พื้นที่ปลูกกาแฟ: 1,000 ไร่

3) ชนิดกาแฟที่ปลูก: อะราบิกา (พันธุ์โครงการหลวง เชียงใหม่ 50)

4) ผลผลิต: 10 ตันต่อเดือน

5) ผลผลิตต่อต้น: -

6) ลักษณะการปลูก: ปลูกใต้ต้นไม้ใหญ่ ที่ให้ร่มเงา

7) สภาพภูมิอากาศ: อากาศหนาวเย็น

8) ฤดูการปลูก: เดือนพฤษภาคม หรือต้นฤดูฝน

9) วิธีการดูแล: น้ำฝนตามธรรมชาติ

10) ปัญหาที่พบ: (1) พบปัญหาการระบาดของมอดเจาะผลกาแฟ และเชื้อราที่ใบ ปัจจุบันแก้ไขโดยการใช้สารเคมีกำจัด (2) ปัญหาด้านแรงงานในการเก็บเกี่ยวผลผลิต

11) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต:แสง อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน

12) มาตรฐานในการปลูก: ไม่มี

13) การเก็บเกี่ยว: มีการเก็บเกี่ยวปีละ 1 ครั้ง โดยเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนเมษายน โดยจ้างแรงงานเก็บผลผลิตในราคา 8-10 บาทต่อกิโลกรัม

14) การจัดการแปลงปลูกหลังการเก็บเกี่ยว: หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว จะแต่งกิ่ง ตัดหญ้า และใส่ปุ๋ย โดยใส่ปุ๋ยเคมี (สูตร NPK) 2-3 ครั้งต่อปี

ภาพที่ 10 แสดงลักษณะต้นกาแฟอายุ 1 ปี (1, 2) ดอกกาแฟ (3) และเมล็ดกาแฟ (4)

3. ข้อมูลการผลิตเมล็ดกาแฟ

3.1 กระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟ

1) กระบวนการแปรรูป: การบวนการแบบเปียก (Wet Process)
2) กระบวนการคัดแยก: มีกระบวนการคัดแยกผลกาแฟที่ไม่สุกและไม่สมบูรณ์ออก
3) สถานที่ตากผลกาแฟ: -
4) การป้องกันฝนและน้ำค้าง: -
5) ระยะเวลาตาก (วัน): 2-3 วัน บนพื้นซีเมนต์ หรือแคร่ โดยกลับเมล็ดกาแฟทุก 1 ชั่วโมง
6) ความชื้นในเมล็ดกาแฟหลังตาก (มกษ.5700, 5701): ความชื้นในเมล็ดกาแฟ 13%
7) เครื่องสีผลกาแฟ:

ภาพที่ 11 แสดงเครื่องสีเมล็ดกาแฟของกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ (ยังไม่เปิดใช้งาน)

ภาพที่ 12 แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด

4. กิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟ

ภาพที่ 13 แสดงกิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง อ.ดอยสะเก็ด จ. เชียงใหม่

2.2.2 กลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อกลุ่ม/ไร่:	วิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ
รหัสทะเบียน:	6-50-05-14/1-0024
ที่ตั้งเลขที่:	20 หมู่ที่ 1 ตำบลเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220
ลักษณะการประกอบกิจการ:	วิสาหกิจชุมชน
ประธานกลุ่มฯ:	นายดรัณภพ แก้วกิจเจริญ
โทรศัพท์:	099-135-3625
พื้นที่ปลูกกาแฟทั้งหมด:	180 ไร่ แบ่งออกเป็นไร่กาแฟ 30 ไร่
จำนวนเกษตรกรผู้เข้าร่วม:	18 ราย
ความสูงจากระดับน้ำทะเล:	1,126 เมตร

ภาพที่ 14 แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขต

พิกัด X 18.99182, พิกัด Y 99.342934

ภาพที่ 15 แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันกลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

วิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ ตั้งอยู่ที่หมู่ 1 ตำบลเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ ดำเนินการเป็นวิสาหกิจชุมชนฯ โดยรับซื้อเมล็ดกาแฟทั้งแบบเชอรี่และกะลาจากเกษตรกร โดยมีลานตากเมล็ดกาแฟขนาดใหญ่ มีโรงสีเชอรี่และโรงคั่วกาแฟ

2. ข้อมูลการปลูกกาแฟ

1) สภาพแวดล้อมและพื้นที่

วิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ ตั้งอยู่บนพื้นที่บนภูเขา ซึ่งมีความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 1,100 เมตร สภาพภูมิอากาศหนาวเย็น

2) พื้นที่ปลูกกาแฟ: 180 ไร่

3) ชนิดกาแฟที่ปลูก: อะราบิกา

4) ผลผลิต: 20 ตันต่อปี (เชอรี่)

5) ผลผลิต: -

6) ลักษณะการปลูก: ปลูกใต้ต้นไม้ใหญ่ ที่ให้ร่มเงา

7) สภาพภูมิอากาศ: อากาศหนาวเย็น

8) ฤดูการปลูก: ตั้งแต่เดือนพฤษภาคม เป็นต้นไป

9) วิธีการดูแล: น้ำฝนตามธรรมชาติ

10) ปัญหาที่พบ: (1) พบปัญหาการระบาดของมอดเจาะผลกาแฟ และเชื้อรา

(2) ปัญหาด้านแรงงานในการเก็บเกี่ยว และแปรรูป

11) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต: แสง อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน

12) มาตรฐานในการปลูก: ไม่มี

13) การเก็บเกี่ยว: มีการเก็บเกี่ยวปีละ 1 ครั้ง โดยเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนกุมภาพันธ์

14) การจัดการแปลงปลูกหลังการเก็บเกี่ยว: หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว จะทำการตัดแต่งกิ่งกาแฟ ตัดหญ้าและใส่ปุ๋ย

ภาพที่ 16 แสดงต้นและผลกาแฟพันธุ์อะราบิกา

3. ข้อมูลการผลิตเมล็ดกาแฟ

3.1 กระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟ

1) กระบวนการแปรรูป: การบวนการแบบเปียก (Wet Process)
2) กระบวนการคัดแยกผลกาแฟ: มีกระบวนการคัดแยกผลกาแฟที่ไม่สุกและไม่สมบูรณ์ โดยใช้คน
3) สถานที่ตากผลกาแฟ: มีลักษณะเป็นลานกว้าง โดยตากเมล็ดเชอรี่บนพื้นปูนซีเมนต์ที่มีผ้าใบพลาสติกรอง (แสงแดด อากาศถ่ายเท ถูกสุขลักษณะ):

ภาพที่ 17 แสดงสถานที่ตากเมล็ดกาแฟกลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

4) การป้องกันฝนและน้ำค้าง: ไม่มี

5) ระยะเวลาตาก: 7-10 วัน (Wash Process), 30 วัน (Honey Process)

6) ความชื้นในเมล็ดกาแฟหลังตาก (มกษ.5700, 5701): ความชื้นในเมล็ดกาแฟ 11-12%

7) เครื่องสีผลกาแฟแห้ง:

ภาพที่ 18 แสดงเครื่องคัดแยกขนาดเมล็ดกาแฟ

3.2 กระบวนการคั่วกาแฟ

การคั่วกาแฟจะมี 3 ระดับ คือ คั่วอ่อนที่อุณหภูมิ 105-106 องศาเซลเซียส, คั่วกลางที่อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียส และคั่วเข้มที่อุณหภูมิ 122-123 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 19 แสดงเครื่องคั่วกาแฟ

ภาพที่ 20 แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด

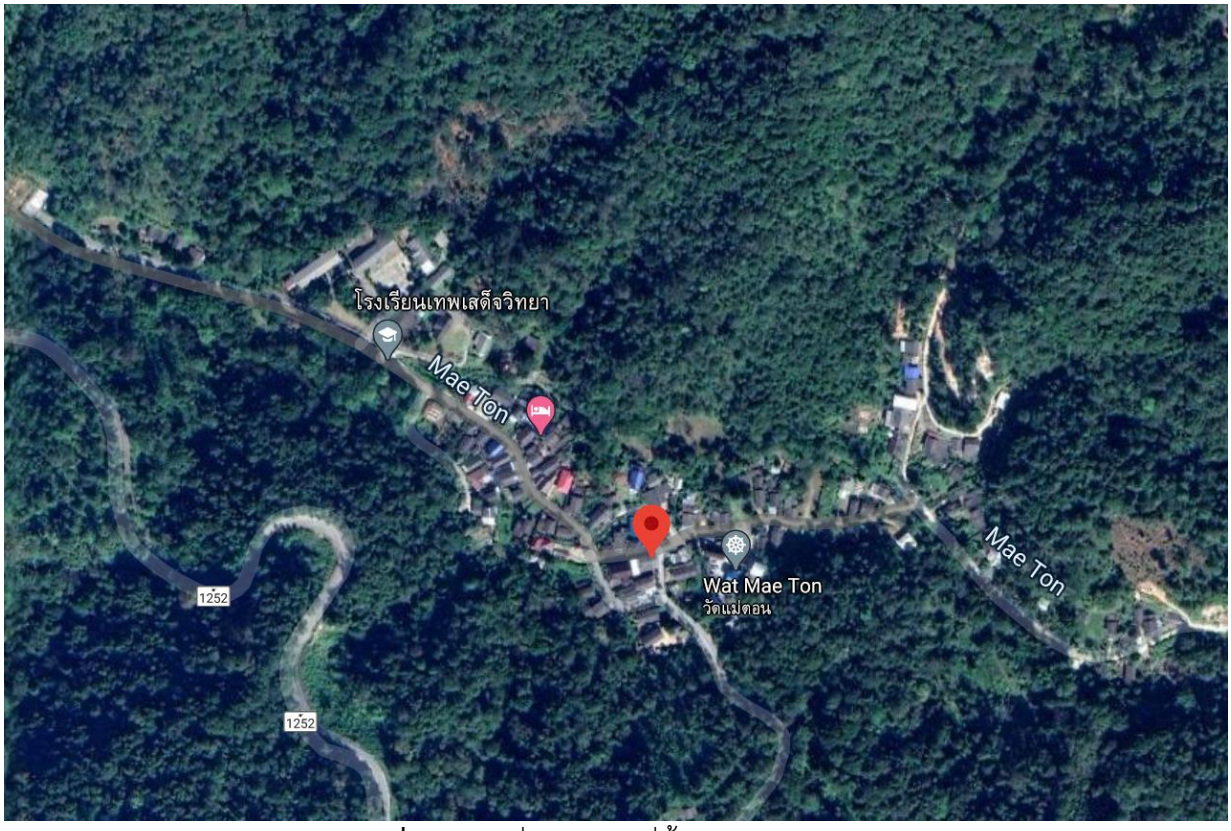
4. กิจกรรมสำรวจไร่กาแฟ

ภาพที่ 21 แสดงกิจกรรมสำรวจไร่กาแฟกลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

2.2.3 กลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านแม่ตอนหลวง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อกลุ่ม/ไร่:	กลุ่มวิสาหกิจชุมชนกาแฟสดแม่ตอน
รหัสทะเบียน:	6-50-05-14/1-0007
ที่ตั้งเลขที่:	94/1 หมู่ที่ 4 ตำบลเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ 50220
ลักษณะการประกอบกิจการ:	กลุ่มวิสาหกิจชุมชน
ประธานกลุ่มฯ:	นายสุวรรณ เทโวขัติ
รองประธานกลุ่มฯ:	นายวิสิทธิ์ เกตุรัตน์
โทรศัพท์:	098-749-4255
พื้นที่ทั้งหมด:	300 ไร่
จำนวนเกษตรกรผู้เข้าร่วม:	34 ราย
ความสูงจากระดับน้ำทะเล:	1,148 เมตร



ภาพที่ 22 แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขตของไร่

พิกัด X 18.94559, พิกัด Y 99.358468

ภาพที่ 23 ถ่ายสภาพพื้นที่ปัจจุบันกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านแม่ตอนหลวง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

กลุ่มวิสาหกิจชุมชนกาแฟสดแม่ตอน ตั้งอยู่ที่หมู่ 4 ตำบลเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด จังหวัดเชียงใหม่ ดำเนินการเป็นวิสาหกิจชุมชนฯ โดยรับซื้อเมล็ดกาแฟทั้งแบบเชอรี่และกะลาจากเกษตรกร เกษตรกรแต่ละรายจะมีเครื่องสีขนาดเล็กใช้สีเมล็ดกาแฟแบบเชอรี่และตากให้แห้งจนเป็นกาแฟกะลา หลังจากนั้นจะนำมาจำหน่วยให้กับกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ โดยกลุ่มวิสาหกิจชุมชนฯ จะทำการแปรรูป และผลิตกาแฟคั่วบดจำหน่ายภายใต้แบรนด์ “ห้วยไร่”

2. ข้อมูลการปลูกกาแฟ

1) สภาพแวดล้อมและพื้นที่

พื้นที่ปลูกจะอยู่บนภูเขาที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลมากกว่า 1,400 เมตร มีสภาพอากาศหนาวเย็น

2) พื้นที่ปลูกกาแฟ: 300 ไร่

3) ชนิดกาแฟที่ปลูก: อะราบิกา โดยในไร่ที่มีอายุต้นกาแฟ 20-30 ปี จะเป็นพันธุ์ทิปปิกา ส่วนในไร่ใหม่จะปลูกสายพันธุ์คาติมอร์ คาทุย และคาทูรา

4) ผลผลิต: 30 ตันต่อปี (รูปแบบกาแฟกะลา)

5) ผลผลิตต่อต้น: -

6) ลักษณะการปลูก: ปลูกใต้ต้นไม้ใหญ่ ที่ให้ร่มเงา และปลูกแซมกับไร่เมี่ยง

7) สภาพภูมิอากาศ: ตั้งอยู่บนพื้นที่เป็นบริเวณเชิงเขาและที่ราบระหว่างหุบเขา

8) ฤดูการปลูก: เริ่มต้นฤดูฝน

9) วิธีการดูแล: น้ำฝนตามธรรมชาติ

10) ปัญหาที่พบ: พบปัญหาการระบาดของมอดเจาะผลกาแฟ และโรคราสนิม

11) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต:แสง อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน

12) มาตรฐานในการปลูก: ไม่มี

13) การเก็บเกี่ยว: มีการเก็บเกี่ยวปีละ 1 ครั้ง โดยเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนมีนาคม

14) การจัดการแปลงปลูกหลังการเก็บเกี่ยว: หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว จะทำการตัดแต่งกิ่งกาแฟ ตัดหญ้า และใส่ปุ๋ย

3. ข้อมูลผู้ผลิตเมล็ดกาแฟ (กลางน้ำ)

3.1 กระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟ

1) กระบวนการแปรรูป:การบวนการแบบเปียก (Wet Process), การบวนการแบบแห้ง (Dry Process), Honey Process
2) กระบวนการคัดแยกผลกาแฟ: มีกระบวนการคัดแยกผลกาแฟที่ไม่สุกและไม่สมบูรณ์
3) สถานที่ตากผลกาแฟ: ถูกสุขลักษณะ อากาศถ่ายเทสะดวก เนื่องจากลานตากตั้งอยู่บนดอย จึงทำให้แสงแดดไม่เพียงพอในการตาก
4) การป้องกันฝนและน้ำค้าง: มีผ้าใบพลาสติกสำหรับคลุมป้องกันฝนและน้ำค้าง

ภาพที่ 24 แสดงสถานที่ตากเมล็ดกาแฟ

5) ระยะเวลาตาก: 7-10 วัน (Wet Process), 15 วัน (Honey Process), 30 วัน (Dry Process)
6) ความชื้นในเมล็ดกาแฟหลังตาก (มกษ.5700, 5701): -
7) เครื่องสีผลกาแฟแห้ง (รูปถ่าย)

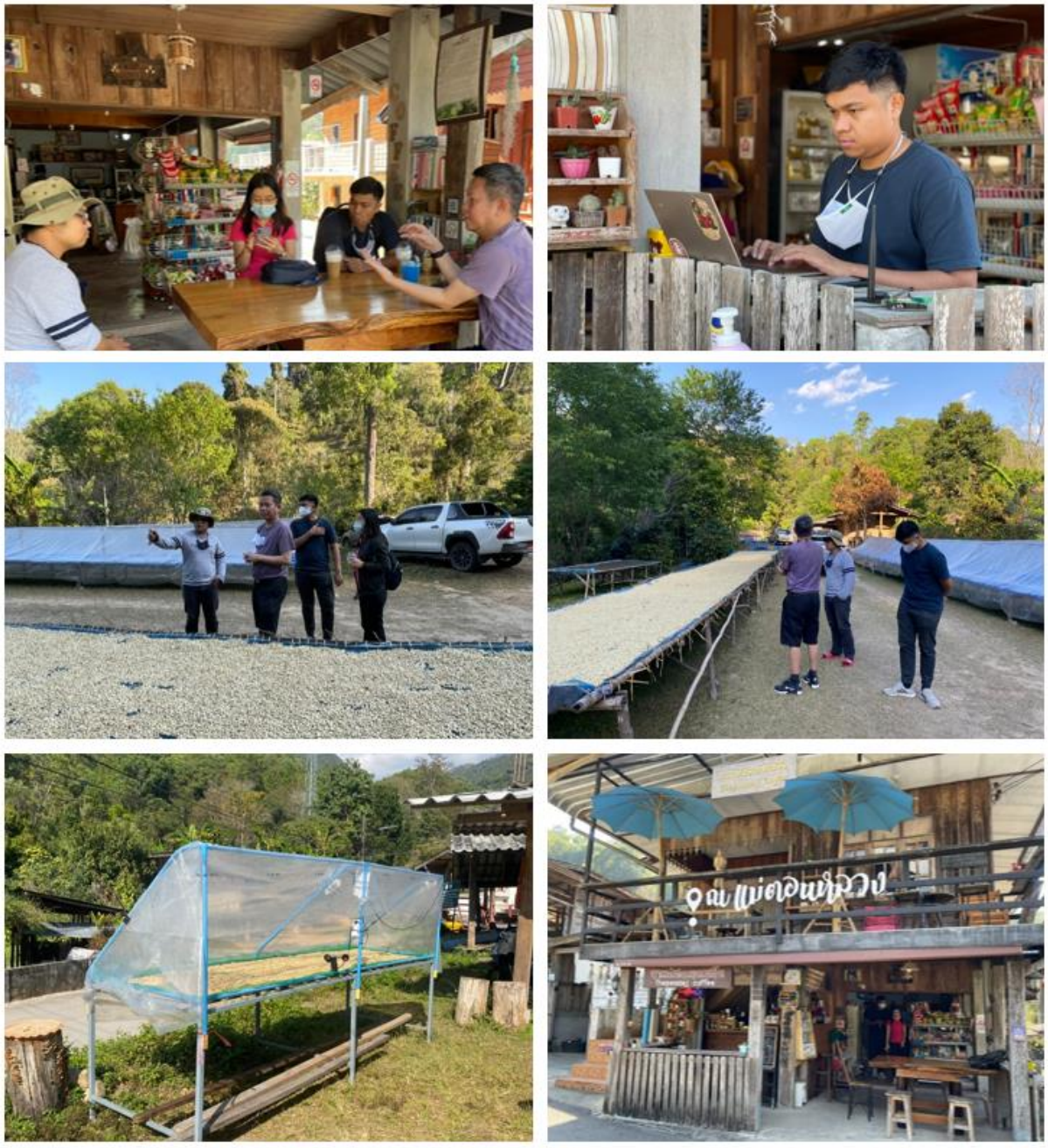
ภาพที่ 25 แสดงเครื่องสีเมล็ดกาแฟ (เซอรี่)

3.2 กระบวนการคั่วกาแฟ

การคั่วกาแฟจะคั่วที่อุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียส โดยมีการคั่วทั้งหมด 3 ระดับ คือ คั่วอ่อน (ใช้เวลา 25 นาที), คั่วกลาง (ใช้เวลา 26 นาที) และคั่วเข้ม (ใช้เวลา 28 นาที) การคั่วแต่ละครั้งจะใช้กาแฟปริมาณ 15 กิโลกรัม

ภาพที่ 26 แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด (ตราห้วยไร่)

4. กิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟ



ภาพที่ 27 แสดงกิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟกลุ่มวิสาหกิจชุมชนบ้านแม่ตอนหลวง อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่

2.2.4 กลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อกลุ่ม/ไร่: กลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง

ที่ตั้งเลขที่: 78/6 หมู่ที่ 3 ตำบลห้วยแก้ว อำเภอแม่ออน จังหวัดเชียงใหม่ 50130

ลักษณะการประกอบกิจการ: ธุรกิจส่วนตัว

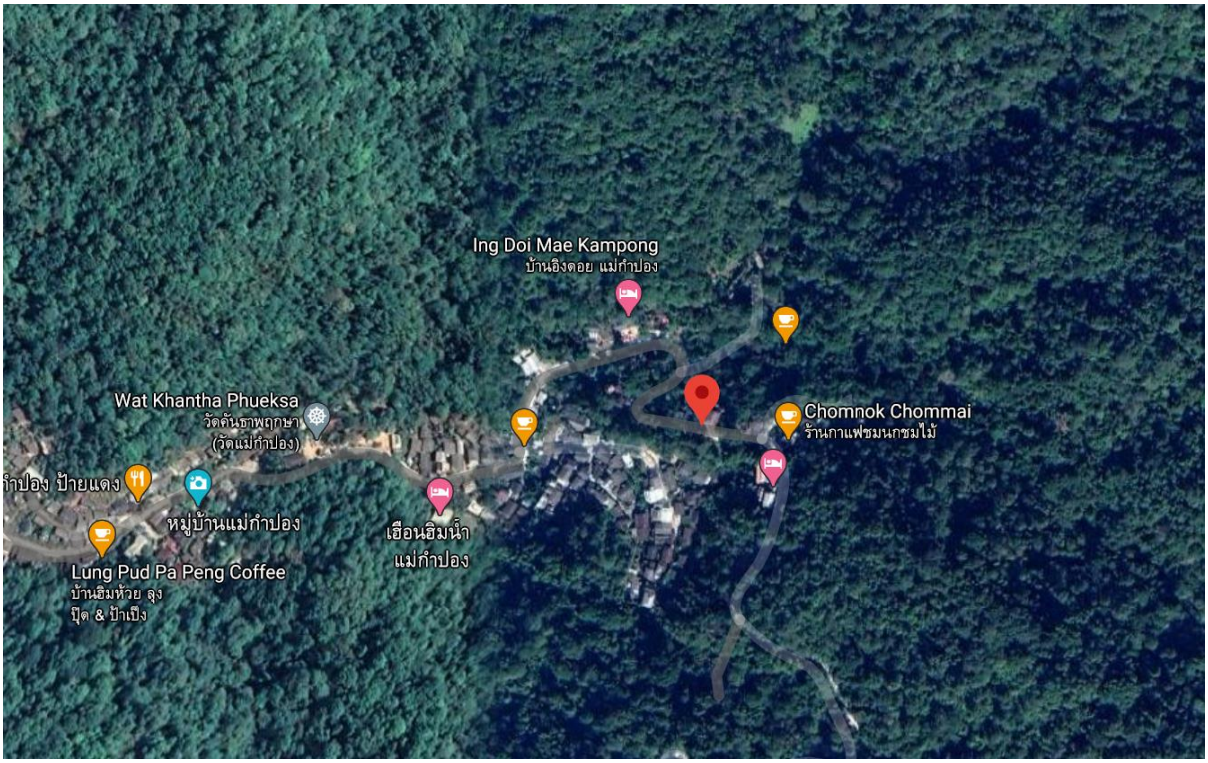
ประธานกลุ่มฯ: นายธีรเมศธ์ ขจรพัฒนภิรมย์

โทรศัพท์: 062-192-9656

พื้นที่ทั้งหมด: 100 ไร่

จำนวนเกษตรกรผู้เข้าร่วม: -

ความสูงจากระดับน้ำทะเล: 1,232 เมตร



ภาพที่ 28 แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขต

พิกัด X 18.885592, พิกัด Y 99.360113

ภาพที่ 29 แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบัน ที่ระดับความสูงประมาณ 1,300 เมตร

ภาพที่ 30 แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบัน ที่ระดับความสูงประมาณ 1,500 เมตร

2. ข้อมูลการปลูกกาแฟ

1) สภาพแวดล้อมและพื้นที่

2) พื้นที่ปลูกกาแฟ: 100 ไร่

3) ชนิดกาแฟที่ปลูก: อะราบิกา สายพันธุ์คาติมอร์ทั้งหมด

4) ผลผลิต: 3 ตันต่อปี (รูปแบบกาแฟกะลา)

5) ผลผลิตต่อต้น: -

6) ลักษณะการปลูก: ปลูกใต้ต้นไม้ใหญ่ ที่ให้ร่มเงา

7) สภาพภูมิอากาศ: ตั้งอยู่บนพื้นที่สูง อากาศหนาวเย็น

8) ฤดูการปลูก: ต้นฤดูฝน

9) วิธีการดูแล: ดูแลตามธรรมชาติ ไม่ใช้ปุ๋ยเคมี

10) ปัญหาที่พบ: ไม่ค่อยพบปัญหาเรื่องแมลง

11) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต:แสง อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน

12) มาตรฐานในการปลูก:

13) การเก็บเกี่ยว: มีการเก็บเกี่ยวปีละ 1 ครั้ง โดยเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนตุลาคม จนถึงเดือนกุมภาพันธ์

14) การจัดการแปลงปลูกหลังการเก็บเกี่ยว: หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว จะทำการตัดแต่งกิ่งกาแฟ ตัดหญ้าและใส่ปุ๋ยอินทรีย์

3. ข้อมูลผู้ผลิตเมล็ดกาแฟ (กลางน้ำ)

3.1 กระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟ

1) กระบวนการแปรรูป: การบวนการแบบเปียก (Wet Process)

2) กระบวนการคัดแยกผลกาแฟ: มีกระบวนการคัดแยกผลกาแฟที่ไม่สุกและไม่สมบูรณ์

3) สถานที่ตากผลกาแฟ (แสงแดด อากาศถ่ายเท ถูกสุขลักษณะ):

4) การป้องกันฝนและน้ำค้าง:

5) ระยะเวลาตาก: 5-7 วัน

6) ความชื้นในเมล็ดกาแฟหลังตาก (มกษ.5700, 5701): ความชื้นในเมล็ดกาแฟ 13%

7) เครื่องสีผลกาแฟแห้ง

3.2 การคั่วกาแฟ

การคั่วกาแฟจะคั่วที่อุณหภูมิ 230-235 องศาเซลเซียส โดยมีการคั่วทั้งหมด 3 ระดับ คือ คั่วอ่อน คั่วกลาง และคั่วเข้ม

ภาพที่ 31 แสดงเครื่องคั่วกาแฟ

ภาพที่ 32 แสดงห้องบรรจุกาแฟ

ภาพที่ 33 แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด (ตรากำปอง คอฟฟี่)

4. กิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟ

ภาพที่ 34 แสดงกิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟกลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่

2.2.5 กลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกา แม่กำปอง อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อกลุ่ม/ไร่: กลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกาแม่กำปอง

ที่ตั้งเลขที่: 52 หมู่ที่ 3 ตำบลห้วยแก้ว อำเภอแม่ออน จังหวัดเชียงใหม่ 50130

ลักษณะการประกอบกิจการ: กลุ่มวิสาหกิจชุมชน

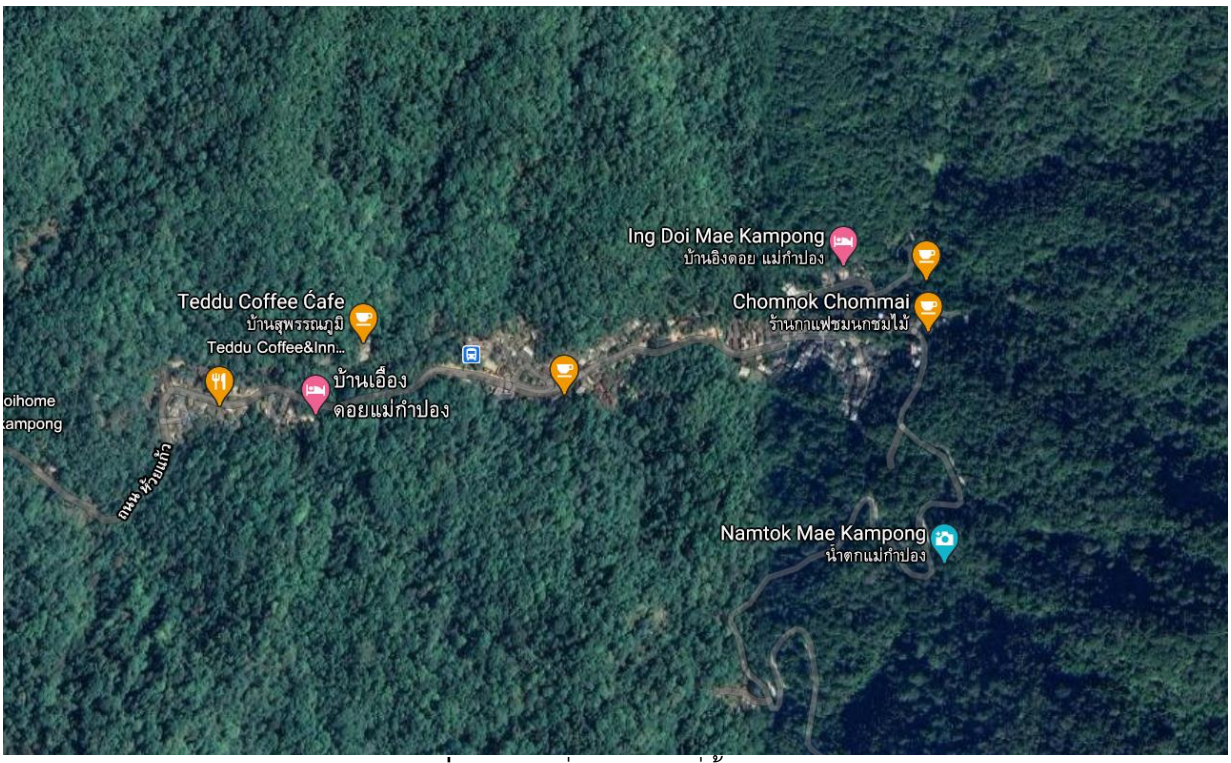
ประธานกลุ่มฯ: นายประดิษ ถมมา

โทรศัพท์: 088-410-8605

พื้นที่ทั้งหมด: 150 ไร่

จำนวนเกษตรกรผู้เข้าร่วม: -

ความสูงจากระดับน้ำทะเล: 1,140 เมตร



ภาพที่ 35 แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขต

พิกัด X 18.866525, พิกัด Y 99.356217

ภาพที่ 36 แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันกลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกา แม่กำปอง อ.แม่ออน จ.เชียงใหม่

2. ข้อมูลการปลูกกาแฟ

1) สภาพแวดล้อมและพื้นที่

2) พื้นที่ปลูกกาแฟ: 150 ไร่

3) ชนิดกาแฟที่ปลูก: อะราบิกา สายพันธุ์คาติมอร์

4) ผลผลิต: 1 ตันต่อปี (รูปแบบกาแฟกะลา)

5) ผลผลิตต่อต้น: -

6) ลักษณะการปลูก: ปลูกใต้ต้นไม้ใหญ่ ให้ร่มเงา

7) สภาพภูมิอากาศ: อากาศหนาวเย็น

8) ฤดูการปลูก: ต้นฤดูฝน

9) วิธีการดูแล: ดูแลตามธรรมชาติ

10) ปัญหาที่พบ: พบปัญหาการระบาดของมอดเจาะผลกาแฟ และเพลี้ยหอย

11) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต:แสง อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน

12) มาตรฐานในการปลูก:

13) การเก็บเกี่ยว: มีการเก็บเกี่ยวปีละ 1 ครั้ง โดยเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนตุลาคม จนถึงเดือนกุมภาพันธ์

14) การจัดการแปลงปลูกหลังการเก็บเกี่ยว: หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว จะทำการตัดแต่งกิ่งกาแฟ ตัดหญ้าและใส่ปุ๋ยอินทรีย์

3. ข้อมูลผู้ผลิตเมล็ดกาแฟ

3.1 กระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟ

1) กระบวนการแปรรูป: การบวนการแบบเปียก (Wet Process)
2) กระบวนการคัดแยกผลกาแฟ: มีกระบวนการคัดแยกผลกาแฟที่ไม่สุกและไม่สมบูรณ์
3) สถานที่ตากผลกาแฟ: ลานตากจะอยู่ในโดมที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์และสามารถเก็บความร้อนได้ดี ถูกสุขลักษณะ และปิดมิดชิด
4) การป้องกันฝนและน้ำค้าง: ป้องกันฝนและน้ำค้างได้ดี

ภาพที่ 37 แสดงลานตากกาแฟ

5) ระยะเวลาตาก: 4-5 วัน (ตากในโดม) และ 7 วัน (ตากแบบปกติ)
6) ความชื้นในเมล็ดกาแฟหลังตาก (มกษ.5700, 5701): ไม่ได้วัดความชื้น

3.2 การคั่วกาแฟ

การคั่วกาแฟจะคั่วที่อุณหภูมิ 180-190 องศาเซลเซียส โดยมีการคั่วทั้งหมด 2 ระดับ คือ คั่วกลางที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส และคั่วเข้มที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส

กระบวนการคั่วจะเริ่มจากตั้งค่าอุณหภูมิที่เครื่อง 200 องศาเซลเซียส ใส่เมล็ดกาแฟลงไป 15 กิโลกรัม ขณะใส่กาแฟลงไป อุณหภูมิจะลดลงเหลือ 140 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มเป็น 180-190 องศาเซลเซียส ภายในระยาเวลา 30 นาที ก่อนนำเมล็ดกาแฟมาคั่ว จะเก็บกาแฟกะลาไว้เป็นเวลา 6 เดือน

ภาพที่ 38 แสดงเครื่องคั่วกาแฟ

ภาพที่ 39 แสดงห้องบรรจุกาแฟ

ภาพที่ 40 แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด (ตราดอยแม่กำปอง คอฟฟี่)

4. กิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟ

ภาพที่ 41 แสดงกิจกรรมสำรวจไร่กาแฟ

2.2.6 โครงการหลวงแม่หลอด อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อกลุ่ม/ไร่: สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด

ที่ตั้งเลขที่: บ้านแม่หลอด หมู่ 10 ตำบลสบเปิง อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ 50150

ลักษณะการประกอบกิจการ: โครงการหลวง

หัวหน้าสถานีวิจัยฯ: นายอนุชา ศรีมา

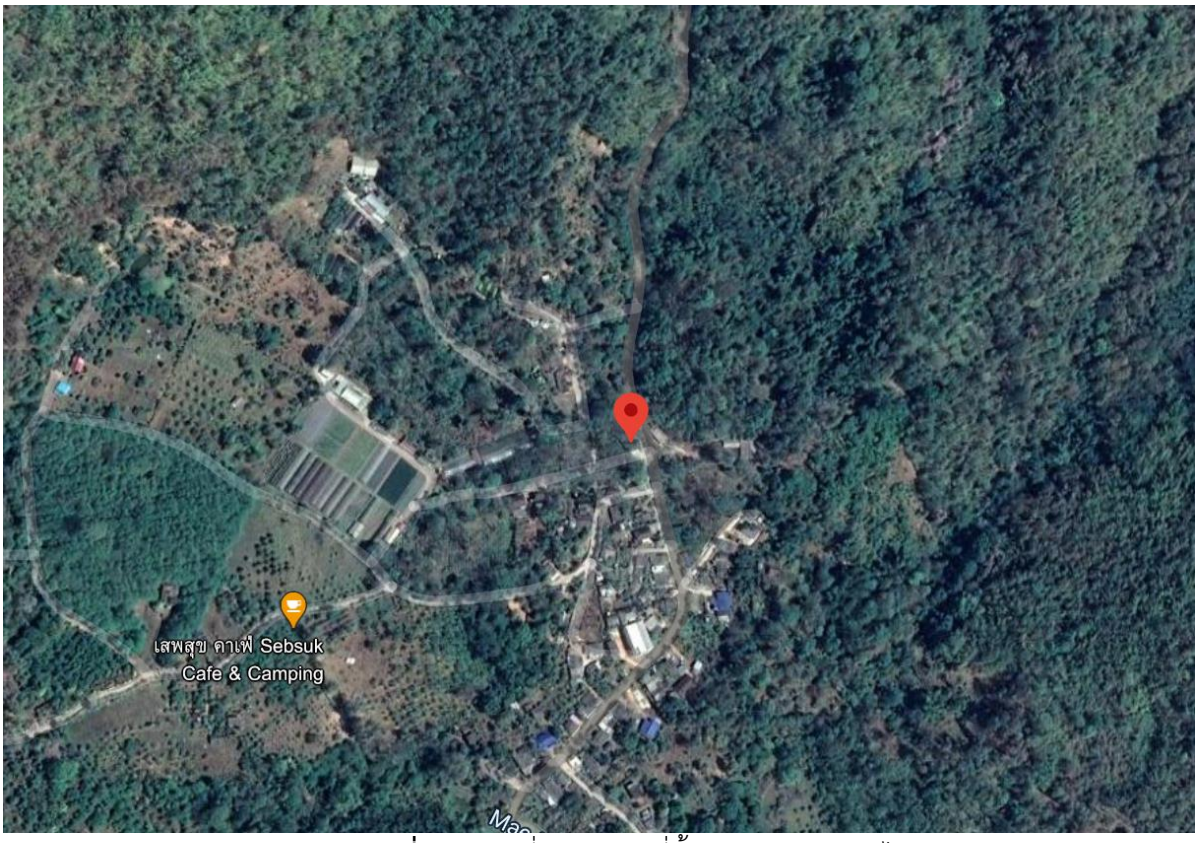
ผู้ช่วยหัวหน้าสถานีฯ: นายอำนาจ หอมไรย์

โทรศัพท์: 081-166-2595

พื้นที่ทั้งหมด: 50 ไร่ แบ่งออกเป็นไร่กาแฟ 30 ไร่

จำนวนเกษตรกรผู้เข้าร่วม: 8 ราย

ความสูงจากระดับน้ำทะเล: 692 เมตร



ภาพที่ 42 แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขตของไร่

พิกัด X 19.101526, พิกัด Y 98.773285

ภาพที่ 43 แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันโครงการหลวงแม่หลอด อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่

สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอดดำเนินงานทดสอบและวิจัยด้านกาแฟอะราบิกาตั้งแต่ปี พ.ศ.2517 โดยได้รับพันธุ์กาแฟลูกผสมชั่วที่ 2(F2) จากศูนย์วิจัยโรคราสนิมของประเทศโปรตุเกส จำนวน 26 คู่ผสม ซึ่งกระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกาได้นำถวายพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว รัชกาลที่ 9 และนำลงปลูกที่สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด (ชื่อเดิมศูนย์วิจัยและส่งเสริมกาแฟบ้านแม่หลอด) มีแปลงลูกผสมชั่วที่ 3, 4, 5 และชั่วที่ 6 สถานีได้นำไม้โตเร็วมาปลูกให้เป็นร่มเงามากถึง 7 ชนิด จนกลายเป็นสวนกาแฟภายใต้ร่มเงาที่สมบูรณ์ ร่มเงาที่ดีนั้นทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยในแปลงกาแฟ จะต้องสูงไม่เกิน 25 องศาเซลเซียส ทั้งนี้มีผลให้กาแฟสุกช้าลง ส่งผลให้กาแฟมีคุณภาพดีขึ้นเมื่อปลูกที่ความสูงเพียง 680 เมตรจากระดับน้ำทะเล

โครงการหลวงแม่หลอดจะรับซื้อเมล็ดกาแฟแบบกะลาจากเกษตรกรที่ขึ้นทะเบียนกับโครงการหลวงฯ หลังจากนั้นจะส่งเมล็ดกาแฟไปยังโรงคั่วกาแฟแม่เหียะ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นโรงคั่วกาแฟของโครงการหลวง และบางส่วนจะขายให้กับคาเฟ่อเมซอน

2. ข้อมูลการปลูกกาแฟ

1) สภาพแวดล้อมและพื้นที่

สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด ตั้งอยู่บนพื้นที่เป็นบริเวณเชิงเขาและที่ราบระหว่างหุบเขา เป็นดินประเภท Reddish Brown Laterite เนื้อดินร่วนซุย เป็นดินร่วนปนทราย มีค่า pH 5.5 – 6.5

สภาพภูมิอากาศ ตลอดปี พ.ศ.2554 ปริมาณน้ำฝน 2,166.4 มิลลิเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปี 22.4 องศาเซลเซียส

ประชากรที่อยู่อาศัย มีพื้นที่รับผิดชอบ 8.36 ตารางกิโลเมตร หรือ 5,226 ไร่ ครอบคลุม บ้าน 4 หย่อมบ้าน ได้แก่ บ้านแม่หลอดเหนือ บ้านแม่หลอดใต้ บ้านแม่เจี้ยว และบ้านผาแตก จำนวน 148 ครัวเรือน ปัจจุบันมีประชากรทั้งสิ้น 578 คน ซึ่งประกอบด้วย คนเมือง และชนเผ่ากะเหรี่ยง

2) พื้นที่ปลูกกาแฟ: 30 ไร่

3) ชนิดกาแฟที่ปลูก: อะราบิกา 20 สายพันธุ์

4) ผลผลิต: 5.5 ตันต่อปี (รูปแบบกาแฟกะลา)

5) ผลผลิต: 5 กิโลกรัมต่อต้น

6) ลักษณะการปลูก: ปลูกใต้ต้นไม้ใหญ่ ให้ร่มเงา

7) สภาพภูมิอากาศ: ตั้งอยู่บนพื้นที่เป็นบริเวณเชิงเขาและที่ราบระหว่างหุบเขา

8) ฤดูการปลูก:

9) วิธีการดูแล: น้ำฝนตามธรรมชาติ

10) ปัญหาที่พบ: พบปัญหาการระบาดของมอดเจาะผลกาแฟ

11) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต:แสง อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน

12) มาตรฐานในการปลูก: สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอดได้กำหนดมาตรฐาน GAP (Good Agricultural Practices) ในการปลูกกาแฟ สำหรับเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟที่ได้ขึ้นทะเบียนกับโครงการหลวงฯ โดยครอบคลุมเนื้อหาดังนี้ ดิน น้ำ อายุการเก็บเกี่ยว สารเคมีที่ใช้ คุณภาพของผลผลิต การเก็บรักษาเมล็ดกาแฟ คุณภาพเกษตรกรและการบันทึกข้อมูล

13) การเก็บเกี่ยว: มีการเก็บเกี่ยวปีละ 1 ครั้ง โดยเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนตุลาคม จนถึงเดือนกุมภาพันธ์

14) การจัดการแปลงปลูกหลังการเก็บเกี่ยว: หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว จะรูดเมล็ดสีดำที่แห้งออกซึ่งเป็นแหล่งเพาะไข่มอด หลังจากนั้นทำการตัดแต่งกิ่งกาแฟ ตัดหญ้า และใส่ปุ๋ย

3. ข้อมูลผู้ผลิตเมล็ดกาแฟ

3.1 กระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟ

1) กระบวนการแปรรูป: การบวนการแบบเปียก (Wet Process)
2) กระบวนการคัดแยกผลกาแฟ: มีกระบวนการคัดแยกผลกาแฟที่ไม่สุกและไม่สมบูรณ์ อีกทั้งยังแยกเมล็ดกาแฟตามสายพันธุ์ เพื่อนำไปใช้ในการวิจัยและพัฒนาต่อไป
3) สถานที่ตากผลกาแฟ (แสงแดด อากาศถ่ายเท ถูกสุขลักษณะ):
4) การป้องกันฝนและน้ำค้าง:

5) ระยะเวลาตาก (วัน):
6) เครื่องสีผลกาแฟแห้ง (รูปถ่าย)
7) ความชื้นในเมล็ดกาแฟหลังตาก (มกษ.5700, 5701): ความชื้นในเมล็ดกาแฟ 13%

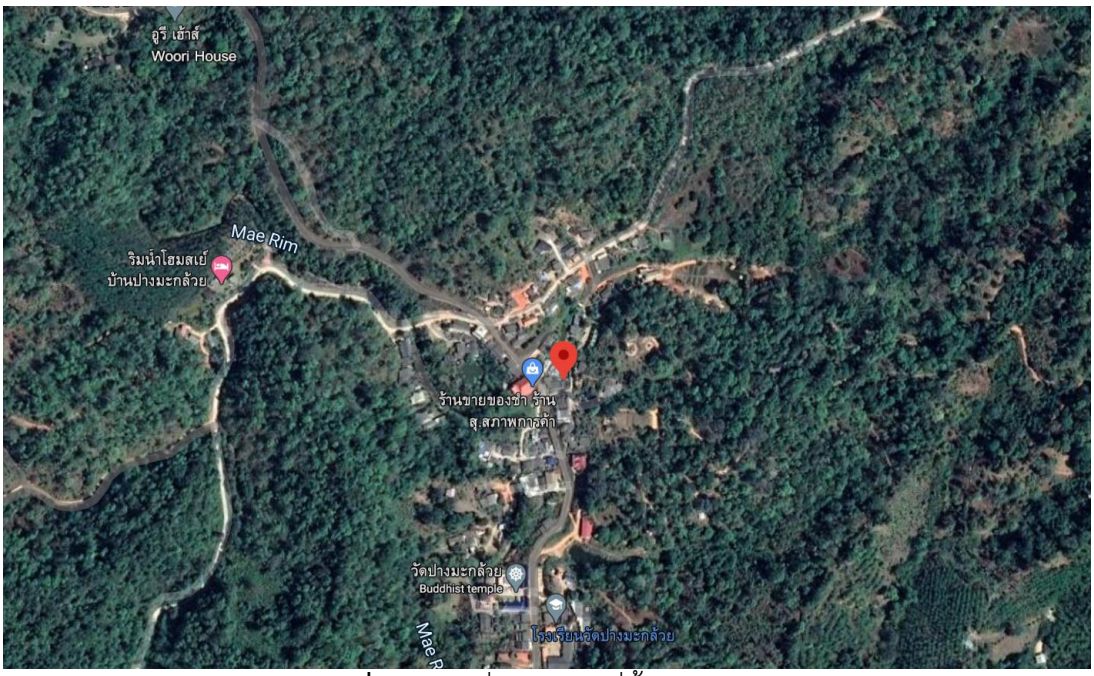
4. กิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟ

ภาพที่ 44 แสดงกิจกรรมสำรวจไร่กาแฟโครงการหลวงแม่หลอด อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่

2.2.7 กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่

1. ข้อมูลทั่วไป

ชื่อกลุ่ม/ไร่:	กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์
รหัสทะเบียน:	6-50-06-09/1-0023
ที่ตั้งเลขที่:	105/2 หมู่ที่ 2 ตำบลป่าแป๋ อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ 50150
ลักษณะการประกอบกิจการ:	กลุ่มวิสาหกิจชุมชน
ประธานกลุ่มฯ:	นายวิชาญ บัวสา
โทรศัพท์:	093-140-6998
พื้นที่ทั้งหมด:	50 ไร่ (เฉพาะไร่ของคุณวิชาญ)
จำนวนเกษตรกรผู้เข้าร่วม:	10 ราย
ความสูงจากระดับน้ำทะเล:	890 เมตร



ภาพที่ 45 แผนที่แสดงพิกัดที่ตั้งและขอบเขต

พิกัด X 19.114856, พิกัด Y 98.710489

ภาพที่ 46 แสดงสภาพพื้นที่ปัจจุบันกาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่

2. ข้อมูลการปลูกกาแฟ

1) สภาพแวดล้อมและพื้นที่

2) พื้นที่ปลูกกาแฟ: 50 ไร่ (เฉพาะไร่ของคุณวิชาญ)

3) ชนิดกาแฟที่ปลูก: อะราบิกา สายพันธุ์คาติมอร์

4) ผลผลิต: 4-5 ตันต่อปี (รูปแบบกาแฟกะลา) และผลผลิตทั้งตำบลป่าแป๋ 30 ตันต่อปี

5) ผลผลิตต่อต้น: -

6) ลักษณะการปลูก: ปลูกใต้ต้นไม้ใหญ่ ที่ให้ร่มเงา

7) สภาพภูมิอากาศ: อากาศหนาวเย็น

8) ฤดูการปลูก: ต้นฤดูฝน

9) วิธีการดูแล: ดูแลตามธรรมชาติ

10) ปัญหาที่พบ: พบปัญหาการระบาดของมอดเจาะผลกาแฟ

11) ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิต:แสง อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน

12) มาตรฐานในการปลูก:

13) การเก็บเกี่ยว: มีการเก็บเกี่ยวปีละ 1 ครั้ง โดยเริ่มเก็บเกี่ยวตั้งแต่เดือนตุลาคม จนถึงเดือนกุมภาพันธ์

14) การจัดการแปลงปลูกหลังการเก็บเกี่ยว: หลังจากเก็บเกี่ยวผลผลิตแล้ว จะทำการตัดแต่งกิ่งกาแฟ ตัดหญ้า และใส่ปุ๋ยอินทรีย์

ภาพที่ 47 แสดงลักษณะลำต้นและผลกาแฟ

3. ข้อมูลผู้ผลิตเมล็ดกาแฟ

3.1 กระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟ

1) กระบวนการแปรรูป: กระบวนการแบบเปียก (Wet Process), กระบวนการแบบแห้ง (Dry Process), Honey Process
2) กระบวนการคัดแยกผลกาแฟ: มีกระบวนการคัดแยกผลกาแฟที่ไม่สุกและไม่สมบูรณ์
3) สถานที่ตากผลกาแฟ: ลานตากจะอยู่ในโดมพลาสติก
4) การป้องกันฝนและน้ำค้าง: ป้องกันฝนและน้ำค้างได้
5) ระยะเวลาตาก: 5-7 วัน (ตากในโดม)
6) ความชื้นในเมล็ดกาแฟหลังตาก (มกษ.5700, 5701):

7) เครื่องสีผลกาแฟแห้ง: มีเครื่องสีเมล็ดเชอรี่ 1 เครื่อง

ภาพที่ 48 แสดงสถานที่ตากกาแฟ

3.2 การคั่วกาแฟ

การคั่วกาแฟจะเริ่มคั่วที่อุณหภูมิ 180-200 องศาเซลเซียส และไปจบที่ 250 องศาเซลเซียส โดยมีการคั่วทั้งหมด 3 ระดับ คือ คั่วอ่อน คั่วกลาง และคั่วเข้ม

ภาพที่ 49 แสดงผลิตภัณฑ์กาแฟคั่วบด (ตราเนอมู คอฟฟี่)

4. กิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟ

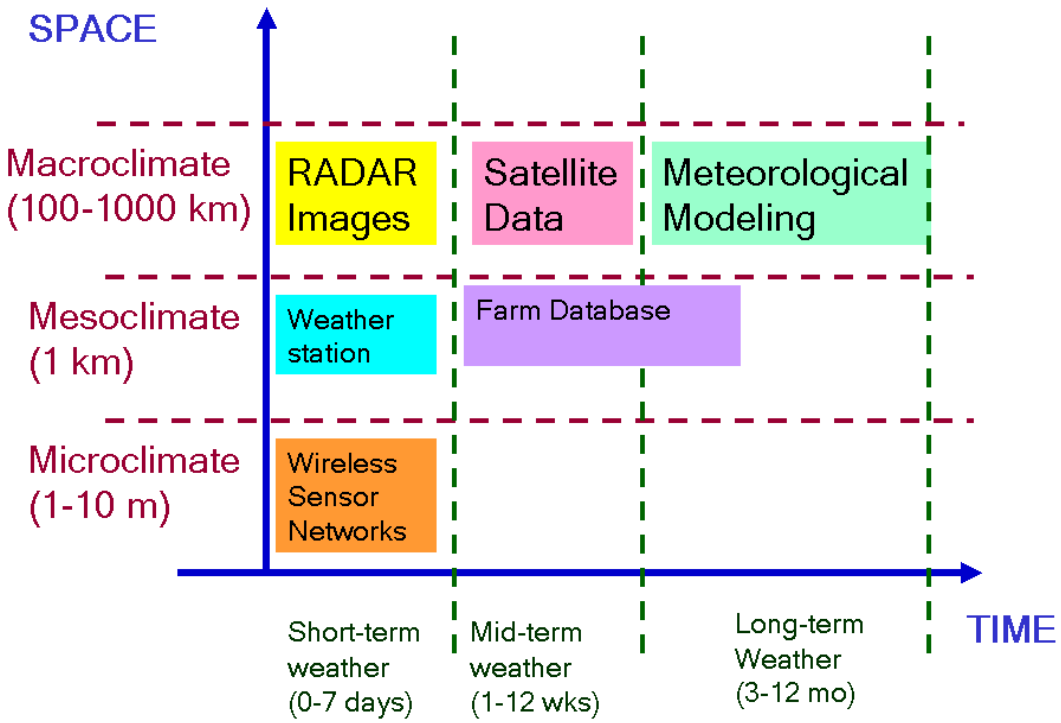
ภาพที่ 50 แสดงกิจกรรมการสำรวจไร่กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ อ.แม่แตง จ.เชียงใหม่

2.3 รูปแบบฐานข้อมูลสภาพแวดล้อมในไร่กาแฟ

2.3.1 ข้อมูลสภาพแวดล้อมทางการเกษตร (microclimate, meso-climate, macroclimate)

สภาพภูมิอากาศโลกที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้การทำเกษตรในปัจจุบันเป็นสิ่งที่ทำได้ยากขึ้นเรื่อยๆ พืชหลายชนิดโดยเฉพาะผลไม้ค่อนข้างจะไวต่อสภาพแวดล้อมนี้ ดังนั้นเมื่อสภาพอากาศปรวนแปร เช่น วงจรของการเปลี่ยนฤดูกาลผิดแผกไปจากเดิม ก็จะมีผลให้ผลผลิตลดลงทั้งปริมาณและคุณภาพ การดูแลรักษาเพื่อให้ประสิทธิภาพการผลิตของพืชเหล่านี้คงที่หรือดีขึ้น จะต้องอาศัยการทำเกษตรแบบใหม่ ที่มีภูมิต้านทานต่อสภาพภูมิอากาศ หรือที่เรียกว่า Climate-Smart Agriculture

Climate-Smart Agriculture เป็นการทำเกษตรแบบใหม่ที่มีภูมิต้านทานต่อภาวะโลกร้อน ด้วยการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงอันจะนำไปสู่การเพิ่มผลผลิตอย่างยั่งยืน และลดการปลดปล่อยคาร์บอนพร้อม ๆ กันไป ทั้งนี้เกษตรกรจะต้องอาศัยการใช้ข้อมูลในด้านต่าง ๆ เพื่อที่จะคาดการณ์สภาพอากาศที่กำลังจะเกิดขึ้นกับพื้นที่เพาะปลูกของตนเอง อันจะนำไปสู่การดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ที่เหมาะสมได้ตามสถานการณ์จริง ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ข้อมูลต่าง ๆ เหล่านั้นหลาย ๆ อย่างก็มีอยู่แล้ว เพียงแต่ไม่ได้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมที่เกษตรกรจะสามารถใช้ได้ ในขณะที่ข้อมูลบางอย่างจะมีได้ด้วยการมีเทคโนโลยีเก็บข้อมูลในไร่นา เช่น ไอโอทีเซนเซอร์



ภาพที่ 51 แสดงแผนผังแสดงการบูรณาการข้อมูลต่างๆ เพื่อให้เกษตรกรนำมาใช้ทำการเกษตรแบบที่มีภูมิต้านทานต่อสภาพภูมิอากาศ (Climate-Smart Agriculture)

จะเห็นได้ว่าในการทำ Climate-Smart Agriculture เกษตรกรจะต้องสามารถประมวล และใช้ประโยชน์ข้อมูลภูมิอากาศทั้งมิติของพื้นที่ และมิติของเวลา โดยในด้านมิติของพื้นที่นั้น เราสามารถแบ่งข้อมูลสภาพแวดล้อมทางการเกษตร ออกเป็น 3 ชนิดได้แก่

(1) *Macroclimate* เป็นข้อมูลของภูมิอากาศที่กำลังเกิดขึ้นหรือจะเกิดขึ้นในระยะ 100-1000 กิโลเมตรจากพื้นที่ของเกษตรกร ข้อมูลเหล่านี้ ได้แก่ ภาพเรดาร์ตรวจอากาศ ภาพถ่ายดาวเทียม ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา รวมไปถึงข้อมูลการพยากรณ์สภาพอากาศจากโมเดลต่างๆ

(2) *Mesoclimate* เป็นข้อมูลของสภาพภูมิอากาศท้องถิ่นในไร่ของตนเอง ซึ่งเป็นข้อมูลที่เป็นตัวแทนของพื้นที่ตั้งนั้น ๆ ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำมาจากสถานีตรวจวัดอากาศในไร่/สวน ที่ติดตั้งขึ้น หรือ จากพื้นที่ไร่/สวนข้างเคียง ซึ่งเมื่อมีการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี จะทำให้เกษตรกรสามารถเรียนรู้รูปแบบที่เกิดขึ้นได้จาก Farm Database

(3) *Microclimate* เป็นข้อมูลสภาพอากาศย่อยในไร่/สวน ซึ่งมีความแตกต่างกัน ทำให้ผลผลิตแม้จะอยู่ในไร่เดียวกันนั้นแตกต่างกันได้อย่างชัดเจน ดังนั้นการปฏิบัติต่อพื้นที่ย่อยเหล่านั้นตามความเหมาะสมที่แท้จริงย่อมจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงขึ้น เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า การเกษตรแบบนี้เรียกว่า การเกษตรแบบแม่นยำสูง (Precision Farming) ซึ่งเกษตรกรจะมีความสามารถอย่างนี้ได้ ต้องอาศัยข้อมูลจากการติดตั้งเครือข่ายเซนเซอร์ในไร่/สวนของตน ตามพื้นที่ย่อย ๆ ที่แตกต่างกันนั้น

ในด้านมิติของเวลานั้น เราสามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

(1) *Short-term Weather* เป็นข้อมูลในช่วงแต่ละชั่วโมงไปจนถึงไม่เกินหนึ่งสัปดาห์ ซึ่งเกษตรกรจะต้องมีการปฏิบัติต่อสิ่งที่เกิดขึ้นอย่างทันด่วน เช่น เหตุการณ์ฝนตก

(2) *Mid-term Weather* เป็นข้อมูลสภาพอากาศที่อาจจะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 1-12 สัปดาห์ ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่จะทำให้เกษตรกรวางแผนการผลิต เช่น การกำหนดการเก็บเกี่ยว เป็นต้น

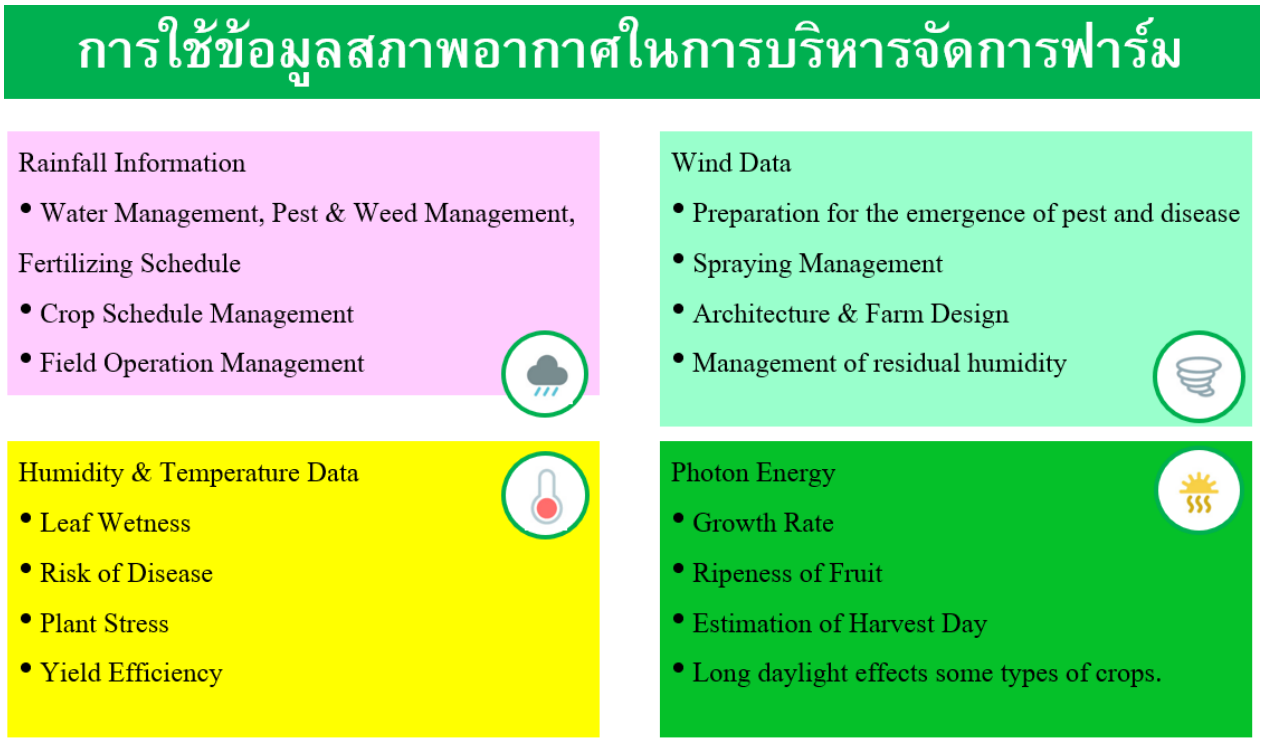
(3) *Long-term หรือ Seasonal Weather* เป็นข้อมูลสำหรับรอบปี ซึ่งทำให้พอทราบข้อมูลรอบปีว่าอะไรมีโอกาสจะเกิดขึ้น สำหรับการวางแผนล่วงหน้า เช่น จะเป็นรอบปีที่ฝนชุก หรือฝนแล้ง สภาพอากาศจะร้อน หรือหนาวกว่าปีก่อน ๆ ซึ่งก็จะมีผลต่อราคาผลไม้ หรือ สภาพผลผลิตที่อาจจะพอคาดหมายล่วงหน้าได้

2.3.2 ตัวอย่างผลการศึกษาสภาพแวดล้อมทางการเกษตร และการนำไปใช้ประโยชน์

ข้อมูลสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก สามารถนำไปช่วยเหลือเกษตรกรในการทำไร่ทำนาที่เท่าทันต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ทำให้เกษตรกรมีข้อมูลและเหตุผลที่เหมาะสมในการประกอบกิจกรรมใดๆ ก็ตามที่เกี่ยวข้อง โดยข้อมูลจากเซนเซอร์ชนิดต่างๆ จะช่วยเหลือให้การดำเนินกิจกรรมทางการเกษตรมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังตัวอย่างต่อไปนี้

- เกษตรกรสามารถวางแผนการเพาะปลูกและทำการเกษตรได้ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากมีข้อมูลสภาพปัจจัยการเพาะปลูกในไร่ทั้งแบบเรียล-ไทม์ และแบบย้อนหลัง

- การใช้ประโยชน์จากข้อมูลสภาพปัจจัยการเพาะปลูกสามารถช่วยเกษตรกรในการลดต้นทุนทั้งในด้านแรงงาน น้ำ ปุ๋ย สารเคมีและยาฆ่าแมลง
- ช่วยเกษตรกรในการประหยัดเวลาและสามารถบริหารจัดการฟาร์มได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะสามารถเข้าใจลักษณะสภาพภูมิอากาศในไร่ของตนได้อย่างถูกต้อง
- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูแลพืชและลดความเสี่ยงหรือความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์
- เกษตรกรสามารถนำข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อสร้างโมเดลหรือสูตรในการปลูกพืชแต่ละชนิดได้ นอกจากนี้ยังใช้ในการสร้างโมเดลการเกิดโรค และแมลงในพืชได้อีกด้วย
- เกษตรกรสามารถใช้โดรนในการทำแผนที่ไร่ ทำให้มองเห็นลักษณะทางกายภาพของไร่ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถใช้โดรนในการทำแผนที่ความอุดมสมบูรณ์ของพืช เพื่อใช้ในการบริหารจัดการดูแลพืชให้ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นได้



ภาพที่ 52 แสดงตัวอย่างแง่มุมของการนำข้อมูลตรวจวัดจากสถานีเซนเซอร์ไอโอทีไปใช้ประโยชน์

เกษตรกรสามารถใช้ข้อมูลสภาพแวดล้อมในไร่นาเพื่อการบริหารจัดการการเพาะปลูกได้ 2 รูปแบบ คือ

(1) การใช้ข้อมูลเพื่อกิจกรรมประจำวัน (Real-time Data for Daily Activities)

เป็นการนำข้อมูลสภาพแวดล้อมที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ เพื่อนำมาใช้ในการตัดสินใจที่จะทำหรือไม่ทำอะไรในไร่นา โดยสามารถใช้ประโยชน์ได้ทันทีในกิจกรรมประจำวัน ตัวอย่างเช่น

- ข้อมูลฝน การพยากรณ์ว่าฝนจะตกหรือไม่ตกภายในระยะเวลากี่ชั่วโมง หรือกี่วัน สามารถนำมาใช้จัดการการรดน้ำ การใช้สารเคมี ปุ๋ย ยา
- ข้อมูลลม นำมาใช้ตัดสินใจเรื่องการพ่นยา เช่น หากมีลมแรงกว่าที่กำหนด ให้งดกิจกรรมดังกล่าว
- ข้อมูลความชื้นที่ใบ นำมาใช้ในการจัดการพ่นยาฆ่าเชื้อราน้ำค้างที่ใบ ซึ่งมักจะเกิดในช่วงที่อากาศปิด มีฝนตกพรำ ๆ ต่อเนื่องหลายๆ วัน ซึ่งเกษตรกรสามารถใช้ข้อมูลความชื้นอากาศ ประกอบกับข้อมูลความชื้นที่ผิวใบ เพื่อตัดสินใจจัดการพ่นยาเพื่อป้องกันโรคราน้ำค้าง

(2) การใช้ข้อมูลเชิงสถิติเพื่อการบริหารจัดการ เป็นการนำข้อมูลต่างๆ ที่เก็บไว้ นำมาวิเคราะห์ตามหลักวิทยาศาสตร์ข้อมูล (Data Science) ในรูปแบบต่างๆ เพื่อนำมาใช้ปรับปรุงการทำงาน วางแผนการเพาะปลูก หรือใช้ตัดสินใจในการบริหารจัดการฟาร์ม ตัวอย่างเช่น

- ข้อมูลสภาพน้ำฝนที่ตกในเดือนต่างๆ ย้อนหลัง สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบ ช่วงเวลาต่างๆ ที่มีโอกาสเกิดฝนตก เพื่อตัดสินใจในการทำกิจกรรมต่างๆ เช่น การตัดแต่งกิ่ง การจัดกิจกรรมทางการตลาดในฟาร์ม การวางแผนการกักเก็บน้ำ
- ข้อมูลอุณหภูมิความชื้น นำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ผลผลิตได้ เช่น หากมีความชื้นสูงต่อเนื่องนานๆ เป็นสาเหตุให้เกิดโรคพืชได้ ช่วงอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด มีผลต่อสภาพผลผลิตเนื่องจากความเครียดของพืช สามารถนำมาใช้ตัดสินใจในการเลือกฤดูกาลผลิต (Crop Schedule) ได้
- ข้อมูลแสง นำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ความสุกของผลไม้ได้ เช่น ต้นองุ่นจะมีการรับพลังงานแสงปริมาณหนึ่งที่เพียงพอ ก็จะทำให้องุ่นมีปริมาณน้ำตาลตามที่กำหนด และมีความสุกเพียงพอในการเก็บเกี่ยวได้ ซึ่งหากเรารู้ข้อมูลพลังงานแสงที่ต้นองุ่นได้รับ นับแต่วันที่มีการตัดแต่งกิ่ง ก็จะสามารถใช้คาดการณ์วันที่เหมาะสมในการเก็บเกี่ยวได้ล่วงหน้า
- ข้อมูลสภาพแวดล้อมต่างๆ ทั้งหมดสามารถนำมาวิเคราะห์คุณภาพของผลผลิตได้ เช่น กลิ่นและรสชาติความอร่อยของผลไม้นั้นขึ้นอยู่กับสภาพอากาศในแต่ละปี

จะขอยกตัวอย่างการนำเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมในไร่นา ไปติดตั้งในพื้นที่ปลูกถั่วแระของบริษัทลานนาเกษตรอุตสาหกรรม ที่ อ.แม่อาย จ.เชียงใหม่ ซึ่งผลจากการติดตั้งนี้ทำให้เกิดประโยชน์ดังต่อไปนี้

(1) สามารถประหยัดการใช้น้ำได้ 20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากน้ำที่ใช้รดน้ำต้นถั่วแระ มีการสูบขึ้นมาจากแม่น้ำกกที่ห่างออกไป 2 กิโลเมตร โดยใช้เครื่องสูบน้ำ ทำให้ประหยัดค่ากระแสไฟฟ้าไปด้วยอีก 20%

(2) ในช่วงก่อนการติดตั้งเซนเซอร์นั้น ทางไร่มีปัญหาเกี่ยวกับการเพาะปลูกค่อนข้างมาก รวมถึงเรื่องการบริหารจัดการด้วย ภายหลังที่ทางไร่มีการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดและมีการแก้ไขการบริหารจัดการ ก็สามารถเพิ่มผลผลิตได้จาก 1 ตันต่อเอเคอร์ เพิ่มมาเป็น 3 ตันต่อเอเคอร์

(3) มีการนำข้อมูลเพื่อมาใช้บริหารจัดการเรื่องโรคและแมลง ซึ่งในรอบการเพาะปลูกรอบที่ 1 ระหว่างเดือน เมษายน-กรกฎาคม นั้นมีโรคเกิดขึ้นประมาณ 8% ในขณะที่รอบการเพาะปลูกรอบที่ 2 ระหว่างเดือนสิงหาคม-พฤศจิกายน นั้นมีโรคเกิดขึ้นประมาณ 3% ของผลผลิต โดยในรอบการเพาะปลูกที่ 1 ได้ผลผลิต 2.208 ตันต่อเอเคอร์ ในขณะที่รอบการเพาะปลูกที่ 2 ได้ผลผลิตเยอะกว่าคือ 2.861 ตันต่อเอเคอร์ ซึ่งเมื่อมาดูข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงเวลากลางวันในเดือนที่ใกล้เก็บเกี่ยวคือ เดือนกรกฎาคมของรอบที่ 1 และเดือนพฤศจิกายนในรอบที่ 2 พบว่า ค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงเวลากลางวันของเดือนกรกฎาคมมีค่าสูงถึง 52% ในขณะที่เดือนพฤศจิกายนมีค่าเพียง 41% ซึ่งค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงเวลากลางวันที่สูงนี้ จะทำให้เกิดความชื้นสะสมที่ต้นและใบทำให้มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดโรคพืช อีกทั้งเมื่อพิจารณาข้อมูลของ dew point หรือ จุดน้ำค้าง พบว่าในช่วงเดือนที่ใกล้เก็บเกี่ยวของรอบการเพาะปลูกที่ 1 คือระหว่างเดือน มิถุนายน-กรกฎาคม นั้นก็มีค่าสูงกว่า ในช่วงเดือนที่ใกล้เก็บเกี่ยวของรอบการเพาะปลูกที่ 2 คือระหว่างเดือนตุลาคม-พฤศจิกายน ซึ่งการมีอุณหภูมิจุดน้ำค้างที่สูงนี้ช่วยเพิ่มความเสี่ยงที่จะมีหยดน้ำมาเกาะที่ใบของต้นถั่วแระ โดยเฉพาะในช่วงเช้า ซึ่งจะทำให้ใบไหม้ได้เมื่อแสงอาทิตย์ส่องแรงในตอนเช้า ด้วยเหตุต่างๆ ที่กล่าวมานี้ ทำให้ผลผลิตในรอบการเพาะปลูกที่ 2 นั้นมีทั้งปริมาณและคุณภาพที่ดีกว่า รอบการเพาะปลูกที่ 1

(4) นำมาใช้ในการปรับตารางการเพาะปลูกให้เหมาะสม (Crop schedule) ทางบริษัทใช้รอบการเพาะปลูก 2 รอบคือ รอบที่ 1 ระหว่างเดือน เมษายน-กรกฎาคม และรอบการเพาะปลูกรอบที่ 2 ระหว่างเดือนสิงหาคม-พฤศจิกายน ซึ่งจะเห็นได้ว่ารอบการเพาะปลูกที่ 1 นั้นค่อนข้างมีปัญหาเยอะ มีโรคเยอะ ผลผลิตน้อยกว่ารอบที่ 2 ทั้งนี้พอเราไปดูข้อมูล อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด-ต่ำสุด และความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด-ต่ำสุด ในแต่ละเดือน เราจะพบว่า ช่วงที่มีความเหมาะสมที่สุดคือมีค่าสูงสุด-ต่ำสุดแคบกว่า ซึ่งพืชจะมีความเครียดต่ำกว่า อยู่ระหว่างเดือนมิถุนายน – ตุลาคม ทำให้เราแนะนำรอบการเพาะปลูกที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่นี้ใหม่เป็น รอบที่ 1 ระหว่างเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม และรอบที่ 2 ระหว่างเดือนสิงหาคม-พฤศจิกายน

Customer Case: Lanna agro industry Co. Ltd.

- Save water about 20% and electricity cost.
- Increase maximum yield from 1 ton / acre to 3 tons / acre.
- Better management of disease and pest.
- Crop re-scheduling to optimize plant-climate interactions.

ภาพที่ 53 แสดงตัวอย่างการนำเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมในไร่นา ไปติดตั้งในพื้นที่ปลูกถั่วแระ

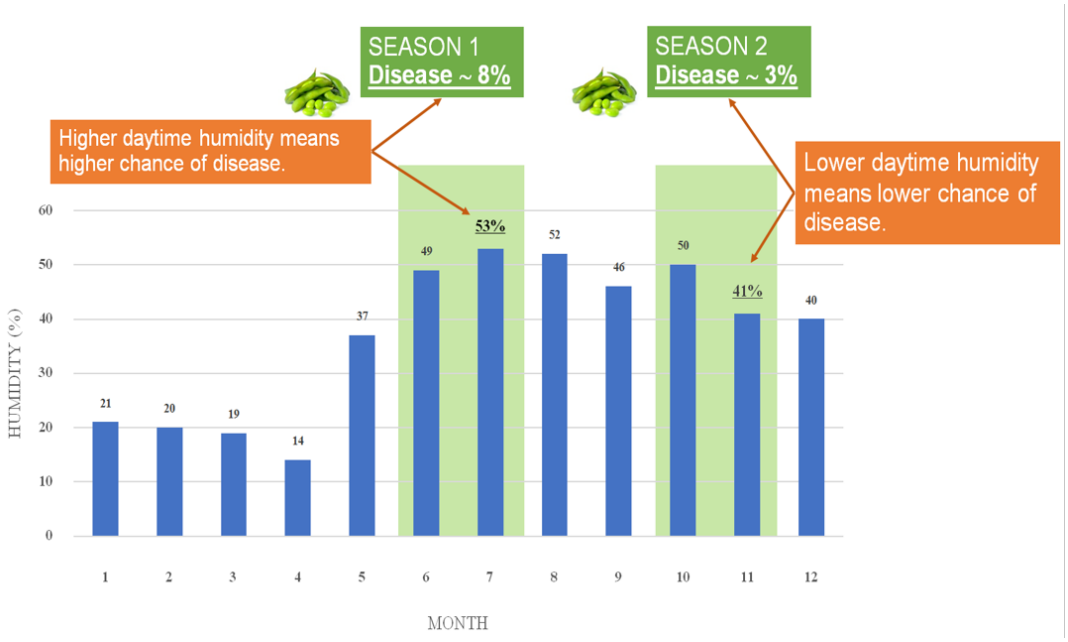
Edamame yield from two growing seasons

Growing season 1	April-June
Total yield	2400 kg/acre
Poor quality (disease)	8%
Actual yield	2208 kg/acre

Growing season 2	August-October
Total yield	2950 kg/acre
Poor quality (disease)	3%
Actual yield	2861.5 kg/acre

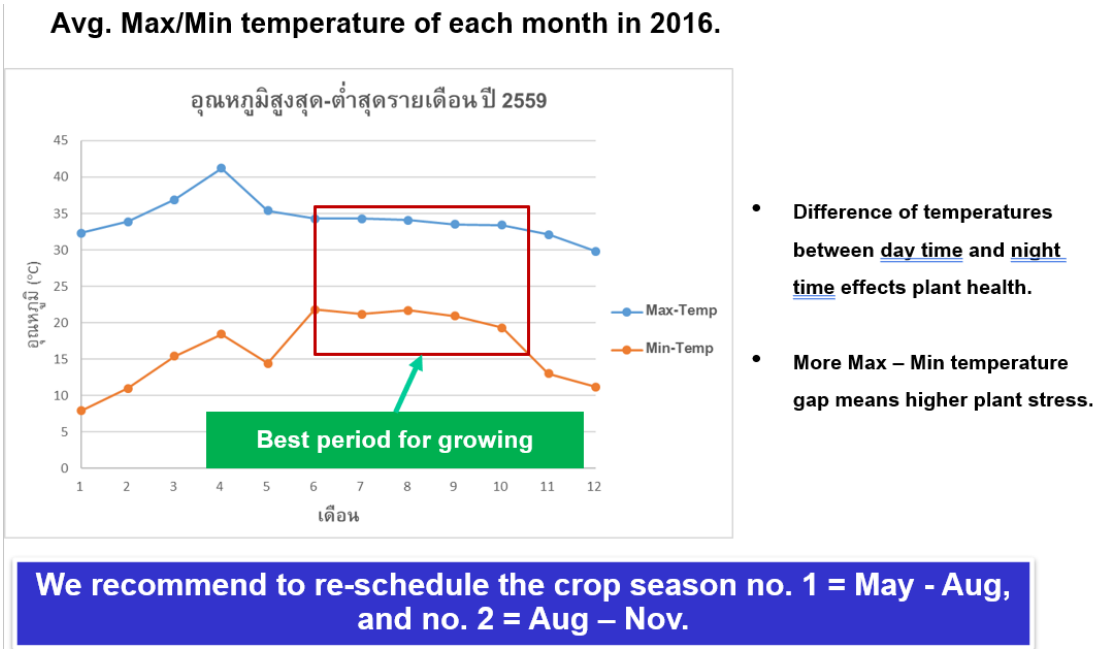
Why higher damage?

ภาพที่ 54 แสดงตารางการเพาะปลูกในรอบปี ซึ่งจะเห็นได้ว่ารอบการเพาะปลูกที่ 1 มีผลผลิตแย่กว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2

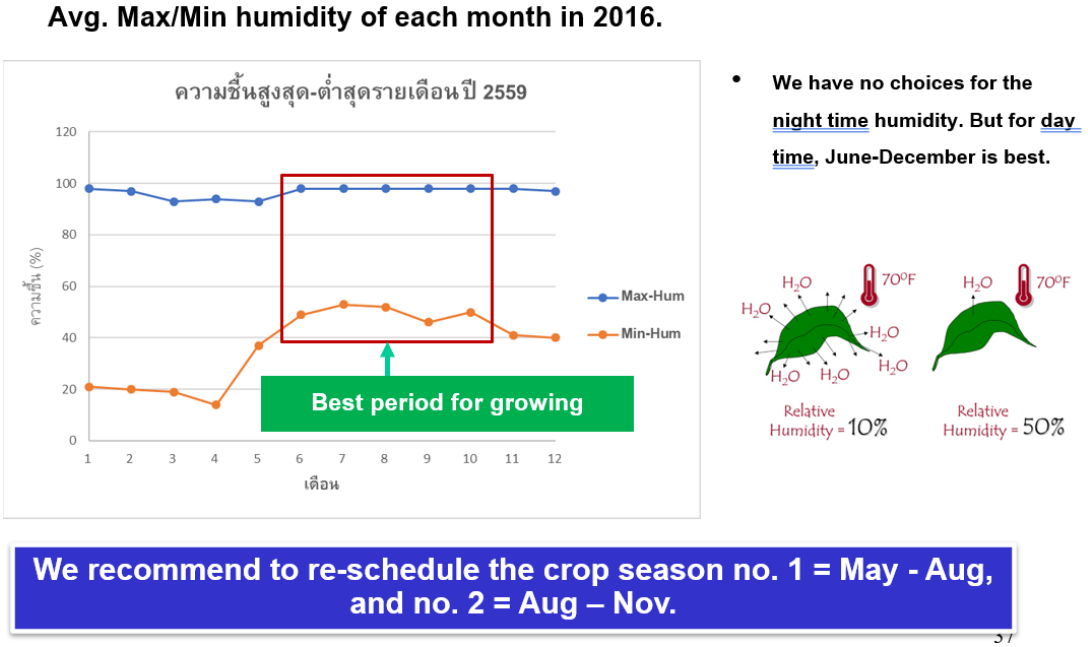


ภาพที่ 55 แสดงค่าเฉลี่ยของความชื้นสัมพัทธ์ในไร่ถั่วแระในเวลากลางวัน ซึ่งรอบการเพาะปลูกที่ 1 มีค่าสูงกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 ทำให้ต้นถั่วแระมีโรคมากกว่า

ภาพที่ 56 แสดงค่าเฉลี่ยของ dew point ในไร่ถั่วแระในเวลาเช้า ซึ่งรอบการเพาะปลูกที่ 1 มีค่าสูงกว่ารอบการเพาะปลูกที่ 2 ทำให้ต้นถั่วแระมีโรคมากกว่า เนื่องจากมีโอกาสเกิดหยดน้ำที่ใบมากกว่า



ภาพที่ 57 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดต่ำสุดในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี จะพบว่ารอบการเพาะปลูกที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่างเดือน พ.ค. - พ.ย.



ภาพที่ 58 แสดงค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดต่ำสุดในแต่ละเดือนตลอดทั้งปี จะพบว่ารอบการเพาะปลูกที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่างเดือน พ.ค. - พ.ย.

บทที่3

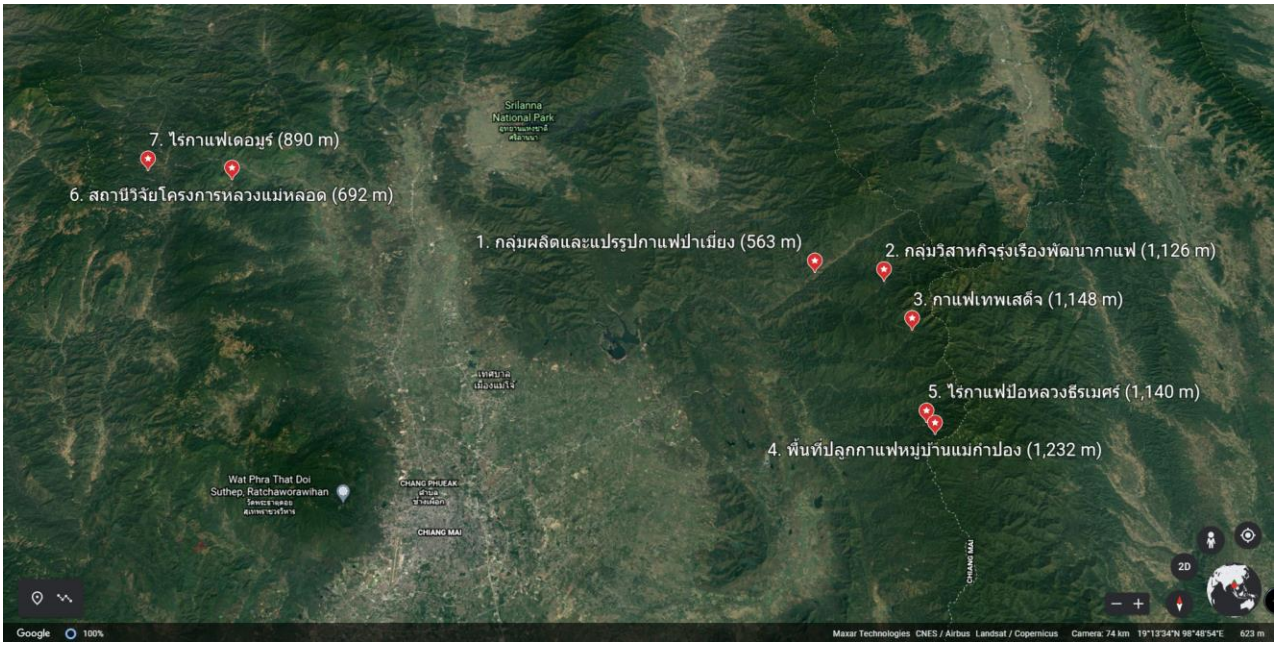
ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับเซนเซอร์และเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์

3.1 ข้อมูลพื้นฐานและหลักการของเซนเซอร์

3.1.1 แผนที่ติดตั้งเซนเซอร์ไอโอทีเพื่อตรวจวัดสภาพแวดล้อมในพื้นที่เพาะปลูกกาแฟ

3.1.1.1 แผนที่ไร่กาแฟสำหรับติดตั้งเซนเซอร์ไอโอทีในโครงการ

จากการสำรวจพื้นที่ไร่กาแฟของผู้ประกอบการ วิสาหกิจชุมชน สหกรณ์ชุมชน และสถาวิจัยโครงการหลวงที่ระดับความสูงต่างๆ ทั้งหมดจำนวน 7 พื้นที่ในบริเวณอำเภอดอยสะเก็ด อำเภอแม่ออน และอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ คณะวิจัยสามารถระบุตำแหน่งที่จะติดตั้งอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอทีบนแผนที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 59



ภาพที่ 59 แสดงตำแหน่งของไร่กาแฟทั้ง 7 พื้นที่ในบริเวณอำเภอดอยสะเก็ด อำเภอแม่ออน และ อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลตำแหน่งไร่กาแฟสำหรับติดตั้งเซนเซอร์ไอโอทีในพื้นที่อำเภอดอยสะเก็ด อำเภอแม่ออน และอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่

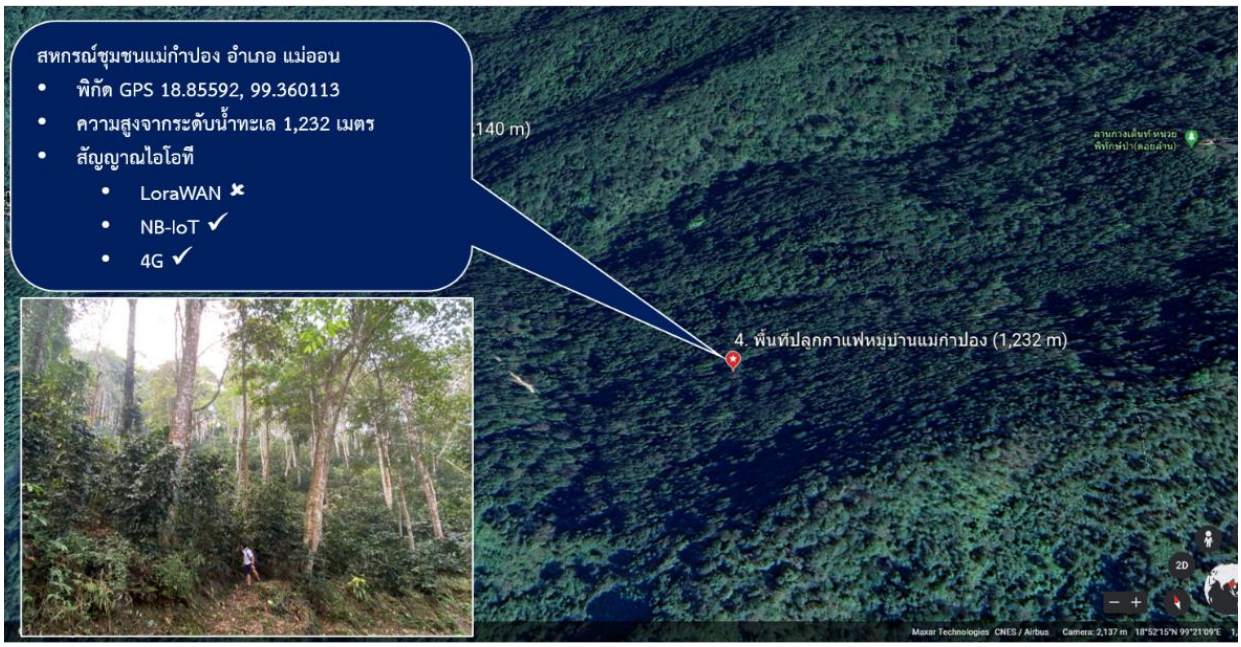
ลำดับ	ไร่กาแฟ	พิกัด GPS	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)	อำเภอ
1	กลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง	19.00378, 99.287443	563	ดอยสะเก็ด
2	กลุ่มวิสาหกิจรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ	18.99182, 99.342934	1,126	ดอยสะเก็ด
3	กลุ่มวิสาหิกิจกาแฟเทพเสด็จ	18.94559, 99.358468	1,148	ดอยสะเก็ด
4	สหกรณ์ชุมชนแม่กำปอง	18.85592, 99.360113	1,232	แม่ออน
5	ไร่กาแฟป้อหลวงธีรเมศร์	18.866525, 99.356217	1,140	แม่ออน
6	สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด	19.101526, 98.773285	692	แม่แตง
7	ไร่กาแฟเดอมูร์	19.114856, 98.710489	890	แม่แตง

*ความสูงจากระดับน้ำทะเลใช้ข้อมูลจาก Google Earth

ภาพที่ 60 แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง อำเภอดอยสะเก็ด

ภาพที่ 61 แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟกลุ่มวิสาหกิจรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ อำเภอดอยสะเก็ด

ภาพที่ 62 แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟกลุ่มวิสาหกิจกาแฟเทพเสด็จ อำเภอดอยสะเก็ด



ภาพที่ 63 แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟสหกรณ์ชุมชนแม่กำปอง อำเภอแม่ออน

ภาพที่ 64 แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟไร่กาแฟป้อหลวงธีรเมศร์ อำเภอแม่ออน

ภาพที่ 65 แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟสถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด อำเภอแม่แตง

ภาพที่ 66 แสดงแผนที่พื้นที่ปลูกกาแฟไร่กาแฟเดอมูร์ อำเภอแม่แตง

3.1.1.2 การทดสอบสัญญาณไอโอที

การทดสอบสัญญาณอุปกรณ์ไอโอทีที่จะนำมาใช้ในโครงการนี้คณะวิจัยได้เลือกเทคโนโลยีไอโอที 3 โปรโตคอล คือ LoRaWAN NB-IoT และ 4G มาใช้สำหรับทดสอบโดยใช้อุปกรณ์และซอฟต์แวร์ทดสอบที่พัฒนาขึ้นโดยเฉพาะสำหรับในโครงการนี้ มีรายละเอียด ดังนี้

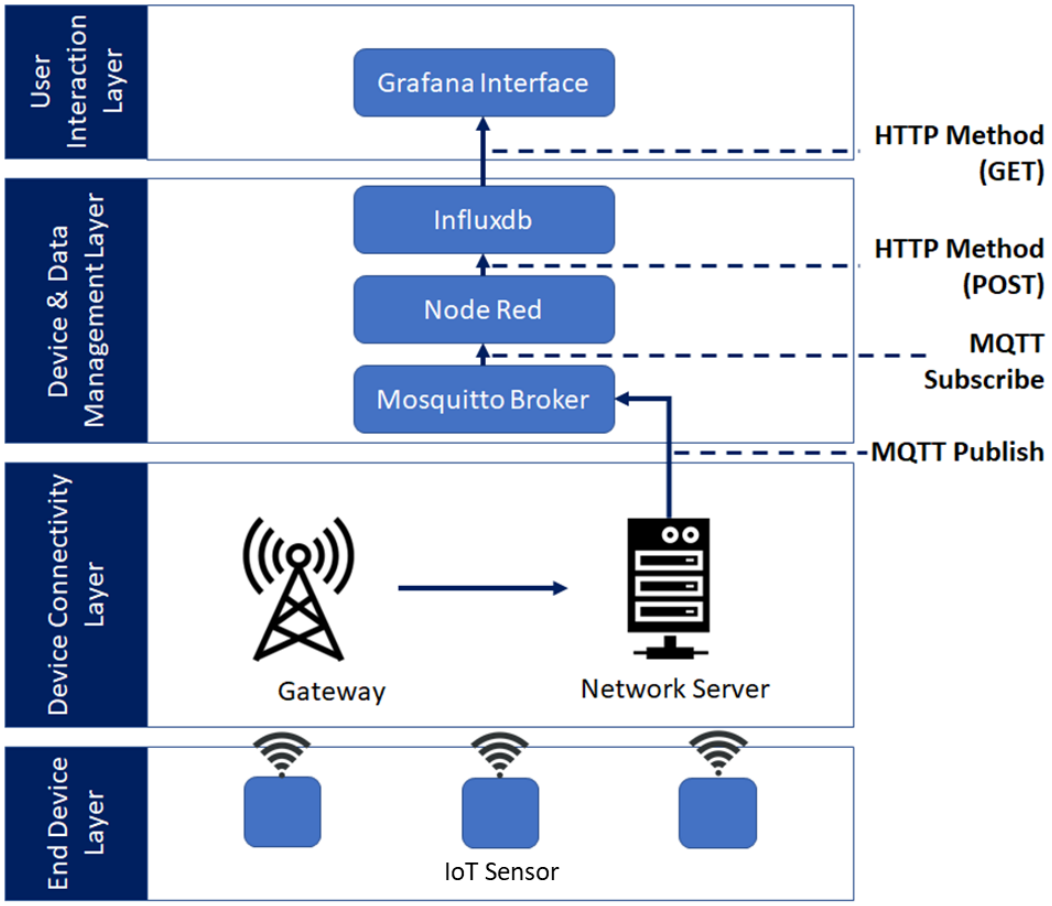
(1) ซอฟต์แวร์สำหรับทดสอบสัญญาณไอโอที

ซอฟต์แวร์สำหรับทดสอบสัญญาณไอโอทีในครั้งนี้พัฒนาขึ้นโดยใช้ซอฟต์แวร์ Open Source ชื่อ Grafana สำหรับใช้ในการแสดงผลข้อมูลการทดสอบสัญญาณ โดยข้อมูลการทดสอบจะถูกบันทึกไว้ในฐานข้อมูลที่พัฒนาโดยซอฟต์แวร์ชื่อ Influxdb ที่จะถูกใช้เป็นฐานข้อมูลหลักสำหรับเก็บข้อมูลของเซนเซอร์ไอโอทีทั้งหมดในโครงการนี้ โดยมีสถาปัตยกรรมของซอฟต์แวร์ดังแสดงในภาพที่ 67

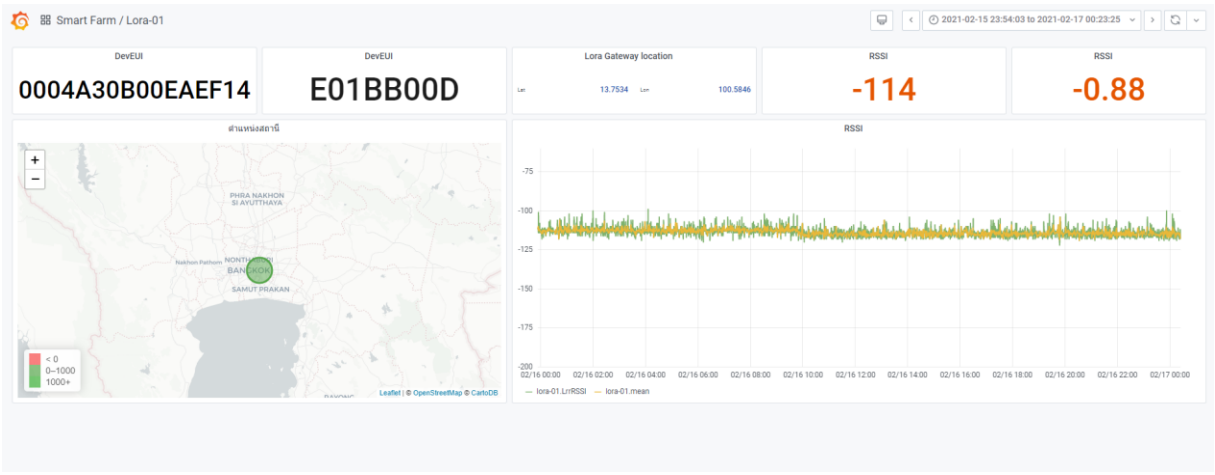
จากภาพจะเห็นว่าอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอที เรียกว่า End Device จะถูกติดตั้งในพื้นที่ของไร่กาแฟทั้ง 7 แห่ง ของจังหวัดเชียงใหม่ และจะเก็บข้อมูลต่างๆในไร่กาแฟเพื่อส่งไปยังเซิฟเวอร์ผ่านทางฐานรับ-ส่งสัญญาณเครือข่ายไอโอที (LoRaWAN NB-IoT และ 4G) โดยซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่จัดการข้อมูลต่างๆที่เข้ามาที่เซิฟเวอร์และการแสดงผลข้อมูล ดังนี้

ตารางที่ 4 แสดงรายการซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในการพัฒนาระบบจัดการข้อมูล ระบบฐานข้อมูล และระบบแสดงผลของเซนเซอร์ไอโอทีในโครงการ

ลำดับ	รายการ	ซอฟต์แวร์
1	MQTT Broker	Mosquito
2	Agent for Collecting and Reporting Metrics and Event	NodeRed
3	Time Series Database	InfluxDB
4	Interface Platform	Grafana



ภาพที่ 67 แสดงสถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซนเซอร์ไอโอทีที่จะพัฒนาขึ้นในโครงการ



ภาพที่ 68 แสดงตัวอย่างหน้าเว็บไซต์สำหรับแสดงผลการทดสอบสัญญาณไอโอที

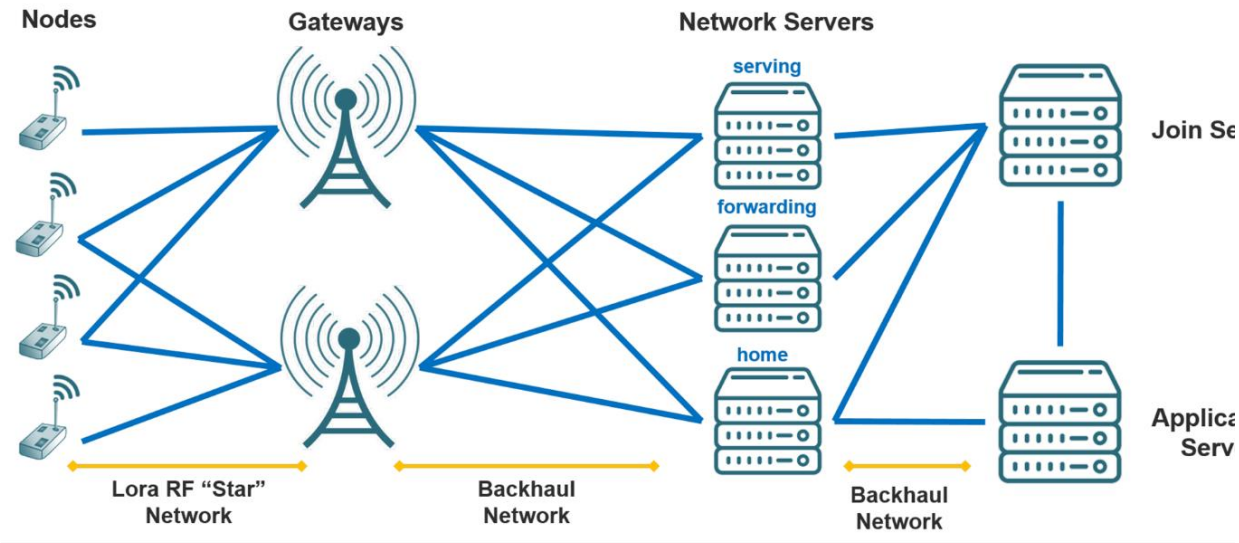
(2) ฮาร์ดแวร์สำหรับทดสอบสัญญาณไอโอที

1. LoRaWAN หรือ Long Range Wide Area Network คือ เครือข่ายสื่อสารไอโอทีที่ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับส่งข้อมูลกำลังต่ำแบบไร้สายระยะไกล หรือ “Long Range (LoRa)” โดยเป็นระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับตลาด M2M (Machine to Machine) และ IoT (Internet of Things) ซึ่ง LoRaWAN ถือเป็นระบบการเชื่อมต่อข้อมูลกำลังต่ำเป็นต้นแบบสำหรับการสื่อสารทางไกล โดยมีข้อดีของเทคโนโลยีนี้ ดังนี้

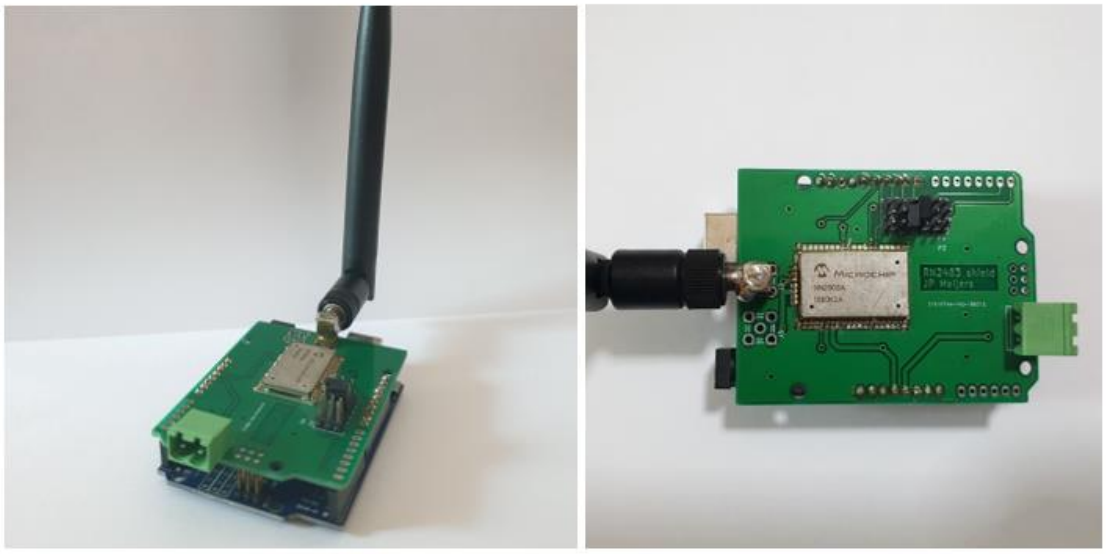
- สามารถส่งข้อมูลได้ระยะทางไกลเนื่องจากใช้ย่านความถี่ไม่สูงมาก จึงมีความทนต่อสิ่งกีดขวางได้มาก (long range up to 15km)
- สัญญาณต่ำสุดของเครื่องลูกข่ายที่สามารถใช้งานได้คือ -137 dBm (End point Sensitivity up to -137 dBm)
- สามารถกระจายสัญญาณเข้าไปใน Indoor ที่ดี (up to 20dB penetrate for deep indoor)
- ประหยัดพลังงานเนื่องจากใช้ความถี่ต่ำและทนต่อสัญญาณรบกวน
- การใช้ย่านความถี่ที่เป็น Light-License จึงทำให้มีต้นทุนต่ำ
- อุปกรณ์สถานีฐาน เช่น ระบบส่งสัญญาณ สายอากาศ มีราคาถูก

โดยปัจจุบันในประเทศไทย คณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ หรือ กสทช. ได้มีการอนุญาตให้สามารถใช้งาน LoRa ในย่านคลื่นความถี่ 920-925 MHz ที่กำลังส่งสูงสุดไม่เกิน 4 วัตต์ โดยในการทดสอบสัญญาณภาคสนามในครั้งนี้ใช้ชุดทดสอบ LoRaWAN ผ่านเครือข่ายของบริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด(มหาชน) หรือ CAT Telecom

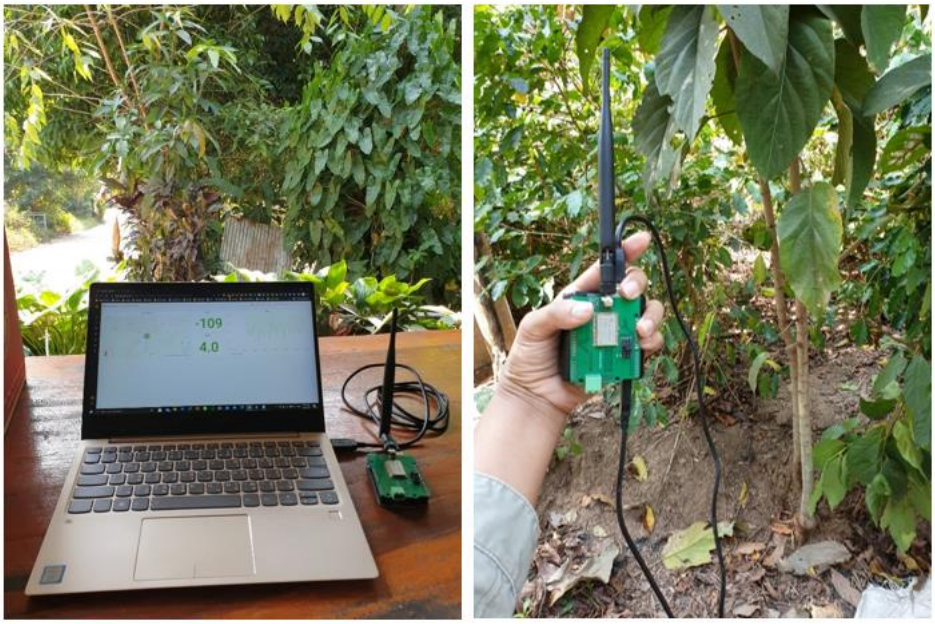
จากการทดสอบสัญญาณ LoRaWAN ภาคสนามในครั้งนี้พบว่ามีเพียงจุดเดียวที่สามารถรับสัญญาณ LoRaWAN จาก CAT Telecom ได้คือ กลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง ซึ่งสามารถรับสัญญาณได้ดีเนื่องจากอยู่ใกล้กับเสาส่งสัญญาณ LoRaWAN ส่วนในพื้นที่อื่น ๆ ทั้ง 6 พื้นที่ไม่สามารถรับสัญญาณ LoRaWAN จาก CAT Telecom ได้ ดังนั้นอุปกรณ์ LoRaWAN จึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นเครือข่ายสำหรับการรับส่งสัญญาณของอุปกรณ์ในโครงการวิจัยนี้



ภาพที่ 69 แสดงสถาปัตยกรรมของเทคโนโลยี LoRaWAN



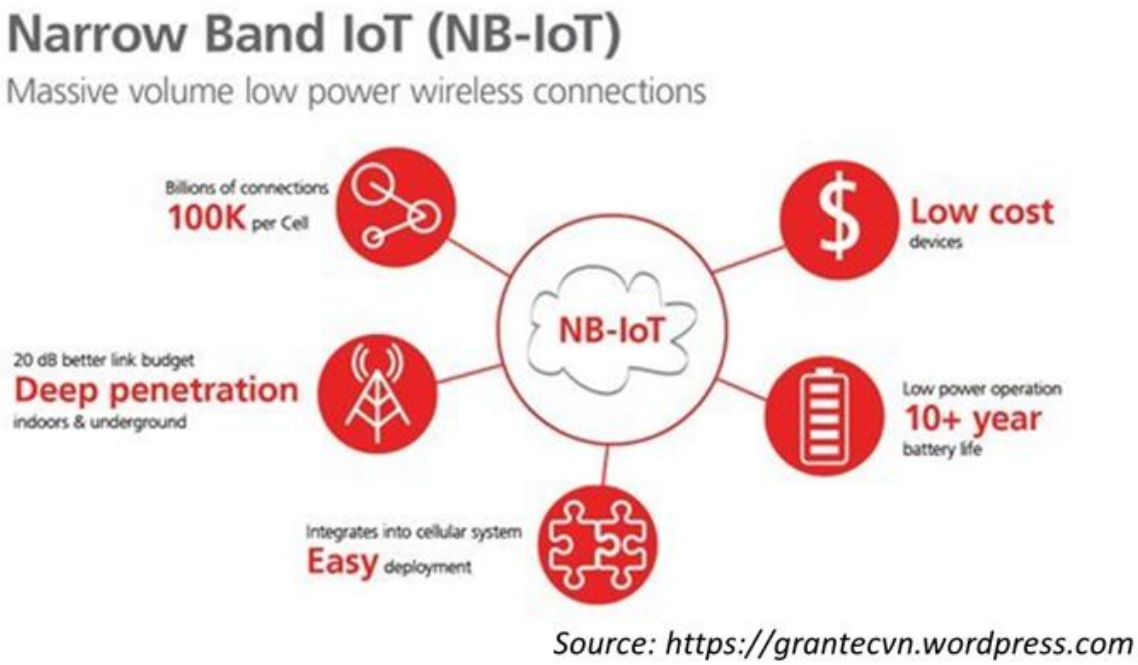
ภาพที่ 70 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ทดสอบสัญญาณ LoRaWAN



ภาพที่ 71 แสดงการทดสอบสัญญาณ LoRaWAN ภาคสนาม

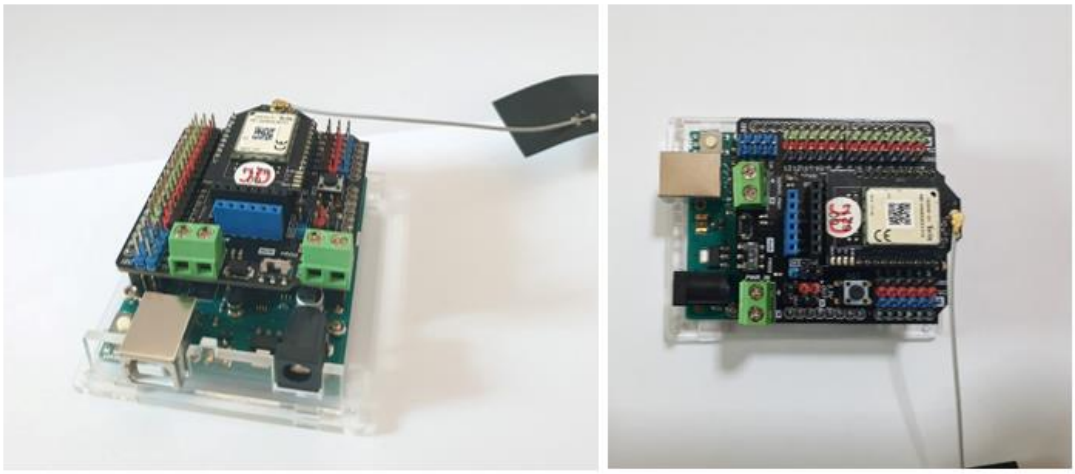
2. NB-IoT หรือ Narrowband Internet of Things เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนามาเพื่อให้อุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อเข้าหากันได้เป็นมาตรฐานระบบโครงข่ายที่ใช้พลังงานต่ำ NB-IoT จึงเหมาะมากกับอุปกรณ์ IoT ที่มีขนาดเล็ก ใช้พลังงานน้อย และไม่ได้ต้องการใช้อินเทอร์เน็ตที่มีความเร็วมาก โดยมีข้อดี ดังนี้

- ใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ ส่งข้อมูล uplink ในขนาดเหมาะสม จึงช่วยทำให้อายุการใช้งานแบตเตอรี่ของอุปกรณ์ IoT อยู่ได้นาน
- รัศมีครอบคลุมของเครือข่ายต่อสถานีฐาน กระจายได้มากกว่า 10 ก.ม. รวมถึงในตัวอาคารก็สามารถรับสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- สามารถพัฒนาเครือข่ายให้เปิดบริการ IoT ได้อย่างรวดเร็ว เพราะออกแบบอุปกรณ์ให้ใช้ร่วมกับ โครงข่าย 4G ในปัจจุบันได้
- ใช้ความเร็วอินเทอร์เน็ตน้อย ทำให้ประหยัด Bandwidth
- สามารถใช้ได้ทั้งในอาคาร และนอกอาคาร



ภาพที่ 72 แสดงข้อดีของเทคโนโลยี NB-IoT

โดยการทดสอบสัญญาณในครั้งนี้คณะวิจัยได้เลือกใช้อุปกรณ์ NB-IoT ของบริษัท แอดวานซ์ ดาต้า เน็ตเวิร์ค คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด ในการทดสอบสัญญาณ เนื่องจากมีอุปกรณ์ให้เลือกใช้หลายรูปแบบ เช่น รูปแบบของ Xbee รูปแบบของ Shield สำหรับใช้งานร่วมกับบอร์ด Arduino และ รูปแบบ DEVIO NB-DEVKIT I ซึ่งเป็นชุดพัฒนา NB-IoT ที่มาพร้อมกับ MCU ในตัวทำให้ง่ายต่อการพัฒนาต้นแบบสำหรับเซนเซอร์ไอโอทีในโครงการนี้

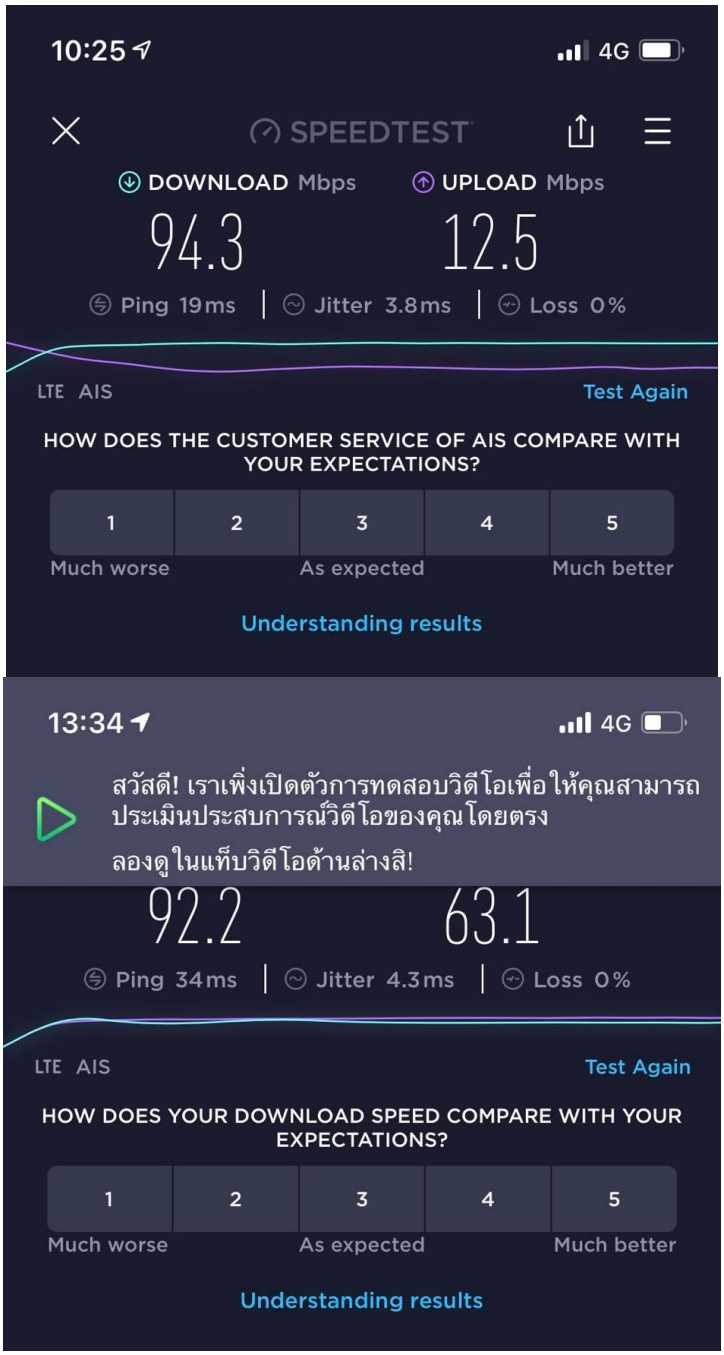


ภาพที่ 73 แสดงตัวอย่างอุปกรณ์ทดสอบสัญญาณ NB-IoT

ภาพที่ 74 แสดงการทดสอบสัญญาณ NB-IoT ภาคสนาม

จากการทดสอบสัญญาณ NB-IoT ภาคสนามโดยใช้เครือข่ายสัญญาณของบริษัทแอดวานซ์ ดาต้า เน็ตเวิร์ค คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด พบว่า พื้นที่ไร่กาแฟทั้ง 7 แห่ง สามารถรับสัญญาณ NB-IoT ได้ และมีคุณภาพของการรับและส่งสัญญาณอยู่ในระดับดี เทคโนโลยีนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นเทคโนโลยีรับส่งสัญญาณหลักในการพัฒนาอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอที สำหรับใช้ติดตั้งในพื้นที่ไร่กาแฟในโครงการ

3. 4G หรือ Fourth-Generation Wireless เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารเคลื่อนที่แบบ Broadband ที่พัฒนาขึ้นมาจากระบบ 3G โดยมีความเร็วในการถ่ายโอนข้อมูลอย่างน้อย 100 เมกะบิตต่อวินาที และมีความปลอดภัยในการใช้งานมากขึ้นจากระบบ 3G เดิม ปัจจุบันในประเทศไทยมีสัญญาณ 4G ครอบคลุมอยู่เกือบทุกพื้นที่ของประเทศขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ให้บริการ



ภาพที่ 75 แสดงตัวอย่างการทดสอบสัญญาณ 4G โดยใช้แอพพลิเคชัน Speed Test

สำหรับการทดสอบสัญญาณภาคสนามในครั้งนี้ใช้เครือข่าย 4G ของบริษัท แอดวานซ์ ดาต้า เน็ตเวิร์ค คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด เป็นหลักในการทดสอบสัญญาณ โดยจากผลการทดสอบสัญญาณในตารางแสดงผลการทดสอบสัญญาณ พบว่า พื้นที่ปลูกกาแฟทั้ง 7 แห่ง สามารถรับสัญญาณ 4G ของบริษัท แอดวานซ์ ดาต้าเน็ตเวิร์ค คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด ได้ในระดับดีและเพียงพอต่อการส่งข้อมูลของเซนเซอร์ไอโอทีที่จะพัฒนาขึ้นในโครงการนี้

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบสัญญาณ IoT ในบริเวณพื้นที่ปลูกกาแฟต่างๆ ในจังหวัดเชียงใหม่

ลำดับ	ไร่กาแฟ	สัญญาณไอโอที		
		LoRaWAN	NB-IoT	4G (AIS) (Mpbs)
1	กลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง	มีสัญญาณ (RSSI ~ 110)	มีสัญญาณ	มีสัญญาณ (80.9*/19.2**)
2	กลุ่มวิสาหกิจรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ	ไม่มีสัญญาณ	มีสัญญาณ	มีสัญญาณ (57.7/17.3)
3	กลุ่มวิสาหิกิจกาแฟเทพเสด็จ	ไม่มีสัญญาณ	มีสัญญาณ	มีสัญญาณ (136/66.6)
4	สหกรณ์ชุมชนแม่กำปอง	ไม่มีสัญญาณ	มีสัญญาณ	มีสัญญาณ (85.25/21.56)
5	ไร่กาแฟป้อหลวงธีรเมศร์	ไม่มีสัญญาณ	มีสัญญาณ	มีสัญญาณ (76.24/18.36)
6	สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด	ไม่มีสัญญาณ	มีสัญญาณ	มีสัญญาณ (68.4/15.3)
7	ไร่กาแฟเดอมูร์	ไม่มีสัญญาณ	มีสัญญาณ	มีสัญญาณ (65.12/18.56)

*ความเร็วในการดาวน์โหลดข้อมูล ** ความเร็วในการอัพโหลดข้อมูล

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลยี NB-IoT และ 4G กับความต้องการของอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอทีในโครงการ

ลำดับ	รายการ	เทคโนโลยี		ความต้องการของเทคโนโลยีเซนเซอร์ไอโอทีในโครงการ
		NB-IoT	4G	
1	ความครอบคลุมของเครือข่าย	ครอบคลุม	ครอบคลุม	ครอบคลุม
2	ต้นทุนของเทคโนโลยี	ต่ำ	สูง	ต่ำ
3	อัตราค่าบริการต่อปีต่ออุปกรณ์	ต่ำ	สูง	ต่ำ
4	อัตราการถ่ายโอนข้อมูล	ต่ำ	สูง	ต่ำ

จากผลการทดสอบสัญญาณเครือข่ายอุปกรณ์ IoT ในตารางข้างต้น พบว่า เครือข่ายสัญญาณ NB-IoT และ เครือข่ายสัญญาณ 4G ของบริษัท แอดวานซ์ ดาต้าเน็ตเวิร์ค คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด มีความครอบคลุมมากกว่า เครือข่ายสัญญาณ LoRaWAN ของบริษัท กสท โทรคมนาคม จำกัด (มหาชน) ดังนั้น ถ้าพิจารณาเฉพาะการใช้บริการสัญญาณจากผู้ให้บริการที่มีการติดตั้งโครงสร้างพื้นฐานคือเสารับส่งสัญญาณเพียงอย่างเดียวแล้ว

เทคโนโลยี LoRaWAN จึงยังไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการพัฒนาเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับติดตั้งในพื้นที่ไร่กาแฟ เนื่องจากเครือข่ายสัญญาณยังไม่ครอบคลุม โดยเครือข่ายที่มีความครอบคลุมมากกว่าคือ เครือข่าย NB-IoT และเครือข่าย 4G โดยหากพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เช่น ราคาค่าบริการ ราคาต้นทุนอุปกรณ์ และปริมาณการถ่ายโอนข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในการพัฒนาเซนเซอร์ไอโอที พบว่า เทคโนโลยี NB-IoT มีความเหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นเทคโนโลยีสำหรับการรับส่งข้อมูลของเซนเซอร์ไอโอทีในโครงการนี้ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีอัตราค่าบริการ และต้นทุนของอุปกรณ์ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับการพัฒนาเซนเซอร์ไอโอทีโดยใช้เทคโนโลยี 4G และหากคำนึงถึงปริมาณความต้องการในการถ่ายโอนข้อมูลของเซนเซอร์ไอโอทีร่วมด้วยก็จะพบว่าเทคโนโลยี 4G มีความสามารถในการถ่ายโอนข้อมูลสูงกว่าความต้องการของอุปกรณ์ค่อนข้างมาก ดังนั้น เทคโนโลยี NB-IoT จึงมีความเหมาะสมที่สุดทั้งในด้านความครอบคลุมของเครือข่าย ต้นทุน และความสามารถในการถ่ายโอนข้อมูลที่จะใช้สำหรับอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอทีในโครงการนี้

3.1.2 สถาปัตยกรรมของระบบไร่กาแฟอัจฉริยะ

3.1.2.1 ทฤษฎีเกษตรแม่นยำ และเทคโนโลยีคู่แฝดดิจิทัล

Precision Agriculture

ปัจจัยที่สำคัญ 4 อย่าง ในงานเกษตรกรรม (กสิกรรม) อันได้แก่ ดิน น้ำ ฟ้า พืช เป็นสิ่งที่เกษตรกรต้องทำนุบำรุง เพื่อจะได้ผลผลิตสูงสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยทั่วไปปัจจัยข้อที่สาม หรือ “ฟ้า” (แสงและอากาศ) นั้นอาจจะควบคุมได้ค่อนข้างยาก (นอกเสียจากจะทำเกษตรกรรมในโรงเรือน เช่น การทำไร่บนอาคารสูง (Vertical and Urban Farming) หรือการทำวิศวกรรมปรับเปลี่ยนสภาพอากาศ (Geoengineering) เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันนี้กำลังกลายมาเป็นแนวโน้มใหม่ของโลก) ปัจจัยอื่น ๆ ที่เหลือนั้นถือว่าเป็นสิ่งที่เกษตรกรสามารถรับมือได้ ขึ้นอยู่กับเงินทุนและเทคโนโลยีที่มี

ในอดีตที่ผ่านมา การดูแลปัจจัยที่เหลือ 3 อย่าง ได้แก่ ดิน น้ำ และ พืช ในพื้นที่ไร่นานั้น มักเป็นการดูแลแบบพื้นที่กว้าง กล่าวคือให้การดูแลเท่า ๆ กันตลอดทั้งไร่ เช่น ให้ปุ๋ยสูตรเดียวกัน เป็นปริมาณเท่า ๆ กันตลอดทั้งไร่นา โดยไม่ได้คำนึงว่าพื้นที่ย่อย ๆ นั้นมีความแตกต่างกัน เช่น ความอุดมสมบูรณ์ของดินในแต่ละบริเวณไม่เท่ากัน ความชื้นของดินไม่เท่ากัน โครงสร้างของดินไม่เท่ากัน ซึ่งก็มีผลทำให้พืชในแต่ละบริเวณให้ผลผลิตทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพไม่เท่ากัน แต่การดูแลกลับดูแลให้เท่า ๆ กัน ซึ่งแทนที่จะเป็นผลดีกลับเป็นผลเสีย เพราะดินในบริเวณที่มีความอุดมสมบูรณ์มากอยู่แล้ว หากได้ปุ๋ยเพิ่มเข้าไปอีกจนมากเกินไป อาจทำให้ดินเสียได้ ในขณะที่ดินบริเวณที่ขาดธาตุอาหาร ก็จะได้ส่วนแบ่งของปุ๋ยเท่า ๆ กันกับดินที่อุดมสมบูรณ์อยู่แล้ว ทำให้พืชในบริเวณนั้นไม่สามารถเติบโตได้เต็มที่ การให้ยาฆ่าแมลงแบบเก่า มักจะฉีดพ่นไปทั่ว ๆ โดยไม่ได้คำนึงว่าบริเวณใดมีแมลงมาก บริเวณใดมีแมลงน้อย ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น อีกทั้งยังเป็นภัยต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งจริง ๆ แล้ว หากการฉีดพ่นยาฆ่าแมลงเป็นไปอย่างฉลาด และสามารถปรับอัตราได้ตามความหนาแน่นของแมลงในพื้นที่ต่าง ๆ จะทำให้ทั้งประหยัด มีประสิทธิภาพ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การให้น้ำก็เช่นเดียวกัน ในไร่นาหลายๆ แห่งที่มีระบบรดน้ำ ก็มักจะให้น้ำในอัตราที่เท่า ๆ กันทั้งไร่ ทั้ง ๆ ที่ดินในแต่ละบริเวณซึ่งมีโครงสร้างทางทั้งทางกายภาพและเคมีแตกต่างกัน จะอุ้มน้ำหรือกักเก็บความชื้นได้ไม่เท่ากัน ทำให้ในไร่นาแบบนั้น ก็จะมีทั้งพืชที่กำลังขาดน้ำปะปนอยู่กับพืชที่สำลักน้ำ ปัญหาที่กล่าวมานี้จะยิ่งทวีความสำคัญขึ้นไปอีก หากการเกษตรทำในพื้นที่ที่มีความแตกต่างเชิงภูมิประเทศในแต่ละพื้นที่ย่อยๆ เช่น มีความลาดเอียงที่แตกต่างกัน มีพื้นที่ใกล้น้ำหรือใกล้เขาหรือใกล้ป่า พื้นที่ย่อย ๆ เหล่านั้น ย่อมมีคุณสมบัติของดินที่แตกต่างจากพื้นที่อื่น ๆ ไม่นับสภาพภูมิอากาศย่อย (Microclimate) ซึ่งมีความแตกต่างอยู่แล้ว ดังนั้นการดูแลผืนที่ดินแบบเฉลี่ยทำเท่า ๆ กันในพื้นที่กว้าง ย่อมเป็นเรื่องที่ไม่ถูกต้อง

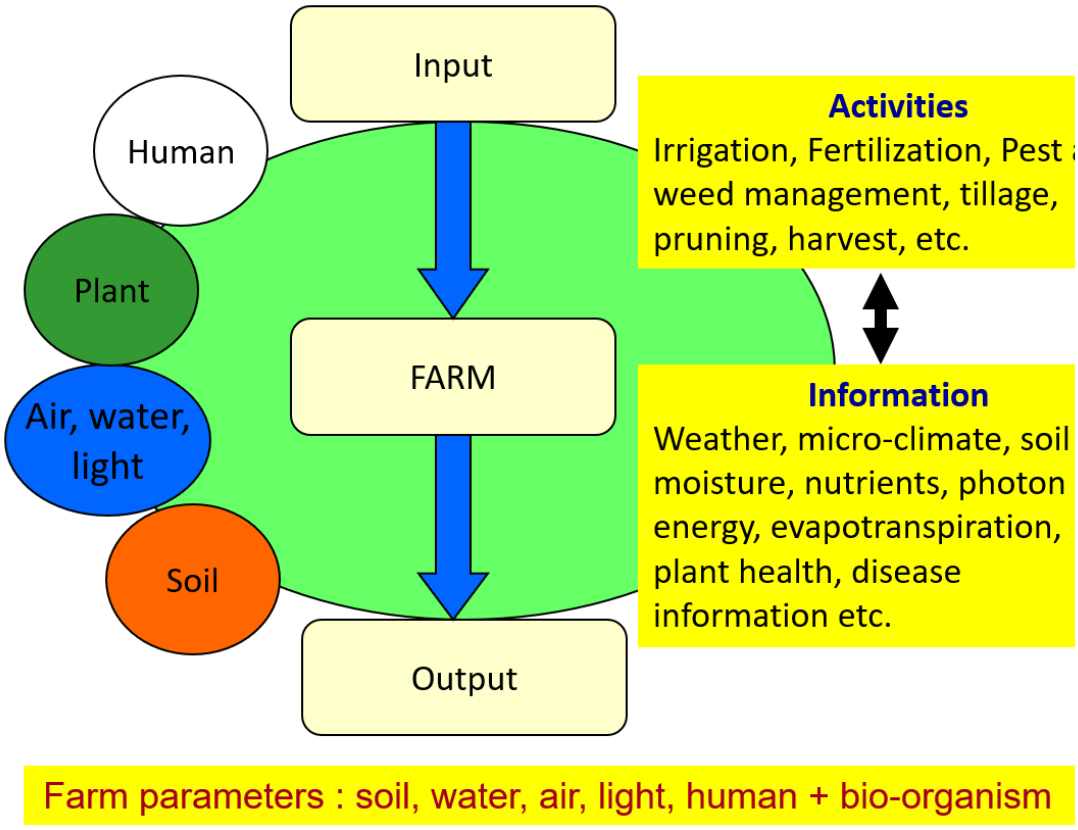
สภาพภูมิอากาศโลกที่เปลี่ยนแปลงไปทำให้การทำเกษตรในปัจจุบันเป็นสิ่งที่ทำได้ยากขึ้นทุกวัน พืชหลายชนิดโดยเฉพาะผลไม้ค่อนข้างจะไวต่อสภาพแวดล้อมนี้ ดังนั้นเมื่อสภาพอากาศปรวนแปร เช่น วงจรของการเปลี่ยนฤดูกาลผิดแผกไปจากเดิม ก็จะมีผลให้ผลผลิตลดลงทั้งปริมาณและคุณภาพ การดูแลรักษาเพื่อให้ประสิทธิภาพการผลิตของพืชเหล่านี้คงที่หรือดีขึ้น จะต้องอาศัยการทำเกษตรแบบใหม่ ที่มีภูมิต้านทานต่อสภาพภูมิอากาศ หรือที่เรียกว่า Climate-Smart Agriculture รวมไปถึงการจัดการปัจจัยในการเพาะปลูกที่คำนึงถึงความแตกต่างของสภาพพื้นที่ย่อย ๆ ที่เราเรียกว่า เกษตรกรรมแม่นยำ หรือ Precision Agriculture

Precision Agriculture หรือ การเกษตรแม่นยำ เป็นเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่นิยมกันมากในประเทศสหรัฐอเมริกา และออสเตรเลีย เริ่มแพร่หลายเข้าไปในหลายประเทศ ทั้งยุโรป ญี่ปุ่น แม้กระทั่งประเทศเพื่อนบ้านของเราอย่าง มาเลเซีย Precision Agriculture/ Intelligent Agriculture ได้รับการนิยาม และตั้งความหมายต่างๆ กันไป แม้แต่ชื่อ ก็ยังถูกเรียกได้หลายชื่อ ตามแต่จะเน้น เทคโนโลยีหลักตัวไหน เช่น

- Precision Farming
- Information-Intensive Agriculture
- Prescription Farming
- Target Farming
- Site Specific Crop Management
- Variable Rate Management, Variable Rate Technology (VRT)
- Farming by Soil, Grid Soil Sampling Agriculture, Grid Farming
- Global Positioning Systems (GPS) Agriculture
- Farming by the Inch, Farming by the Foot

พูดง่ายๆ ก็คือ Precision Agriculture คือ กลยุทธ์ในการทำการเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเกษตรกรสามารถจะปรับการใช้ทรัพยากร รวมไปถึงการดูแลอย่างมีประสิทธิภาพและแม่นยำ ไม่ว่าจะเป็นการหว่านเมล็ดพืช การให้ปุ๋ย การใช้ยาปราบศัตรูพืช การไถพรวนดิน การรดน้ำ การคัดเลือกผลผลิต การเก็บ

เกี่ยวผลผลิต โดยการทำ Precision Agriculture ต้องประกอบด้วยเรื่องสำคัญ 3 เรื่องคือ (1) สารสนเทศ (2) เทคโนโลยี (3) การบริหารจัดการ



ภาพที่ 76 แสดงแนวคิดของ Precision Agriculture

Precision Agriculture เกิดจากแนวคิดที่ว่าพืชพันธุ์ที่ปลูกและสภาพแวดล้อมรอบ ๆ ต้นพืช (ดิน น้ำ แสง อากาศ) ในไร่นามีความแตกต่างกันในแต่ละบริเวณแม้จะอยู่ในไร่เดียวกันก็ตาม สภาพล้อมรอบที่แตกต่างนี้มีผลให้การเกิดผลผลิตแตกต่างกันได้ ดังนั้นการปรับการดูแลให้เหมาะสมกับสภาพที่แตกต่างนั้น จะทำให้สามารถสร้างผลผลิตอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ปัญหาก็คือ เราจะรู้ได้อย่างไรว่าความแตกต่างนั้นมีจริง แล้วจะวัดอย่างไร หรือเมื่อรู้แล้ว เราจะนำเทคโนโลยีมาใช้อย่างไร รวมไปถึงจะบริหารจัดการอย่างไร นี่คือโจทย์ของ Precision Agriculture ซึ่งจะนำประโยชน์มาสู่เกษตรกร เจ้าของฟาร์ม ดังนี้

- เกิดการลดต้นทุน
- การเกิดผลผลิตสูงสุด เกิดทั้งปริมาณและคุณภาพสูงสุดที่เหมาะสมกับสภาพพื้นที่แต่ละส่วนในไร่ หรือฟาร์ม
- เกิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า
- รักษาสภาพแวดล้อม ซึ่งสามารถนำไปสู่กระบวนการผลิตอาหารที่มีคุณภาพ และปลอดภัย

Precision Agriculture มีลักษณะเป็นวงจรที่ประกอบด้วยขั้นตอน ทั้งหมด 5 ขั้นตอนด้วยกัน ได้แก่

(1) Data Collection เป็นขั้นตอนการเก็บข้อมูลของดิน ผลผลิต ภูมิอากาศ ด้วยวิธีการและเทคโนโลยีต่าง ๆ

(2) Diagnostics เป็นขั้นตอนในการวินิจฉัยข้อมูล สร้างและเก็บข้อมูลที่เป็นประโยชน์เข้าสู่ฐานข้อมูล

(3) Analysis เป็นขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูล การทำนายผลผลิตเชิงพื้นที่ รวมไปถึงการวางแผนจัดการ

(4) Precision Field Operations เป็นขั้นตอนในการปฏิบัติการตามแผนที่วางไว้

(5) Evaluation เป็นขั้นตอนในการประเมินผลการปฏิบัติการ ว่ามีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด คุ้มค่าหรือไม่

Precision Agriculture จะมีประโยชน์มากยิ่งขึ้นเป็นทวีคูณ หากมีการทำกันเป็นพื้นที่กว้างขวาง แทนที่จะเป็นฟาร์มหรือไร่นาเจ้าเดียวแต่ฟาร์มหรือไร่นาที่อยู่ข้างเคียงก็ทำด้วย ยิ่งเป็นภูมิภาคยิ่งดี เพราะสามารถนำข้อมูลมาเชื่อมโยงกันทำให้สามารถที่จะเข้าใจความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในท้องถิ่น ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ซึ่งอาจนำไปสู่การตัดสินใจ เพื่อปฏิบัติการสิ่งใดสิ่งหนึ่ง หรือเพื่อแก้ปัญหาบางอย่าง ก่อนที่ปัญหานั้นจะลุกลามไปในบริเวณกว้าง เช่น หากฟาร์มหนึ่งตรวจพบสภาวะที่เป็นสาเหตุของโรคติดต่อในสัตว์ ก็อาจเชื่อมโยงข้อมูลแจ้งเตือนถึงกันได้

Precision Agriculture สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีในการทำเกษตรกรรมได้ทุกแบบ ไม่ว่าการเกษตรแบบนั้นจะมีการเก็บเกี่ยวปีละครั้งหรือปีละหลายครั้ง ขนาดของฟาร์มหรือไร่นาจะเล็กหรือใหญ่ ลักษณะของการเพาะปลูกหรือปศุสัตว์ จะเป็นแบบชนิดเดี่ยวหรือแบบผสมผสาน พันธุ์พืชจะเป็นแบบธรรมชาติหรือแบบดัดแปรพันธุกรรม การให้น้ำจะเป็นแบบตามธรรมชาติหรือใช้ระบบรดน้ำ รวมทั้งปรัชญาของฟาร์มหรือไร่นาที่กำหนดให้เป็น เกษตรอินทรีย์ หรือเกษตรเคมี เกษตรแม่นยำจึงยึดหลักทางสายกลาง ที่ผันเปลี่ยนต้นทุนหรือ input ให้เป็นผลผลิต หรือ output ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืน

แรงจูงใจหรือแรงผลักดันที่ทำให้ประเทศไทยต้องหันมาสนใจ Precision Agriculture ก็คือสภาพสิ่งแวดล้อมที่เสื่อมถอยจากการเกษตรที่ขาดข้อมูลความเชื่อมโยง ระหว่างกิจกรรมในฟาร์มและไร่นากับสภาพแวดล้อมที่ถูกกระทบ ราคาพืชผลทางการเกษตรที่แปรเปลี่ยนตามปริมาณผลผลิต ซึ่งขาดความสามารถในการคาดการณ์ล่วงหน้า สภาวะการกระจายตัวและพฤติกรรมของประชากรที่เปลี่ยนไป ทำให้แรงงานภาคการเกษตรขาดแคลน หรือขาดคุณภาพ รวมไปถึงสภาวะโลกร้อนที่ทำให้สภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงไป จนภูมิปัญญาชาวบ้านที่สืบทอดมาหลายชั่วคนสำหรับใช้ในการดำรงชีวิต และใช้ตัดสินใจในการดำเนินกิจกรรมใน

ฟาร์มและไร่นาเริ่มใช้ไม่ได้ผล หรือมีความสุ่มเสี่ยงมากขึ้น เหล่านี้ทำให้การทำการเกษตรในอนาคตข้างหน้า ต้องวางอยู่บนพื้นฐานของข้อมูล และสภาพล้อมรอบที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างเรียลไทม์มากขึ้น

สภาพแวดล้อมต่าง ๆ รอบ ๆ ต้นพืชที่ทำการเพาะปลูก อันได้แก่ น้ำ พลังงานแสง อากาศและก๊าซชนิดต่าง ๆ ดินและสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในดิน ในพื้นที่ย่อย ๆ ต่างๆ ในไร่นามีความแตกต่างกันในแต่ละบริเวณพื้นที่ย่อย ๆ นั้น แม้ว่าจะอยู่ในไร่เดียวกันก็ตาม สภาพล้อมรอบที่แตกต่างนี้มีผลให้การเกิดผลผลิตแตกต่างกันได้ ดังนั้นการปรับการดูแลให้เหมาะสมกับสภาพที่แตกต่างนั้น จะทำให้สามารถสร้างผลผลิตอย่างมีประสิทธิภาพที่สุด Precision Agriculture มีการนำเอาเทคโนโลยีหลาย ๆ ด้าน เช่น เทคโนโลยีสื่อสาร เทคโนโลยีสารสนเทศ เทคโนโลยีวัสดุ เทคโนโลยีชีวภาพ ไปจนถึงนาโนเทคโนโลยีเพื่อทำให้เกษตรกรรมเป็นงานที่มีความแม่นยำ สามารถที่จะคาดหวังผลที่จะเกิดขึ้นได้ กล่าวคือ การทำ Precision Agriculture จะทำให้กระบวนการการเปลี่ยน Input ไปเป็น Output นั้น ผ่านเส้นทางที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากที่สุด Precision Agriculture จะยิ่งมีประโยชน์มากยิ่งขึ้นเป็นทวีคูณ หากมีการทำกันเป็นพื้นที่กว้างขวางแทนที่จะเป็นฟาร์มหรือไร่นาเจ้าเดียว แต่ฟาร์มหรือไร่นาที่อยู่ข้างเคียงก็ทำด้วย ยิ่งเป็นภูมิภาคยิ่งดี เพราะสามารถนำข้อมูลมาเชื่อมโยงกันทำให้สามารถที่จะเข้าใจความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในท้องถิ่น ณ บริเวณใดบริเวณหนึ่ง ซึ่งอาจนำไปสู่การตัดสินใจ เพื่อปฏิบัติการสิ่งใดสิ่งหนึ่ง หรือเพื่อแก้ปัญหาอย่างมีตรรกะสูงสุด

ในอดีตได้มีการนำเทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกลหรือ Remote Sensing มาใช้เก็บข้อมูลพื้นที่ โดยอาศัยคลื่นแสงในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เรดาห์ ไมโครเวฟ วิทยุ เป็นต้น โดยอุปกรณ์รับรู้เหล่านั้นมักจะติดตั้งบนอากาศยานหรือดาวเทียม เทคโนโลยี Remote Sensing เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการใช้งานในพื้นที่กว้าง หากจะใช้สำหรับพื้นที่ย่อย ๆ ในระดับฟาร์ม ข้อมูลก็จะค่อนข้างหยาบ เหมาะกับงานนโยบายของรัฐมากกว่าที่จะใช้ได้จริงในไร่นา ข้อมูลดิบที่ได้จาก Remote Sensing จะเป็นสเปคตรา (Spectra) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นแสงเป็นหลัก ซึ่งต้องอาศัยการแปลความหมายออกมาเป็นข้อมูลที่เป็นประโยชน์ เช่น ขนาดและความหลากหลายของพื้นที่เกษตรกรรม ชนิดของพืชที่มีการเพาะปลูก ลักษณะความอุดมสมบูรณ์ของดิน เป็นต้น

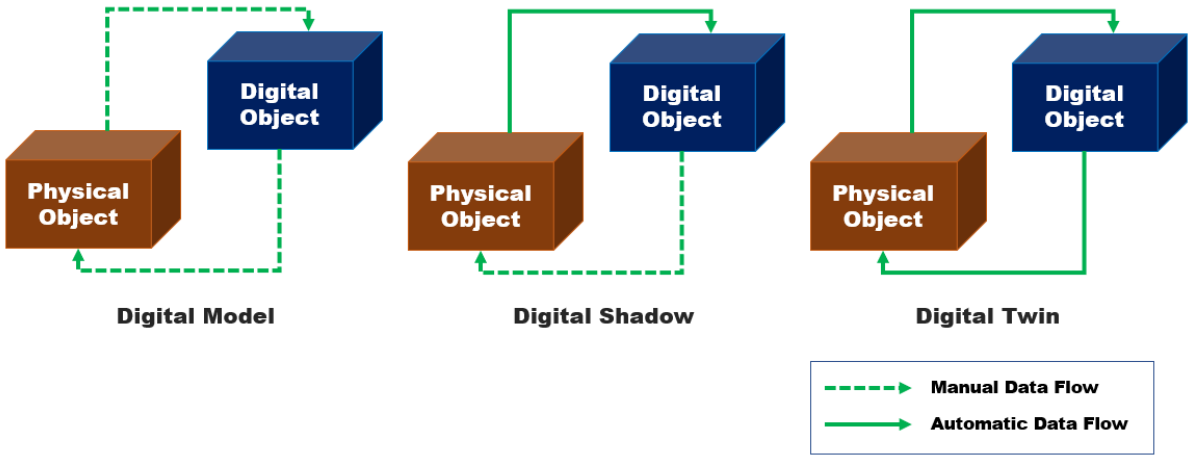
แต่ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมานี้ เทคโนโลยีอีกแบบหนึ่งนั่นคือ เทคโนโลยีรับรู้ระยะใกล้ หรือ Proximal Sensing ได้เข้ามามีบทบาทมากกว่า โดยเฉพาะในงานของ Precision Agriculture เพราะเทคโนโลยีตัวนี้เกษตรกรสามารถเข้าถึงได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีต้นทุนต่ำกว่า นอกจากนั้นเทคโนโลยี Proximal Sensing ยังให้รายละเอียดของข้อมูลมากกว่า โดยเฉพาะในระดับพื้นที่ของไร่นา Proximal Sensing จะอาศัยเซนเซอร์วัดข้อมูลต่าง ๆ ได้โดยตรง ณ จุดที่สนใจ หรือพื้นที่ที่ไม่ได้กว้างเกินไป เช่น เซนเซอร์ตรวจอากาศ (Weather Station) เซนเซอร์วัดดิน (Soil Sensor) เซนเซอร์ตรวจวัดพืช เซนเซอร์ตรวจโรคพืช (Plant Disease Sensor) เซนเซอร์ตรวจวัดผลผลิต (Yield Monitoring Sensor) เซนเซอร์ตรวจวัดผลไม้ เซนเซอร์เคมี (Chemical Sensor) เป็นต้น เซนเซอร์เหล่านี้สามารถที่จะนำมาวางเป็นระบบเครือข่ายไร้สาย โดยนำไปติดตั้งพื้นที่ไร่นาเพื่อ

เก็บข้อมูลต่าง ๆ เช่น ความชื้นในดิน ลักษณะทางกายภาพและเคมีของดินในแปลงปลูก อุณหภูมิ ปริมาณแสง ซึ่งเซนเซอร์เหล่านี้สามารถนำไปวางให้ครอบคลุมพื้นที่ เราสามารถนำเซนเซอร์เหล่านี้ไปเปิดปิดวาล์วน้ำโดยอัตโนมัติ หรือเฝ้าระวังโรคพืช เป็นต้น

นอกจากการนำเซนเซอร์ต่าง ๆ ที่กล่าวมา ไปติดตั้งตามจุดต่าง ๆ ในไร่นาแล้ว เราก็อาจนำเซนเซอร์ที่กล่าวมาข้างต้นนั้นติดตั้งเข้ากับหุ่นยนต์แทน แล้วปล่อยให้หุ่นยนต์ที่ติดตั้งเซนเซอร์นี้ เดินสแกนไปในพื้นที่ไร่นาได้อีกด้วย ซึ่งจะมีข้อดี เพราะการเก็บข้อมูลจะมีความละเอียดมากขึ้น สามารถที่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งไร่ได้ เปรียบเสมือนให้มนุษย์นำเครื่องวัดต่าง ๆ ไปเดินตรวจตราในไร่ ซึ่งจะดีกว่าการเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งเป็นจุด ๆ ที่ตำแหน่งคงที่ ซึ่งจะให้ข้อมูลเฉพาะจุดที่ติดตั้ง และบริเวณใกล้เคียงเท่านั้น ระบบหุ่นยนต์เซนเซอร์ที่กล่าวมานี้จะยิ่งมีประสิทธิภาพสูงขึ้นไปอีก หากสามารถพัฒนาให้ทำงานร่วมกันเป็นฝูง เพราะจะทำให้สามารถออกแบบหุ่นยนต์หลากหลายประเภทหน้าที่ และเลือกให้หุ่นยนต์แต่ละตัวทำงานที่เหมาะสม ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวน่าจะเข้ามามีบทบาทในภาคเกษตรในอนาคตอันใกล้นี้

Digital Twin for Precision Agriculture

เทคโนโลยี Digital Twin จะเป็นการสร้างคู่แฝดจำลองของสิ่งต่าง ๆ ในโลกกายภาพ ในที่นี้ก็คือฟาร์มเกษตรที่อยู่ในโลกจริง หรือโลกกายภาพขึ้นมาในโลกเสมือน หรือโลกดิจิทัล โดยทั้ง 2 โลก (Physical-Cyber Systems) จะเชื่อมต่อกันผ่านระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things หรือ IoT) ซึ่งจะทำให้สิ่งที่อยู่ในโลกกายภาพนั้นมีความฉลาดขึ้น โดยสามารถที่จะทำงานภายใต้การตัดสินใจของสิ่งที่อยู่ในโลกดิจิทัลแบบเรียลไทม์ ในขณะเดียวกัน ก็จะทำให้สิ่งที่อยู่ในโลกจำลองนั้น มีลักษณะ “เป็นจริง” มากยิ่งขึ้น โดยคุณสมบัติของมันนั้น สะท้อนสิ่งที่เกิดขึ้นจริงในโลกกายภาพ



ภาพที่ 77 แสดงการไหลของข้อมูลระหว่างโลกกายภาพกับโลกดิจิทัล ซึ่งแสดงพัฒนาการจาก Digital Model มาสู่ Digital Twin

ในทางปฏิบัติ ข้อมูลต่าง ๆ จากโลกกายภาพ เช่น สิ่งที่เกิดขึ้นในฟาร์มจะถูกส่งเข้าไปอยู่ในโลกดิจิทัลผ่านการรับรู้จากเซนเซอร์ต่าง ๆ เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดพืช เซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมในฟาร์ม

เซนเซอร์ตรวจวัดจักรกลเกษตร เป็นต้น ผ่านเทคโนโลยีไอโอทีเข้าสู่ระบบคลาวด์อินเทอร์เน็ต โดยข้อมูล Big Data เหล่านั้นจะถูกประมวลผลโดยอัลกอริทึมทางวิทยาศาสตร์ข้อมูล (Data Science) เช่น ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence หรือ AI) เพื่อจะนำมาสู่การตัดสินใจต่าง ๆ จะโดยเกษตรกรเอง (Decision Support System) หรือโลกดิจิทัลอาจจะตัดสินใจทำแบบอัตโนมัติบนโลกกายภาพโดยตรงเลยก็ได้ (Semi-autonomous หรือ Autonomous)

สิ่งที่เกิดขึ้นในโลกกายภาพ เมื่อเชื่อมต่อมาสู่โลกดิจิทัล ก็จะทำให้การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในฟาร์ม ก็จะเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับคู่แฝดดิจิทัล ทำให้เกษตรกรหรือผู้ดูแลฟาร์มสามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันท่วงที สามารถมองเห็นภาพรวมของฟาร์มเกษตรได้ในระยะเวลาอันสั้นและรวดเร็ว ผ่านทางสมาร์ทโฟน แท็บเล็ต หรือคอมพิวเตอร์ เป็นต้น โดยมีโปรแกรมปัญญาประดิษฐ์ช่วยวิเคราะห์เพื่อการตัดสินใจ (Artificial Intelligence Based Decision Support System) ทำให้เกษตรกรสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในฟาร์มได้ถูกต้อง สามารถบริหารจัดการทรัพยากรในฟาร์มเกษตรได้อย่างแม่นยำ ช่วยลดความเสี่ยงและป้องกันความเสียหายที่อาจจะเกิดขึ้นได้ล่วงหน้าก่อนที่ปัญหาจริงจะเกิดขึ้นได้ หรือในอนาคตหากมีการพัฒนาขึ้นไปอีก ฟาร์มดิจิทัลนั้นก็อาจจะมีความสามารถดำเนินการด้วยตนเองก็ย่อมได้

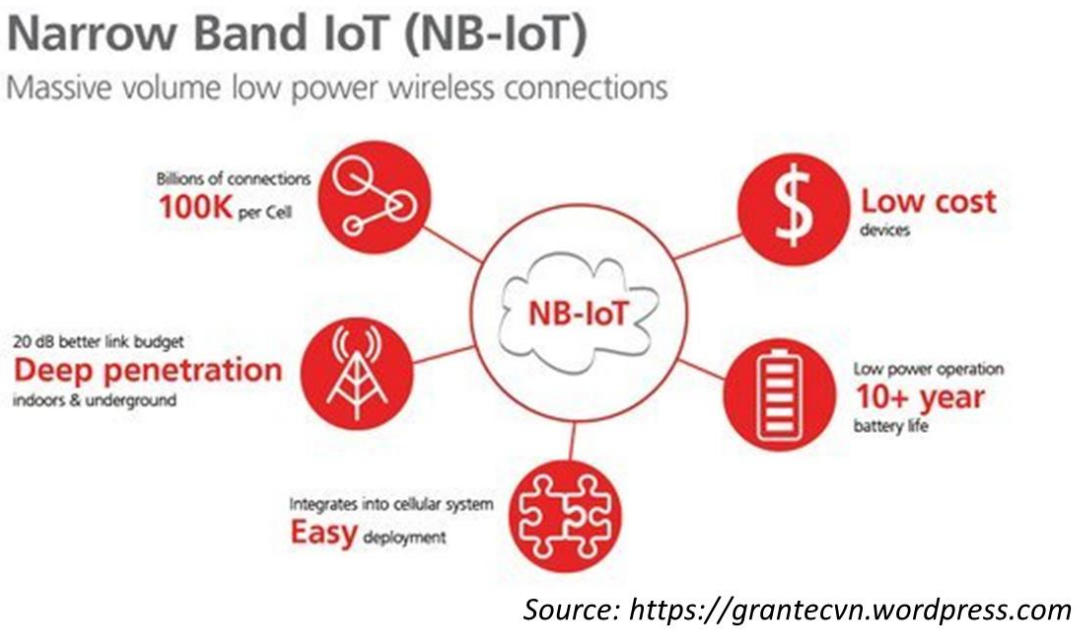
เทคโนโลยีคู่แฝดดิจิทัลสำหรับการทำเกษตรแบบแม่นยำ สามารถตอบโจทย์ความต้องการของเกษตรกรที่มีความต้องการข้อมูลต่าง ๆ โดยเฉพาะข้อมูลทางด้านสภาพภูมิอากาศทั้งในมิติของพื้นที่ และมิติของเวลา โดยเกษตรกรสามารถเข้าถึงข้อมูลเหล่านั้นในโลกดิจิทัล ผ่านสมาร์ทโฟน หรือ คอมพิวเตอร์ทั่วไป ซึ่งจะทำให้เกษตรกรสามารถใช้ข้อมูลต่างๆ เพื่อการทำเกษตรแบบที่มีภูมิต้านทานต่อสภาพภูมิอากาศ เกษตรกรจะรู้ข้อมูลทางด้านภูมิอากาศที่กำลังจะเกิดขึ้นในพื้นที่ตั้งของตนล่วงหน้า ทั้งในด้านมิติของพื้นที่ และ มิติของเวลา ช่วยให้เกษตรกรสามารถตัดสินใจในการดำเนินกิจกรรมต่างๆ อย่างเหมาะสม เมื่อเกษตรกรมีการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจสภาพล้อมรอบในแปลงเกษตรมากขึ้นเรื่อยๆ ทั่วประเทศไทย แล้วมีการแชร์ข้อมูลกัน จะทำให้ระบบมีข้อมูลมากขึ้น (Big Data) ซึ่งจะนำไปสู่การโมเดลสภาพการเพาะปลูกที่แม่นยำ สามารถขยายผลไปสู่การเพาะปลูกประเภทอื่นๆ ในที่สุด

นอกจากข้อมูลทางด้านสภาพแวดล้อมในฟาร์มแล้ว ข้อมูลด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวกับปัจจัยการเพาะปลูก ทรัพยากรต่าง ๆ ของฟาร์มก็สามารถนำเข้าสู่โลกดิจิทัลผ่านเซนเซอร์ไอโอทีชนิดต่าง ๆ ที่มีอยู่หลากหลาย รวมทั้งยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์และจักรกลอื่น ๆ เช่น โดรน รถแทรกเตอร์ เครื่องตัดหญ้า เป็นต้น จากการที่เทคโนโลยีคู่แฝดดิจิทัลนี้ มีความเป็น “แพลตฟอร์ม” เลยทำให้เราสามารถที่จะเพิ่มเติมเทคโนโลยีต่าง ๆ เข้าไปในอนาคต เมื่อเกิดความพร้อมทางด้านเทคโนโลยี หรือมีเงินทุน ยกตัวอย่าง สมมติฟาร์มแห่งหนึ่งที่เริ่มใช้คู่แฝดดิจิทัลของฟาร์ม โดยมีเซนเซอร์ตรวจวัดพืช ดิน สภาพแวดล้อมในไร่ มีระบบรดน้ำอัตโนมัติ เมื่อระบบเห็นว่าพืชกำลังต้องการน้ำและพยากรณ์บอกว่าฝนจะไม่ตก ก็สามารถสั่งรดน้ำอัตโนมัติเองได้ ในอนาคตหากเกษตรกรมีหุ่นยนต์พ่นยาอัตโนมัติเพิ่มเข้ามา ก็สามารถ plug-in เทคโนโลยีใหม่เข้ามาใน

ระบบได้เลย โดยข้อมูลหุ่นยนต์นั้นสามารถเข้าถึงข้อมูลต่าง ๆ ในโลกดิจิทัล เสมือนตัวมันเองกำลังท่องอยู่ในโลกดิจิทัลของฟาร์มนั้น นั่นเอง

3.1.2.2 สถาปัตยกรรมของระบบไร่กาแฟอัจฉริยะ

จากการลองพื้นที่สำรวจไร่กาแฟในพื้นที่ต่าง ๆ พบว่าเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในการสื่อสารระหว่างเซนเซอร์ไอโอทีกับเซิฟเวอร์ และผู้ใช้หรือเกษตรกร คือ เทคโนโลยี NB-IoT เนื่องจากมีสัญญาณครอบคลุมพื้นที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการส่งข้อมูลชนิดอื่น นอกจากนี้ NB-IoT ยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับความต้องการของการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ ดังตารางต่อไปนี้



ภาพที่ 78 แสดงข้อดีของเทคโนโลยี NB-IoT

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเทคโนโลย NB-IoT และ 4G กับความต้องการของอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอทีในโครงการ

ลำดับ	รายการ	เทคโนโลยี		ความต้องการของเทคโนโลยีเซนเซอร์ไอโอทีในโครงการ
		NB-IoT	4G	
1	ความครอบคลุมของเครือข่าย	ครอบคลุม	ครอบคลุม	ครอบคลุม
2	ต้นทุนของเทคโนโลยี	ต่ำ	สูง	ต่ำ

3	อัตราค่าบริการต่อปีต่ออุปกรณ์	ต่ำ	สูง	ต่ำ
4	อัตราการถ่ายโอนข้อมูล	ต่ำ	สูง	ต่ำ

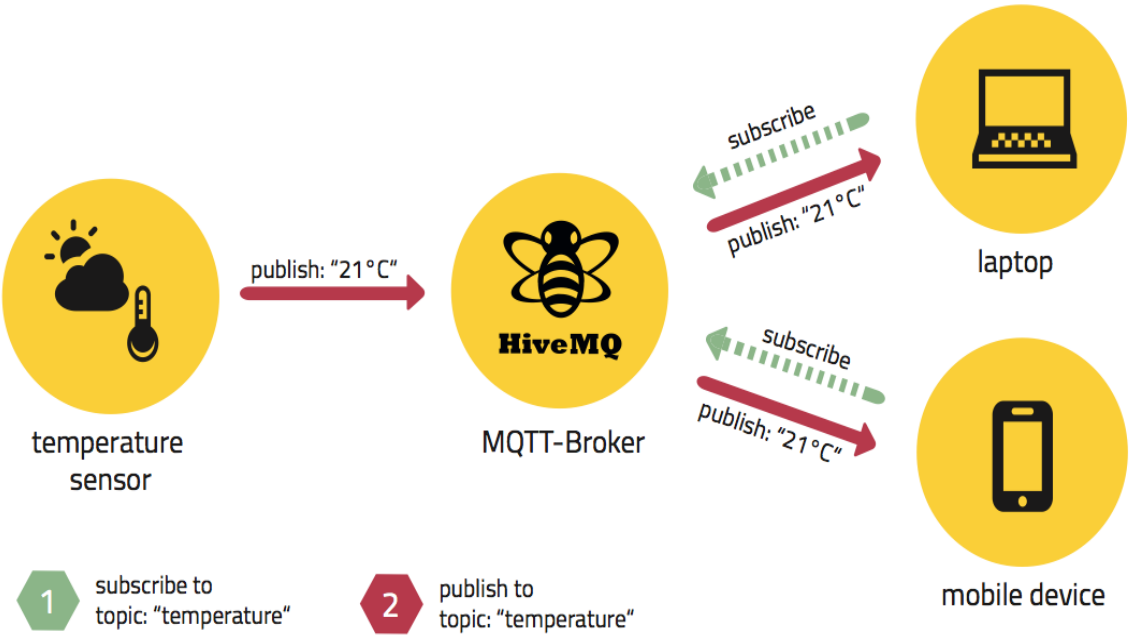
จากตารางจะเห็นว่าเทคโนโลยี NB-IoT สามารถตอบโจทย์ความต้องการของเทคโนโลยีเซนเซอร์ไอโอทีที่จะพัฒนาขึ้นในโครงการนี้ได้ ดังนั้น การออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบไร่กาแฟอัจฉริยะ จะออกแบบบนพื้นฐานของการใช้เทคโนโลยี NB-IoT โดยสถาปัตยกรรมของระบบสามารถแบ่งเป็นเลเยอร์ต่าง ๆ ได้ ดังนี้

1. End Device Layer เป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอทีสำหรับตรวจวัดข้อมูลต่าง ๆ ในไร่กาแฟ เพื่อส่งข้อมูลไปยังเซิฟเวอร์ หรือเรียกว่า End Node โดยในโครงการนี้ คือ เซนเซอร์ไอโอทีสำหรับเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมในไร่กาแฟ

2. Device Connectivity Layer คือ จุดต่อเชื่อมของ Node ต่าง ๆ ในโครงการ ทำหน้าที่เป็นทางเข้าสู่ระบบเครือข่ายต่าง ๆ บนอินเตอร์เน็ต สำหรับในโครงการนี้ Gateway คือ เสาส่งสัญญาณ NB-IoT ของบริษัทแอดวานซ์ ดาต้าเน็ตเวิร์ค คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด

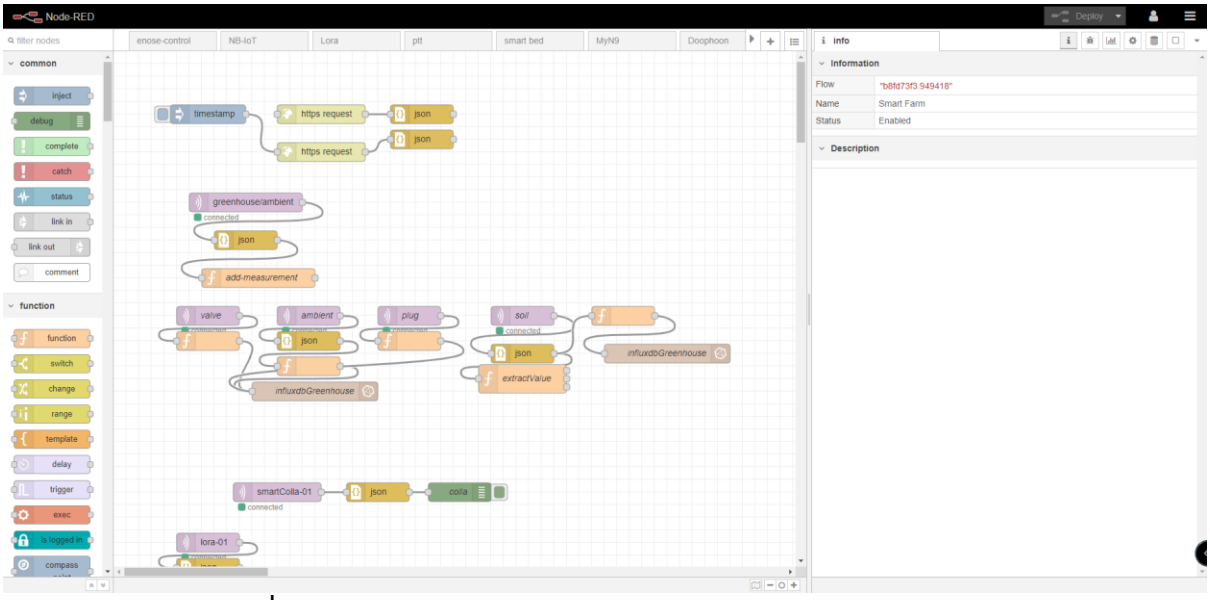
3. Device & Data Management Layer คือ ส่วนซอฟต์แวร์สำหรับบริหารจัดการข้อมูลต่าง ๆ ที่ส่งเข้ามายังเซิฟเวอร์ เป็นส่วนที่ถูกติดตั้งไว้บนคลาวด์เซิฟเวอร์จึงมีความเสถียรสูง และสามารถทำงานต่อเนื่องได้ตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งประกอบไปด้วย

1. MQTT Broker หรือ MQTT Server เป็นซอฟต์แวร์สำหรับรับข้อมูลจาก MQTT Client ที่ได้ publish เข้ามาและสามารถ publish ข้อมูลจาก MQTT Broker ไปยัง MQTT Client ที่ได้ Subscribe ข้อมูลไว้ได้ หากมองในมุมมองของ Internet of Things อุปกรณ์นี้อาจจะเป็น Cloud Server ของค่ายต่าง ๆ เช่น CloudMQTT, NETPIE, Azure, AWS เป็นต้น หรือใช้ Single Board Computer เช่น บอร์ด Raspberry Pi, LattePanda, Beagle Bone, nanoPi, อื่น ๆ แล้วติดตั้งซอฟต์แวร์เพิ่มเติมก็สามารถใช้งานได้เช่นกัน



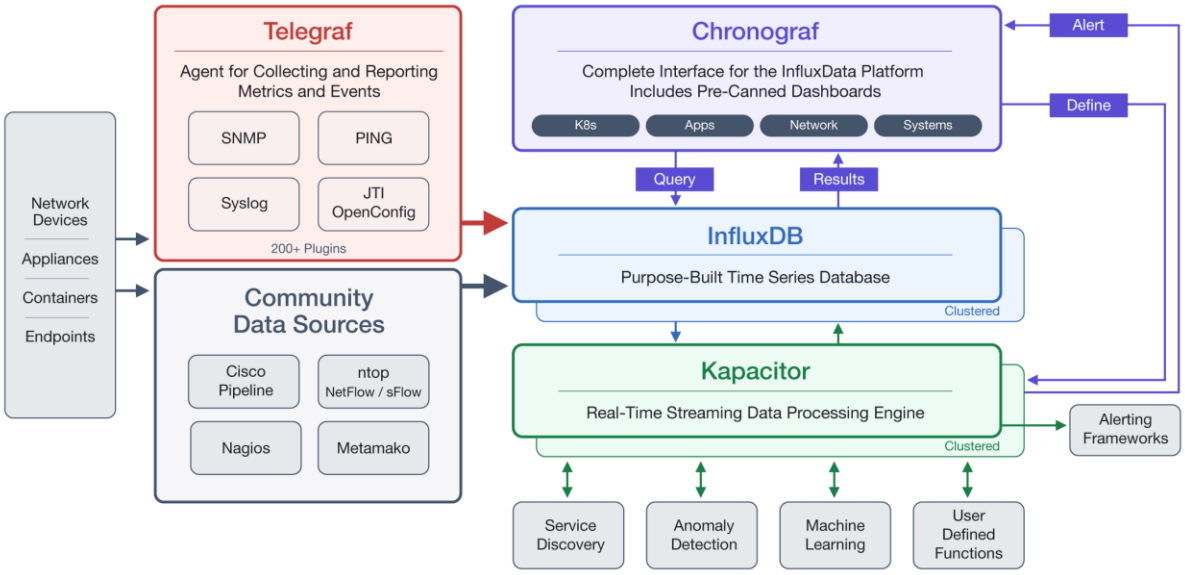
ภาพที่ 79 แสดงตัวอย่างการทำงานของ MQTT Broker

2. Node Red เป็นซอฟต์แวร์ Open Source ที่มีการทำงานแบบ Flow-based programing สำหรับใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ IoT ให้สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ฝั่งฮาร์ดแวร์ เข้ากับ APIs (Application Programing Interface) โดยมี User Interface ให้ใช้งานได้ผ่านทาง Web Browser ซึ่งข้อมูลสามารถเชื่อมโยงเข้าถึงกันได้ง่าย



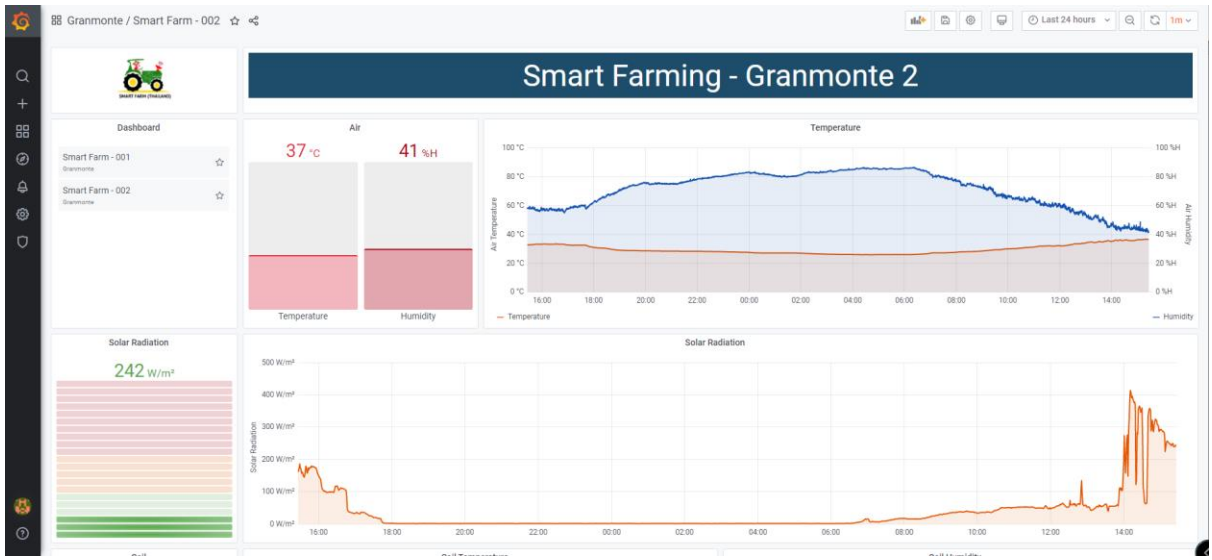
ภาพที่ 80 แสดงตัวอย่างการใช้งาน Node Red ผ่านทาง Web Browser

3. InfluxDB คือ การเก็บข้อมูลในรูปแบบของ time series metrics และ analytics database ซึ่งเขียนด้วยภาษา Go ซึ่งไม่ต้องการ external dependency อื่น ๆ เพิ่มเติม InfluxDB มี feature ที่สำคัญ ได้แก่ ใช้ภาษา SQL, มี HTTP(S) API, สามารถรองรับการจัดเก็บข้อมูลได้สูงถึงระดับพันล้านชุดข้อมูล

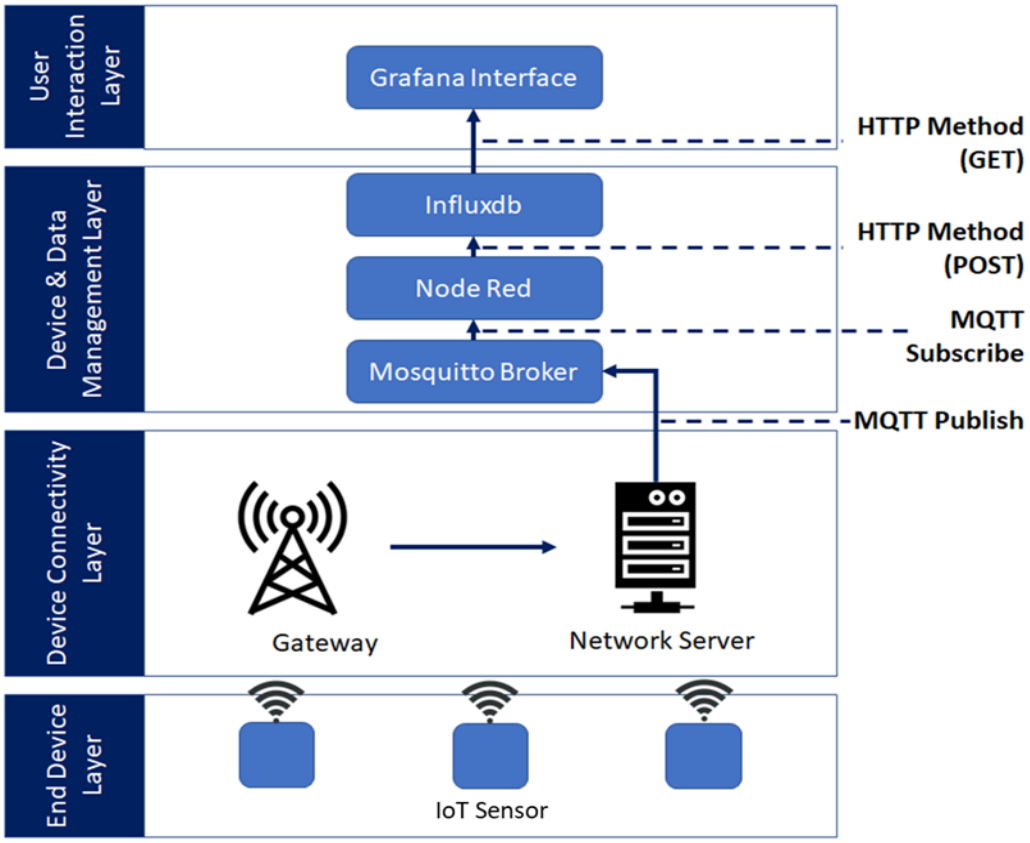


ภาพที่ 81 แสดงตัวอย่างโครงสร้างการทำงานของ InfluxDB

4. User Interaction Layer คือ ส่วนแสดงผลข้อมูลซึ่งพัฒนาขึ้นโดยใช้ซอฟต์แวร์ Grafana สามารถแสดงผลข้อมูลโดยการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูล InfluxDB มาแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น กราฟ ตาราง ตัวเลข เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ แบบเรียล-ไทม์



ภาพที่ 82 แสดงตัวอย่างของ User Interaction layer โดยใช้ซอฟต์แวร์ Grafana



ภาพที่ 83 แสดงสถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซนเซอร์ไอโอทีที่จะพัฒนาขึ้นในโครงการ

จากเนื้อหาที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น สามารถสรุปและอธิบายได้ด้วยแผนภาพแสดงสถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซนเซอร์ไอโอทีตามรูปด้านบนที่ประกอบไปด้วยการทำงานทั้งหมด 4 ขั้นเรียงลำดับจากด้านล่างขึ้นด้านบนตามลำดับ

3.1.3 รูปแบบเซนเซอร์ไอโอทีชนิดต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้น

3.1.3.1 ชนิดและคุณสมบัติของเซนเซอร์ตรวจวัดชนิดต่าง ๆ

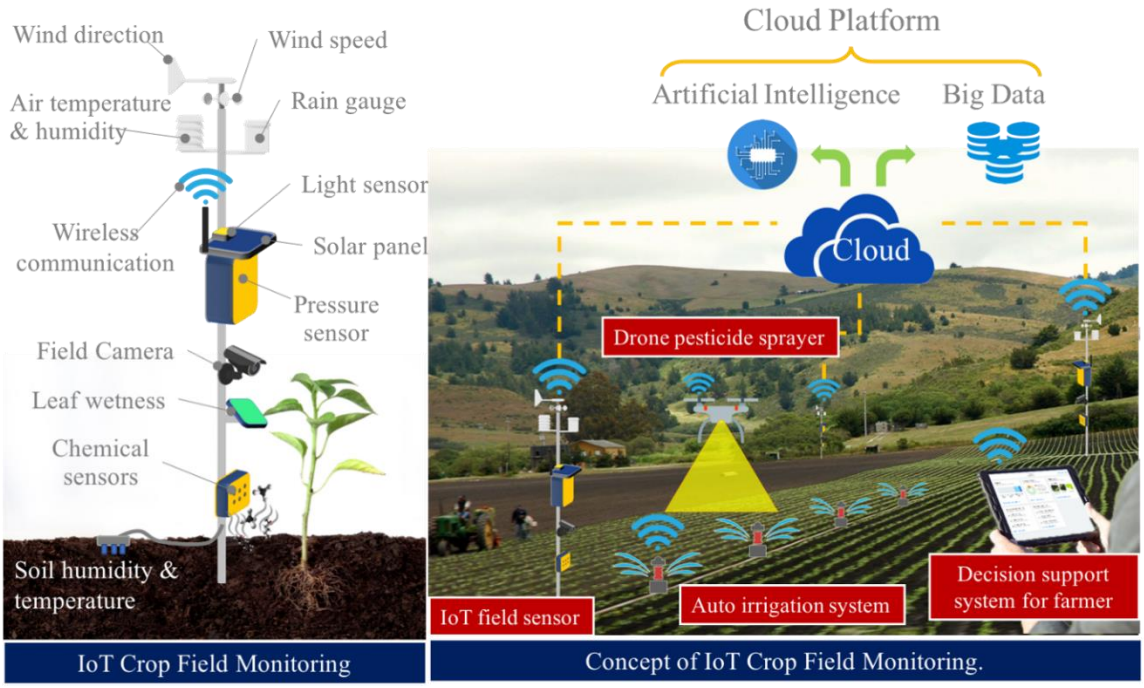
เซนเซอร์ไอโอทีที่พัฒนาขึ้นใช้สำหรับโครงการนี้ ประกอบด้วยโมดูลต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(1) Communication module เป็นโมดูลสำหรับใช้ในการสื่อสารระหว่างสถานีตรวจวัดกับฐานข้อมูลบนอินเทอร์เน็ต

(2) Environmental module เป็นโมดูลที่ประกอบไปด้วยเซนเซอร์ตรวจวัดสภาวะแวดล้อมภายในไร่ เช่น ข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ปริมาณแสงแดด การถ่ายเทอากาศภายในไร่ น้ำฝน เป็นต้น

(3) Soil module เป็นโมดูลสำหรับตรวจวัดสภาพดิน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความอุดมสมบูรณ์ของดิน (ในโครงการนี้ไม่มีการใช้งานเซนเซอร์ตรวจวัดความอุดมสมบูรณ์ของดิน)

(4) Crop module เป็นโมดูลตรวจวัดต้นพืช เช่น ความเปียกชื้นของใบ เป็นต้น



ภาพที่ 84 แสดงสถานีเซนเซอร์ไอโอทีที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อติดตั้งในไร่กาแฟ

ตารางที่ 8 แสดงคุณสมบัติของสถานีเซนเซอร์ไอโอที เพื่อตรวจวัดสภาพแวดล้อมในพื้นที่เพาะปลูก

ข้อมูลทั่วไป สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอที	
อุณหภูมิในการทำงาน	-40° ถึง +65°C
ระบบพลังงาน	ใช้พลังงานจากโซล่าเซลล์
Case	กล่องสแตนเลสกันสนิม และ UV
แบตเตอรี่	แบตเตอรี่ Lead-Acid ขนาด 12 โวลท์ อายุการใช้งานนาน 6 เดือน ถึง 1 ปี ขึ้นอยู่กับการบำรุงรักษา
การเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต	ผ่าน NB-IoT
ข้อมูลเซนเซอร์	
เซนเซอร์ความชื้นสัมพัทธ์	• Resolution 1% • Range 1 – 100 %RH • Accuracy +/- 2%
เซนเซอร์วัดปริมาณน้ำฝน	• Resolution 0.1 mm • Range 1 mm/hr – 762 mm/hr • Accuracy +/- 5%
เซนเซอร์วัดพลังงานแสงตกกระทบในไร่	• Resolution 5 W/m^2

	• Range 0 – 1,800 W/m^2 • Accuracy +/- 5%
เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ	• Resolution 0.1 °C • Range -40 to +65 °C • Accuracy +/- 0.5 °C
เซนเซอร์วัดทิศทางลม	• Resolution 22.5° • Range 0 - 360° • Accuracy +/- 3°
เซนเซอร์วัดความเร็วลม	• หน่วย 1 mph, 1 km/h, 1 m/s, or 1 knot (ผู้ใช้สามารถเลือกได้) • Range 0 to 322 km/h • Accuracy +/- 2.4 km/h
เซนเซอร์วัดอุณหภูมิในดิน	• Resolution 1°C • Range 0 - 100°C • Accuracy +/- 2°C
เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน	• Resolution 1 centibar • Range 0 – 200 centibar • Accuracy +/- 2%

3.1.3.2 การประกอบอุปกรณ์สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอที

การสร้างสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ จะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

1. การออกแบบสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม

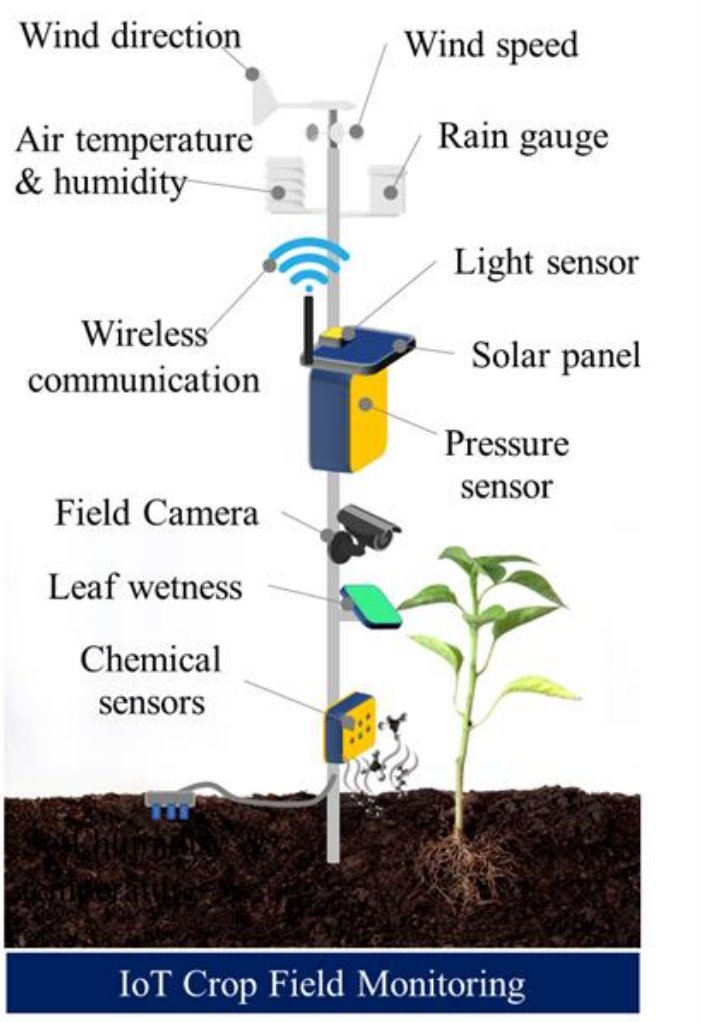
การออกแบบฮาร์ดแวร์เซนเซอร์ไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ ผู้พัฒนามีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาระบบเทคโนโลยีเซนเซอร์ไอโอทีที่สามารถตรวจวัด และแสดงผลข้อมูลให้กับเกษตกรได้ในแบบเรียล ไทม์ ผ่านทางเว็บไซต์หรือแอพพลิเคชันบนสมาร์ท โฟน โดยสถานีจะต้องสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ได้เองได้โดยไม่ต้องพึ่งพาการใช้ไฟฟ้า มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และสามารถทำงานได้ในทุกสภาพพื้นที่ สามารถติดตั้งและเคลื่อนย้ายได้สะดวก เกษตรกรสามารถดูแลและบำรุงรักษาได้ง่าย และมีอุปกรณ์สำรองสำหรับเปลี่ยนใน

กรณีที่มีการเสียหายในระยะยาวได้ โดยในส่วนของสถานีเซนเซอร์ตรวจวัด จะประกอบไปด้วยเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ สำหรับใช้ในการเก็บข้อมูลสภาพภูมิอากาศดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 9 แสดงข้อมูลเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งในสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศอัจฉริยะ

ลำดับ	เซนเซอร์	ประโยชน์ที่เกษตรกรได้รับ
	เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์	สภาพความชื้นในอากาศ ทำให้เฝ้าระวังเรื่องโรคได้ การติดตั้งสถานีเซนเซอร์ตามจุดต่าง ๆ ในไร่นา จะทำให้เห็นความแตกต่างของพื้นที่ เพื่อการเฝ้าระวังพื้นที่เป็นโซนได้
2	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศ	ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างกลางวันกับกลางคืน ทำให้ทราบความเครียดของพืช การติดตั้งสถานีเซนเซอร์ในพื้นที่ย่อย ๆ ทำให้ทราบว่า พื้นที่แต่ละจุดมีความแตกต่างด้าน microclimate อย่างไร เพื่อตัดสินใจดูแลให้แตกต่างกัน
3	เซนเซอร์วัดปริมาณน้ำฝนและอัตราน้ำฝน	สภาพของน้ำในฟาร์มเกษตร การเปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนที่ได้รับในแต่ละปี นำมาสู่การวางแผนจัดการน้ำ นอกจากนี้ ข้อมูลทำนายว่าฝนจะตกหรือไม่ในกี่ชั่วโมงข้างหน้า จะช่วยทำให้สามารถประหยัดน้ำได้ ไม่ต้องรดน้ำหากทราบว่าจะมีฝนตก รวมถึงการจัดการกิจกรรมต่างๆ ที่ไม่ควรทำ
4	เซนเซอร์วัดความเร็วและทิศทางลม	ในการเพาะปลูกพืชหลายชนิด ข้อมูลนี้มีความสำคัญมาก เช่น การจัดการความชื้นในไร่องุ่น การวางผังการเพาะปลูกตามทิศทางของลม การทำนายการแพร่ระบาดของแมลง
5	เซนเซอร์วัดพลังงานแสงตกกระทบในไร่	พลังงานที่ตกกระทบต้นพืช สามารถนำมาทำนายผลผลิตได้ เช่น การสุกขององุ่น การสุกของข้าวที่ไวต่อแสง เป็นต้น รวมไปถึงการทำนายอัตราการคายน้ำ และการบริหารจัดการการใช้น้ำในฟาร์ม
6	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิในดิน	มีประโยชน์ในการวิเคราะห์อัตราการระเหยของน้ำจากพื้นดิน และความเครียดของรากพืช

7	เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน	เพื่อบริหารจัดการในการให้น้ำ ควรจะรดน้ำหรือยัง หรือควรจะรอไปก่อนหากมีการทำนายว่าฝนจะตกในไม่ช้า ซึ่งเกษตรกรได้รับประโยชน์จากเซนเซอร์ส่วนนี้ค่อนข้างมากในการประหยัดน้ำและไฟ (ค่าสูบน้ำ)
8	เซนเซอร์ตรวจความกดอากาศ	มีประโยชน์ต่อเกษตรกรในการใช้ทำนายสภาพอากาศท้องถิ่นในเรื่องของโอกาสที่ฝนจะตก หรือเกิดพายุฝนฟ้าคะนอง



ภาพที่ 85 แสดงภาพส่วนประกอบของสถานีเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ

จากภาพแสดงตัวอย่างสถานีเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ โดยสถานีถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานได้โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยใช้ระบบโซล่าเซลล์ที่มีแบตเตอรี่สำรองในกรณีที่แสงอาทิตย์มีปริมาณน้อย โดยสามารถทำงานต่อเนื่องได้นาน 1 อาทิตย์ ตัวสถานีตรวจอากาศสามารถติดตั้งและเคลื่อนย้ายได้

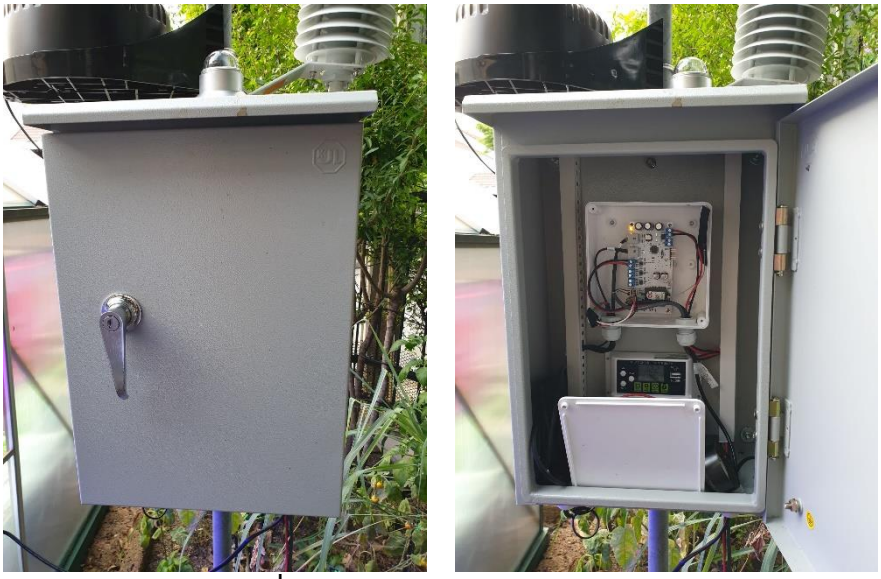
ง่าย เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ทำให้เกษตรกรสามารถเคลื่อนย้ายไปติดตั้งตามจุดต่าง ๆ ในไร่ได้ตามความต้องการ สถานีมีความทนทานต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถใช้งานได้ในทุกสภาพพื้นที่ เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ถูกติดตั้งไว้ในกล่องเหล็กกันน้ำอย่างดี ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องความชื้นหรือแมลงที่จะส่งผลกระทบต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของสถานี

2. การสร้างสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม

การสร้างสถานีเซนเซอร์ไอโอทีที่จะนำไปติดตั้งในพื้นที่ไร่กาแฟของโครงการ ออกแบบและสร้างโดยคณะวิจัยของโครงการ โดยมีรายละเอียดการสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

ภาพที่ 86 แสดงสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมจริงสำหรับที่จะนำไปติดตั้งในไร่กาแฟ

(1) ตัวสถานี ออกแบบโดยใช้ตู้ไฟอเนกประสงค์คุณภาพดี มีมาตรฐานในการป้องกันน้ำและฝุ่น 6X สามารถกันฝุ่น ละอองน้ำ และสามารถใช้งานกลางแจ้งได้ ภายในตู้จะเป็นที่สำหรับติดตั้งแผงวงจรหลักของสถานี ระบบควบคุมการชาร์จโซล่าเซลล์ และแบตเตอรี่สำรองของสถานี โดยแผงวงจรหลักจะถูกติดตั้งไว้ในกล่องพลาสติกอีกหนึ่งชั้นเพื่อป้องกันความชื้นที่อาจจะสามารถเข้ามาในตู้สถานีได้ อุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกจัดวางให้เป็นระเบียบเพื่อง่ายต่อการดูและบำรุงษาเบื้องต้นโดยเกษตรกรในระยะยาวต่อไป

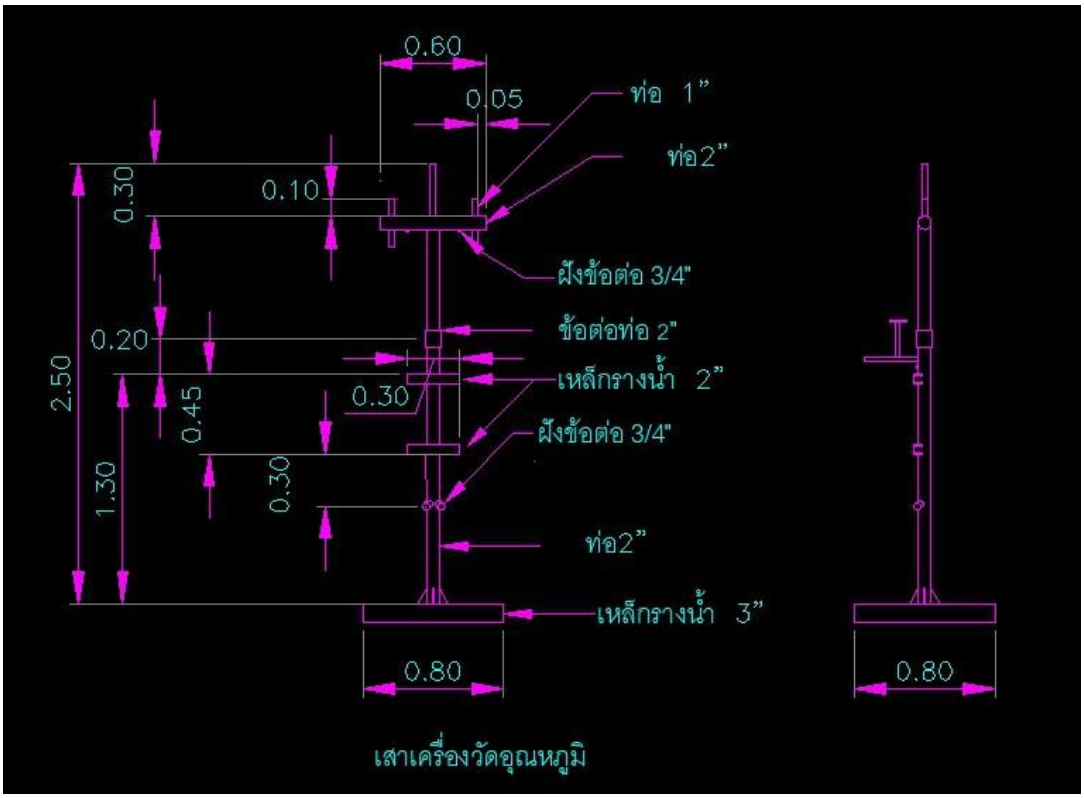


ภาพที่ 87 แสดงตู้สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม

(2) เซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะถูกติดตั้งบนเสาของสถานีบางส่วน และมีบางชนิดที่ติดตั้งไว้กับสถานี โดยเซนเซอร์ทุกชนิดที่ใช้ในโครงการนี้สามารถทำงานได้ทุกสภาพพื้นที่ รองรับการติดตั้งในพื้นที่โล่ง กลางแจ้ง สามารถป้องกันน้ำในกรณีที่ฝนตก และมีความทนทานแข็งแรงในระดับหนึ่ง ทำให้สามารถใช้งานได้ในระยะยาว และสามารถเปลี่ยนเซนเซอร์ในกรณีที่มีการชำรุด เสียหาย หรือการอ่านข้อมูลมีความผิดพลาดในอนาคต

ภาพที่ 88 แสดงเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม

(3) เสาสำหรับติดตั้งสถานี มีขนาดฐาน 0.8x0.8 เซนติเมตร และมีความสูง 2.5 เมตร ทำจากเหล็กกัลวาไนซ์และทาสีเคลือบกันสนิม โครงสร้างของเสาออกแบบให้สามารถติดตั้งสถานี และเซนเซอร์ต่าง ๆ ได้ง่าย สามารถถอดประกอบ และเคลื่อนย้ายได้สะดวก เหมาะสำหรับการติดตั้งในพื้นที่ไร่กาแฟบนดอยต่าง ๆ



ภาพที่ 89 แสดงภาพโครงร่างวิศวกรรมของเสาสำหรับติดตั้งสถานี

3. การทดสอบสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในพื้นที่จำลอง

สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมหลังจากสร้างเสร็จแล้วจะถูกทดสอบในพื้นที่จำลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพ ปัญหาในการใช้งานก่อนนำไปติดตั้ง และใช้งานในพื้นที่จริงที่ไร่กาแฟเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 เดือน โดยเซนเซอร์ทุกชนิดจะถูกติดตั้ง และตรวจสอบการทำงานจริงเพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลต่าง ๆ ที่เซนเซอร์อ่านค่าได้มีความถูกต้องเทียบกับเซนเซอร์และอุปกรณ์มาตรฐาน ดังแสดงในภาพที่ 90 ในกรณีที่พบว่าเซนเซอร์ไหนมีการอ่านข้อมูลที่ผิดพลาดไปจากเซนเซอร์มาตรฐาน จะมีการศึกษาสาเหตุของความผิดพลาด และหาวิธีแก้ไข เช่น การสร้างสมการ calibration สำหรับเซนเซอร์บางชนิดที่อ่านค่าได้ไม่ตรงกับเซนเซอร์มาตรฐาน แต่มีแนวโน้มของข้อมูลไปในทิศทางเดียวกัน เป็นต้น

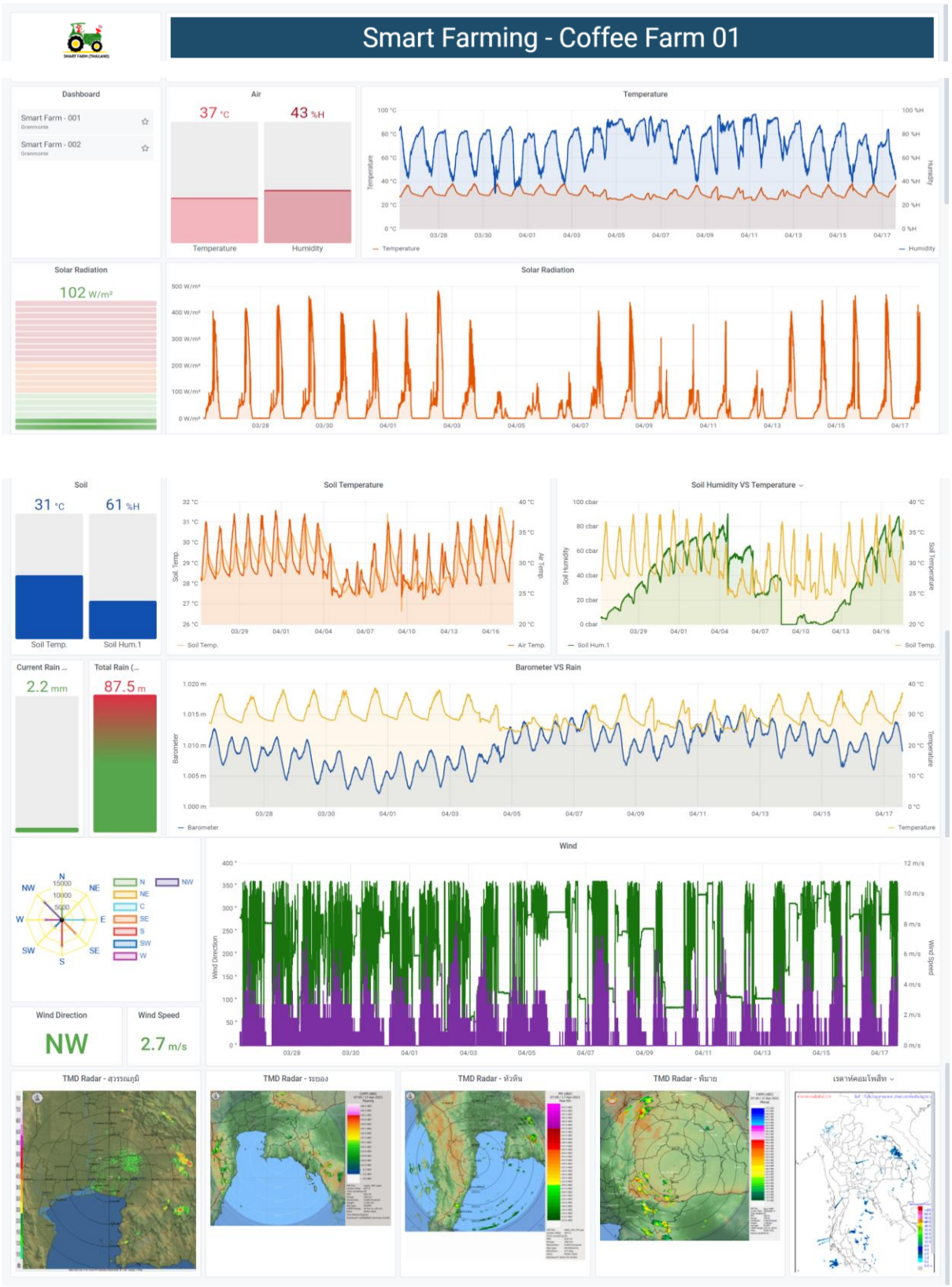
ภาพที่ 90 แสดงการติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการ

3.1.3.3 ผลการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ

จากการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ในพื้นที่ทดสอบของโครงการต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 1 เดือนพบว่า อุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การส่งข้อมูลของสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมผ่านเครือข่าย NB-IoT ไปยังเซิฟเวอร์ของโครงการมีความเสถียรสูง ไม่พบการหยุดทำงานของสถานี โดยสามารถสรุปข้อมูลผลการทดสอบเป็นตารางได้ ดังนี้

ตารางที่ 10 แสดงผลการทดสอบการทำงานของสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการ

รายละเอียดการทดสอบ	ผลการทดสอบสถานีที่ 1	ผลการทดสอบสถานีที่ 2
1. การทำงานของอุปกรณ์ตลอด 24 ชั่วโมง	ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ไม่พบการหยุดทำงานของสถานี	ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ไม่พบการหยุดทำงานของสถานี
2. เครือข่าย NB-IoT	มีความเสถียร ไม่พบการหยุดส่งข้อมูล	มีความเสถียร ไม่พบการหยุดส่งข้อมูล
3. เซนเซอร์ชนิดต่างๆ	ทำงานได้ต่อเนื่อง และอ่านข้อมูลได้ถูกต้องเทียบกับเซนเซอร์มาตรฐาน	ทำงานได้ต่อเนื่อง และอ่านข้อมูลได้ถูกต้องเทียบกับเซนเซอร์มาตรฐาน
4. ระบบแบตเตอรี่สำรอง และโซล่าเซลล์	ทำงานได้ต่อเนื่อง	ทำงานได้ต่อเนื่อง
5. ความชื้นในกล่องสถานี	ความชื้นต่ำ ไม่พบสนิม การกัดกร่อนหรือตะกรันที่แผงวงจร	ความชื้นต่ำ ไม่พบสนิม การกัดกร่อนหรือตะกรันที่แผงวงจร
6. ข้อมูลสภาพอากาศ	มีความถูกต้องสอดคล้องกับเซนเซอร์มาตรฐาน	มีความถูกต้องสอดคล้องกับเซนเซอร์มาตรฐาน
7. ข้อมูลสภาพดิน	มีความถูกต้องสอดคล้องกับเซนเซอร์มาตรฐาน	มีความถูกต้องสอดคล้องกับเซนเซอร์มาตรฐาน
8. เซิฟเวอร์ของโครงการ	มีความเสถียร สามารถรองรับข้อมูลที่ส่งเข้ามาต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ไม่พบการหยุดทำงานของระบบ	มีความเสถียร สามารถรองรับข้อมูลที่ส่งเข้ามาต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ไม่พบการหยุดทำงานของระบบ



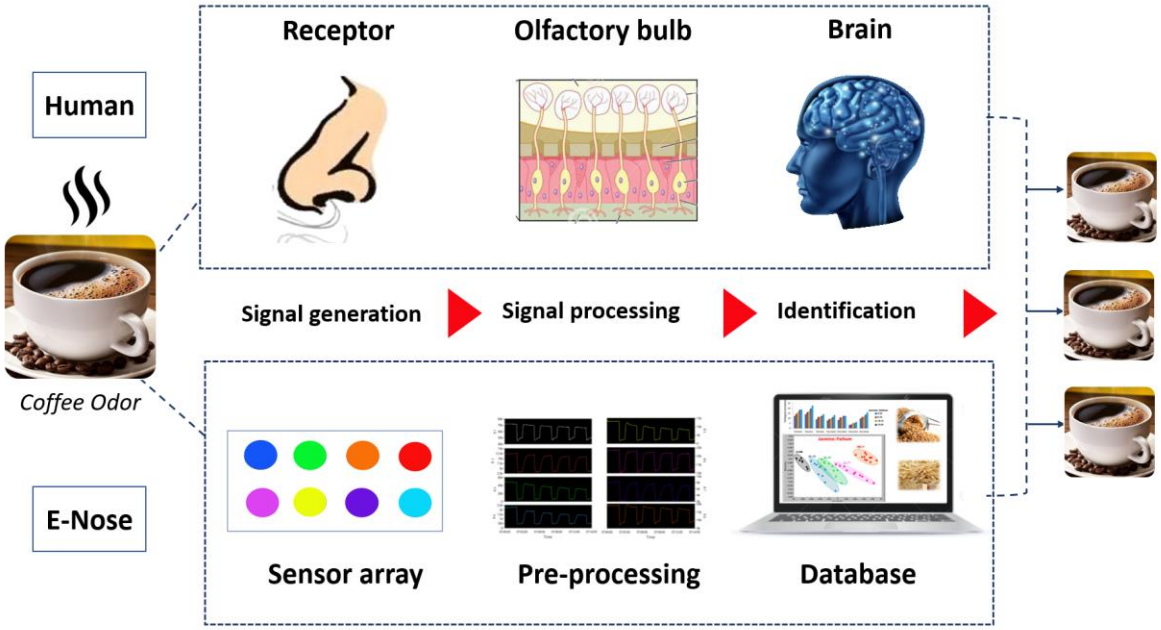
ภาพที่ 91 แสดงข้อมูลที่ได้จาการทดสอบสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมตลอดระยะเวลา 1 เดือน

จากภาพจะเห็นว่าสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมที่พัฒนาขึ้นในโครงการสามารถเก็บข้อมูลสภาพอากาศและสภาพดินในพื้นที่ทดสอบต่อเนื่องได้อย่างสมบูรณ์แบบ ข้อมูลเหล่านี้ทำให้จะทำให้เกษตรกรมองเห็นภาพรวมของสภาพอากาศในพื้นที่ปลูกกาแฟในช่วงดือนต่างๆ ตลอดทั้งปี และสามารถนำข้อมูลมาสร้างโมเดลผลกระทบของสภาพอากาศต่อปริมาณผลผลิตของกาแฟ รสชาติของกาแฟ และโรคที่เกิดขึ้นในกาแฟได้ในอนาคต

3.2 หลักการและผลงานศึกษาเบื้องต้นของกลิ่นกาแฟ ด้วยเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์

3.2.1 ทฤษฎีและหลักการของเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดกลิ่นที่เลียนแบบการดมกลิ่นของจมูกมนุษย์โดยจะเปลี่ยนข้อมูลกลิ่นให้เป็นข้อมูลดิจิทัล (Digitization of Smell) ทำให้เราสามารถวิเคราะห์ ประเมินคุณลักษณะของกลิ่น รวมถึงจำแนกแยกแยะกลิ่นได้ จมูกอิเล็กทรอนิกส์อาศัยหลักการทำงานของเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซหรือโมเลกุลกลิ่นหลายเซนเซอร์ร่วมกันในรูปแบบของอะเรย์ (Sensor Array) โดยการประมวลผลสัญญาณจดจำรูปแบบ วิเคราะห์และจำแนกกลิ่นด้วยหลักการของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence)



ภาพที่ 92 แสดงหลักการทำงานของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ เทียบกับกลไกการรับกลิ่นของมนุษย์

การรับกลิ่นในมนุษย์เกิดจากการทำงานที่สัมพันธ์กันระหว่างจมูกกับสมองส่วนหน้าบริเวณที่เรียกว่าออลแฟกทอรี่บัลบ์ (Olfactory Bulb) ซึ่งทำหน้าที่ส่งสัญญาณไปยังสมองส่วนซีรีบรัมเพื่อแปลข้อมูลว่าเป็นกลิ่นของอะไร การได้กลิ่นเกิดจากการหายใจนำโมเลกุลกลิ่นเข้าไปสัมผัสกับเซลล์ประสาทรับกลิ่น (Olfactory Receptor Cell) ซึ่งอยู่บริเวณเพดานภายในช่องจมูก สัญญาณที่ได้จากการทำอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกลิ่นและ

ตัวจับกลิ่น (Olfactory Receptors) จะถูกส่งไปยัง Olfactory Bulb และส่งไปที่สมอง สมองจะทำหน้าที่ในการประมวลผลให้สอดคล้องกับฐานข้อมูลเดิมที่สมองเคยจดจำไว้

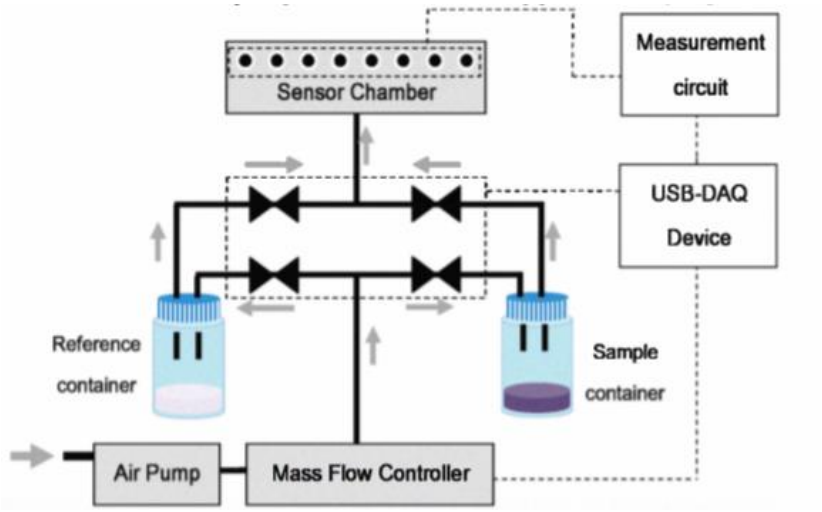
ระบบรับรู้กลิ่นของมนุษย์ประกอบด้วย

1. ส่วนรับกลิ่น ซึ่งรวมถึงตัวรับกลิ่นและระบบนำกลิ่นเข้ามา
2. ระบบนำสัญญาณประสาท ซึ่งรวมถึงระบบส่งและขยายสัญญาณ
3. ระบบประมวลผล ซึ่งจะสามารถแยกแยะและจดจำกลิ่นได้

จมูกอิเล็กทรอนิกส์มีหลักการทำงานคล้ายกับจมูกมนุษย์ โดยเซนเซอร์อะเรย์ (Sensor Array) เปรียบเสมือน Olfactory Receptors ของจมูกมนุษย์ในการจับกับโมเลกุลกลิ่น เซนเซอร์จะมีความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไปเมื่อทำอันตรกิริยากับไอระเหยโมเลกุลกลิ่น โดยเซนเซอร์แต่ละตัวจะมีความไวต่อสารเคมีระเหยแต่ละชนิดแตกต่างกัน สัญญาณจากเซนเซอร์จะถูกนำมารวบรวมและแปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นดิจิทัล จากนั้นจะส่งสัญญาณดิจิทัลผ่านยังหน่วยประมวลผลเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และใช้หลักการทางสถิติ หรือหลักการฟิสิกส์ ซึ่งได้แก่ วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis :PCA) เพื่อใช้ในการจดจำรูปแบบของกลิ่นและจำแนกกลิ่น รวมถึงการวิเคราะห์ระดับความเข้มของกลิ่น

จมูกอิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะที่เลียนแบบระบบรับรู้กลิ่นของมนุษย์ดังนี้

1. **ส่วนรับกลิ่น** ประกอบไปด้วยเซนเซอร์รับกลิ่นจำนวนมาก ตั้งแต่ 4 ตัวไปจนถึงนับพันตัว และระบบนำกลิ่นเข้ามา (มอเตอร์ดูดอากาศ ท่อรวบรวมกลิ่น)
2. **ส่วนรวบรวมสัญญาณ** ซึ่งจะทำการแปรสัญญาณจากเซนเซอร์ (Transducing) และจัดการสัญญาณ (Signal Conditioning) เช่น ลดสัญญาณรบกวน จากนั้นจะแปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D Converter)
3. **ส่วนประมวลผล** ซึ่งจะนำสัญญาณที่ได้รับมาเปรียบเทียบเชิงสถิติกับฐานข้อมูลที่มีอยู่เดิม และอาจจะใช้วิธีการระบบประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) เพื่อทำการแยกแยะกลิ่น รวมไปถึงการเรียนรู้และจดจำรูปแบบของกลิ่น



ภาพที่ 93 แสดงองค์ประกอบของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose)

จมูกอิเล็กทรอนิกส์จะตอบสนองต่อกลิ่น และแปลผลของกลิ่นนั้นออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ผลการตรวจวัดด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ 3 วิธีดังนี้

(1) อัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์รายหัวต่อกลิ่นของสถานที่นั้น ๆ (Sensor Response)

(2) การวิเคราะห์ความแตกต่างของคุณลักษณะของกลิ่นแต่ละสถานที่ด้วยวิธี Principal Component Analysis (PCA)

(3) การจับคู่คุณลักษณะของกลิ่นแต่ละสถานที่ด้วยวิธี Cluster Analysis (CA)

โดยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตรวจวัดนี้ มีรายละเอียดของก๊าซเซนเซอร์ที่ใช้ดังนี้

ตารางที่ 11 แสดงข้อมูลเบื้องต้นของก๊าซเซนเซอร์แต่ละชนิดในเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

ลำดับ	ชนิดของเซนเซอร์
1	Combustible Gases
2	Ammonia (Low concentration)
3	Organic Solvent Vapor
4	Air Contaminant 2
5	Iso-Butane, Ammonia, Ethanol
6	Methyl mercaptan and Trimethyl amine
7	LP Gas
8	Solvent Vapor

โดยทั่วไปแล้วการทดสอบอัตราการตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละตัว จะใช้ผลต่างของความต้านทานของเซนเซอร์แต่ละหัวที่ทำปฏิกิริยากับกลิ่นและความต้านทานของเซนเซอร์ในสภาวะอากาศบริสุทธิ์ตาม สมการที่ (1)

$$R_{\%change} = \frac{(R_0 - R)}{R_0} \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่ $R_{\%change}$ คือ อัตราการตอบสนองของเซนเซอร์

R_0 คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ขณะวัดกลิ่น Reference

R คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ขณะวัดกลิ่น Sample

เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของจมูกมนุษย์ เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้เที่ยงตรงโดยไม่แปรผันไปตามอารมณ์และสภาพแวดล้อมเหมือนกันมนุษย์ เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแสดงผลในรูปแบบของแผนที่กลิ่น (Aromagram) ที่สามารถเข้าใจได้ง่าย หรือแสดงผลในรูปของกราฟที่บอกความเข้มข้นของกลิ่นชนิดต่าง ๆ ที่เป็นเป้าหมายในการตรวจวัด ทำให้ผู้ใช้งานและผู้เกี่ยวข้องยอมรับผลการตรวจวัดแบบฉันทามติ ทั้งนี้จมูกอิเล็กทรอนิกส์มีความไวในการตรวจวัด (1-5 นาที) อีกทั้งอุปกรณ์สามารถพัฒนาขึ้นมาในรูปแบบที่พกพาหรือเคลื่อนย้ายได้ ทำให้เหมาะกับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ด้านการเกษตร และสิ่งแวดล้อม ฯลฯ

3.2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกลิ่น และเรื่องของกลิ่นกาแฟ

1) กลิ่น และรสชาติของกาแฟ

เมล็ดกาแฟสดที่ได้จากต้นจะมีกลิ่นเหม็นเขียว ซึ่งกลิ่นและสีของเมล็ดกาแฟที่แท้จริงจะเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการคั่วเมล็ดกาแฟ โดยทั่วไปจะคั่วเมล็ดกาแฟที่อุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส และใช้เวลาคั่วประมาณ 6-10 นาที ทั้งนี้อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการคั่วอาจขึ้นอยู่กับผู้ผลิต กลิ่นหอมของกาแฟที่ผ่านการคั่วเกิดจากน้ำมันกาแฟ ซึ่งมีปริมาณร้อยละ 10 และมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักของสารประกอบระเหย กลิ่นและรสชาติของกาแฟประกอบด้วยสารประกอบที่ระเหยได้ (soluble) ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นและสารประกอบที่ระเหยไม่ได้ (insoluble) ซึ่งเป็นสารที่ให้รสชาติเฉพาะ (รสขม และรสเปรี้ยว)

โดยทั่วไปกาแฟจะมีกลิ่นและรสชาติที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ สภาพแวดล้อมในการปลูก การแปรรูป ฯลฯ และเนื่องจากเมล็ดกาแฟนั้นมีองค์ประกอบที่เป็นทั้งน้ำตาล แป้ง โปรตีน และสารเคมีหลายชนิด เมื่อนำเมล็ดกาแฟไปคั่วจะเกิดปฏิกิริยาหลายรูปแบบ เช่น Mailard Reaction, Reducing Sugar, Strecker Degration, Caramelization, Carbonization จึงทำให้กาแฟที่ได้มีกลิ่นและรสชาติที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์และอธิบายกลิ่นและรสชาติกาแฟ ที่เรียกว่า **วงล้อกลิ่นและรสชาติกาแฟ** (Coffee Taster's Flavor Wheel) โดยสมาคมกาแฟพิเศษ (Specialty Coffee Association) หรือ SCA ร่วมกับองค์กรวิจัยกาแฟโลก (World Coffee Research) เพื่อใช้ในการบัญญัติรสชาติของกาแฟในระดับสากล

ภาพที่ 94 แสดงวงล้อกลิ่นและรสชาติกาแฟ (Coffee Taster's Flavor Wheel)

ที่มา: Specialty Coffee Association of America (scaa.org)

โดยวงล้อกลิ่นและรสชาติจะมีลักษณะเป็นวงล้อ 3 ชั้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ ดังนี้

1) วงใน (วงหลัก) 9 ช่อง เป็นการแบ่งกลุ่มกลิ่นที่กว้างที่สุด เช่น กลิ่นผลไม้ กลิ่นผัก กลิ่นดอกไม้ กลุ่มเปรี้ยวและหมัก กลุ่มความหวานม กลุ่มเผ็ดร้อน
2) วงกลาง จะบ่งบอกลักษณะของกลิ่นที่แคบลงมา เช่น ผลไม้สุก ผลไม้เปรี้ยว ผลไม้แห้ง
3) วงนอก เป็นการวิเคราะห์กลิ่นแบบบ่งชี้ชัดเจน เช่น กลิ่นสตอเบอร์รี่ บลูเบอร์รี่ ราสเบอร์รี่

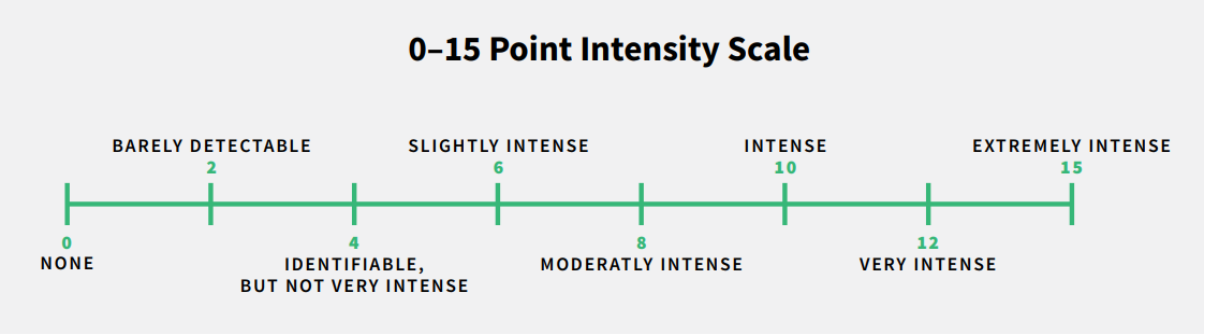
การดมกลิ่นกาแฟ

การทดสอบดมกลิ่นกาแฟมี 2 แบบ คือ ดมกลิ่นกาแฟบด Fragrance และดมกลิ่นน้ำกาแฟ Aroma โดยใช้จมูกมนุษย์รับกลิ่น และส่งข้อมูลสู่สมองของเรา

ภาพที่ 95 แสดงการทดสอบดมกลิ่นกาแฟด้วยจมูกมนุษย์

คะแนนความเข้มข้น (Intensity Score)

คะแนนความเข้มข้น (Intensity Score) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดผลของ “World Coffee Research Sensory Lexicon” เพื่อบอกคุณลักษณะของกลิ่นหรือรสชาติในตัวอย่างกาแฟ โดยผู้ประเมินจะให้คะแนนความเข้มข้นในระดับ 1 ถึง 15 และระบุว่าเป็นการอ้างอิงกลิ่นหรือรสชาติของกาแฟ โดยคะแนนความเข้มข้น (Intensity Score) จะช่วยให้ผู้ประเมินสามารถเปรียบเทียบความแรงของกลิ่นตัวอย่างต่อกลิ่นที่ใช้ในการอ้างอิง และสามารถกำหนดคะแนนที่เหมาะสมให้กับกลุ่มตัวอย่างได้



ภาพที่ 96 แสดงระดับคะแนนความเข้มข้น (Intensity Score) ของกาแฟ

ขั้นตอนการประเมิน

- ก่อนทำการประเมิน ผู้ประเมิน (Panellist) ต้องทำการสอบเทียบกลิ่นกาแฟตัวอย่าง
- ผู้ประเมิน (Panellist) จัดเตรียมตัวอย่างอ้างอิง (Reference) สำหรับคุณลักษณะของกาแฟที่ระบุโดยทำตามคำแนะนำในการเตรียมที่ระบุไว้ใน Lexicon
- ผู้ประเมิน (Panellist) ชงกาแฟคั่วบดโดยใช้วิธีการชงที่กำหนดไว้ และเก็บกาแฟไว้ในภาชนะที่เก็บความร้อนจนกว่าผู้ประเมินจะพร้อมสำหรับการประเมิน
- ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ผู้ประเมินจะดมกลิ่นอ้างอิงและรสชาติอ้างอิง (Reference) ที่ก่อน จากนั้นจึงดมกลิ่นหรือลิ้มรสตัวอย่างกาแฟเพื่อเปรียบเทียบกับกลิ่นหรือรสชาติของข้อมูลอ้างอิง
- ผู้ประเมินกำหนดคะแนนความเข้มข้นของแต่ละตัวอย่างกาแฟ

2) องค์ประกอบทางเคมีในเมล็ดกาแฟดิบ

ในเมล็ดกาแฟดิบและกาแฟคั่วจะมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ เมล็ดกาแฟดิบจะมีสารประกอบดังนี้

1. คาร์โบไฮเดรต

ในเมล็ดกาแฟที่ยังไม่ผ่านกระบวนการคั่วจะพบคาร์โบไฮเดรตในรูปของน้ำตาลอิสระ และโพรีแซคคาไรด์ โดยน้ำตาลอิสระส่วนมากเป็นน้ำตาลซูโครส ปริมาณน้ำตาลซูโครสจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ และระดับความแก่ของเมล็ดกาแฟ โดยในอะราบิกาพบร้อยละ 6.0-8.0 ส่วนในโรบัสตาพบร้อยละ 4.0 โดยน้ำหนักแห้ง ส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้เกิดกลิ่นรส และเกิดสีระหว่างกระบวนการคั่ว คือ น้ำตาลรีดิวซ์ เช่น arabinose galactose raffinose rhamnose ribose fructose และ glucose (Varnam and Sutherand, 1994)

2. สารประกอบไนโตรเจน

คาเฟอีน (Caffeine)

คาเฟอีนเป็นสารที่ไม่มีกลิ่น มีรสขม ปริมาณคาเฟอีนในเมล็ดกาแฟจะขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ เช่น สายพันธุ์อะราบิกาพบคาเฟอีนเฉลี่ยร้อยละ 1.2 ส่วนสายพันธุ์โรบัสตาพบร้อยละ 2.2

โปรตีนและกรดอะมิโน *(Protein and Amino Acids)*

ในเมล็ดกาแฟดิบจะพบปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนร้อยละ 14 เมื่อได้รับความร้อน โปรตีนจะเปลี่ยนแปลงทั้งชนิดและโครงสร้าง โดยการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับการสูญเสียน้ำในระหว่างการคั่ว

3. ไขมัน (Lipid)

องค์ประกอบของไขมันในเมล็ดกาแฟที่ยังไม่ผ่านกระบวนการคั่วประกอบด้วยน้ำมันกาแฟ (Coffee Oil) ซึ่งพบที่ผิวชั้นนอกของเมล็ดกาแฟ โดยพบในกาแฟสายพันธุ์อะราบิการ้อยละ 16 ของน้ำหนักแห้ง ส่วนกาแฟโรบัสตาพบไขมันร้อยละ 10 ของน้ำหนักแห้ง (Farah, 2009)

4. กรดอินทรีย์

ในเมล็ดกาแฟมีกรดอยู่หลายชนิด ได้แก่ กลุ่ม Aliphatic, Alicyclic, Carboxylic และ Phenolic Acids ขณะทำการเก็บรักษาเมล็ดกาแฟ ความเป็นกรดจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากเอนไซม์จะย่อยสลายไขมันให้เกิดเป็นกรดไขมันอิสระ (Varnam and Sutherand, 1994)

ในกาแฟอะราบิกาที่คั่วแบบอ่อนจะมีปริมาณกรดทั้งหมดร้อยละ 1.58 เมื่อผ่านกระบวนการคั่วแบบกลางจะมีปริมาณกรดร้อยละ 0.99 และเมื่อผ่านการคั่วแบบเข้มปริมาณกรดทั้งหมดจะเหลือเพียงร้อยละ 0.71 เท่านั้น โดยมีกรดที่สำคัญ คือ กรดซิตริก กรดมาลิก กรดแลคติก กรดไพรูวิก และกรดอะซิติก (Clarke, 1986) โดยโมเลกุลของกรดที่อยู่ในรูปที่ไม่แตกตัว (undissociated acids) จะมีอิทธิพลในการควบคุมการเกิดกลิ่นรสที่ดีในกาแฟ (Clarke and Macrae, 1985) องค์ประกอบของสารที่อยู่ในเมล็ดกาแฟดิบ และในกาแฟคั่วจะแตกต่างกันในเชิงชนิดและปริมาณ

ตารางที่ 12 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟดิบส่วนที่ไม่ระเหย (Farah, 2009)

	ปริมาณ* (g/100g Dry Basis), โดยน้ำหนักแห้ง	
Component	**Arabica**	**Robusta**
Carbohydrates and Fibers		
Sucrose	6.0-8.0	4.0
Reducing sugars	0.1	0.4
Polysaccharides (arabinogalactan, mannan and glucan)	34-44	48-55
Lignin	3.0	3.0
Pectins	2.0	2.0

Nitrogenous Compounds		
Protein	10.0-11.0	11.0-15.0
Free amino acids	0.5	0.8
Caffeine	0.9-1.2	1.5-2.5
Trigonelline	0.8-2.0	0.6-0.7
Lipids		
Coffee oil (triglycerides with unsaponifiables)	16.0	10.0
Diterpene esters	0.9	0.2
Minerals (41% K and 4% P)	3.0-4.2	4.4-4.5
Acids and Esters		
Total chlorogenic acids	4.1-7.9	6.1-11.3
Aliphatic acids	1.0	1.0
Quinic acid	0.4	0.4

*ปริมาณอาจแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์ สภาพอากาศในการเพาะปลูก ดิน วิธีการวิเคราะห์ ฯลฯ

ตารางที่ 13 แสดงกลุ่มของสารระเหยที่ส่งผลต่อกลิ่นของกาแฟคั่วบด (Mello and Trugo, 2003)

Volatile Group	**Precursors**	**Example**
Pyrroles and alkyl pyrroles	• Amino acids + carbohydrates • Hydroxy-amino acids	N-methylpyrrole
Furanones	• Sucrose	Dihydro-2-methyl-3(2H)-furanone
Furaldehydes	• Sucrose • Arabinogalactans	2-Furaldehyde
Alkyl furans	• Arabinogalactans • Amino acids + carbohydrates	5-Methyl-2-vinyl furan
Pyrazines and alkyl pyrazines	• Hydroxy-amino acids	Methylpyrazine

Acyl pyrroles	• Amino acids + carbohydrates	2-Acetyl-1-methylpyrrole
Carbocyclic compounds	• Sucrose	3-Methyl-1,2-cyclopentanedione (Cicloteno)
Pyridines	• Trigonelline • Hydroxy-amino acids	Pyridine
Phenols	• Chlorogenic acid	Phenol

ตารางที่ 14 แสดงกลุ่มของสารระเหยที่มีลักษณะกลิ่นคล้ายกัน: ความเข้มข้นในกาแฟอะราบิกาคั่วกลางจากประเทศโคลอมเบีย (Grosch, 2001)

Group/Odorant	**Concentration (mg/kg)**	
	Mean	**Variation***
Sweetish/Caramel Group		
Methylpropanal	28.2	24.0-32.3
2-Methylbutanal	23.4	20.7-26.0
3-Methylbutanal	17.8	17.0-18.6
2,3-Butanedione	49.4	48.4-50.8
2,3-Pentanedione	36.2	34.0-39.6
4-Hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanone	120	112-140
5-Ethyl-4-hydroxy-2-methyl-3(2H)-furanone	16.7	16.0-17.3
Vanillin	4.1	24.0-32.3
Earthy Group		
2-Ethyl-3,5-dimethylpyrazine	0.326	0.249-0.400
2-Ethenyl-3,5-dimethylpyrazine	0.053	0.052-0.053
2,3-Diethyl-5-methylpyrazine	0.090	0.073-0.100
2-Ethenyl-3-ethyl-5-methylpyrazine	0.017	0.015-0.018
3-Isobutyl-2-methoxypyrazine	0.087	0.059-0.120

Sulfurous/Roasty Group		
2-Furfurylthiol	1.70	1.6-1.70
2-Methyl-3-furanthiol	0.064	0.060-0.068
Methional	0.239	0.228-0.250
3-Mercapto-3-methylbutyl formate	0.112	0.077-0.130
3-Methyl-2-buten-1-thiol	0.0099	0.0082-0.013
Methanethiol	4.55	4.4-4.7
Dimethy trisulfide	0.028**	
Smoky/Phenolic Group		
Guaiacol	3.2	2.4-4.2
4-Ethylguaiacol	1.6	1.42-1.8
4-Vinylguaiacol	55	45-65
Fruity Group		
Acetaldehyde	130	120-139
Propanal	17.4	
(E)-β-damascenone	0.226	0.195-0.260
Spicy Group		
3-Hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanone	1.58	1.36-1.90
4-Ethyl-3-hydroxy-5-methyl-2(5H)-furanone	0.132	0.104-0.160

*ค่าต่ำสุดและสูงสุดของกลุ่มตัวอย่าง

**วิเคราะห์เพียงตัวอย่างเดียว

3) กระบวนการคั่วเมล็ดกาแฟ (Roasting Process)

ในระหว่างการคั่วเมล็ดกาแฟจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีทำให้เกิดกลิ่นและรสชาติของกาแฟที่แตกต่างกัน ในขั้นตอนแรกของการคั่วเมล็ดกาแฟจะเริ่มดูดความร้อนและเปลี่ยนจากสีเขียวเป็นสีเหลืองอ่อน ๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 205 องศาเซลเซียส เมล็ดกาแฟจะพองตัวและเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน ๆ มีการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 5 และค่าสีออกตรอน (Agtron Number) ประมาณ 90-95

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 220 องศาเซลเซียส เมล็ดกาแฟจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล และค่าสีออกตรอนจะลดลงเหลือ 60-65 การสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 13 โดยในขั้นตอนนี้ เรียกว่า **กระบวนการไพโรไลซีส (Pyrolysis)** ซึ่งมีส่วนสำคัญที่ทำให้สารประกอบในกลุ่มคาร์โบไฮเดรตเกิดการแตกตัว และมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา

ระยะเวลาในการคั่วขึ้นอยู่กับระดับและประเภทของการคั่ว ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความชอบของผู้บริโภค เนื่องจากระดับการคั่วจะส่งผลต่อกลิ่นและรสชาติของกาแฟ โดยทั่วไปการคั่วกาแฟแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ

- การคั่วแบบอ่อน (Light Roast) ใช้อุณหภูมิประมาณ 193-199 องศาเซลเซียส
- การคั่วแบบกลาง (Medium Roast) ใช้อุณหภูมิประมาณ 204 องศาเซลเซียส
- การคั่วแบบเข้ม (Dark Roast) ใช้อุณหภูมิประมาณ 218-221 องศาเซลเซียส (Clarke, 1985)

หลังจากการคั่วเสร็จจะมีการวัดค่าสีของเมล็ดกาแฟโดยใช้เครื่อง Agtron Roast Analyzer (Coffee Research Institute, 2001)

ตารางที่ 15 แสดงระดับการคั่วเมล็ดกาแฟ

ระดับการคั่ว	**คุณลักษณะ**
แบบอ่อน	มีสีน้ำตาลคล้ายกับสีของอบเชย ความข้นหนืดน้อย มีความเป็นกรดอ่อน ๆ และเกิดกลิ่นรสยังไม่สมบูรณ์
แบบอ่อน-กลาง	มีสีน้ำตาลอ่อน ๆ มีความเป็นกรด และความข้นหนืดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย
แบบกลาง	มีสีน้ำตาล มีความเป็นกรด และความข้นหนืดเพิ่มขึ้น
แบบกลาง-เข้ม	มีสีน้ำตาลอ่อนเข้ม มีหยดน้ำมันเคลือบผิวเล็กน้อย ความเป็นกรดเริ่มลดลง และความข้นหนืดเพิ่มขึ้น เหมาะสำหรับทำกาแฟเอสเปรสโซ
แบบเข้ม	มีสีน้ำตาลดำ และหยดน้ำมันเคลือบรอบเมล็ดกาแฟ กลิ่นกาแฟเริ่มหายไป แต่ความข้นหนืดจะเพิ่มขึ้น
แบบเข้มมาก	กาแฟดำสนิท มีน้ำมันออกมาเคลือบผิวด้านนอกมาก กลิ่นกาแฟ และความข้นหนืดค่อนข้างน้อย

ที่มา : Coffee Research Institute (2001)

4) การเปลี่ยนแปลงของเมล็ดกาแฟในระหว่างการคั่ว

กาแฟที่ผ่านการคั่วจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางกายภาพ และทางด้านเคมี ดังนี้

<u>การเปลี่ยนแปลงทางด้านกายภาพ</u>

1. น้ำหนักที่หายไปทั้งหมด (Total Weight Loss)
2. การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

3. การเปลี่ยนแปลงสี และรสชาติ

<u>การเปลี่ยนแปลงทางด้านเคมี</u>

1. กรดที่ระเหยได้ (Volatile Acids)
2. น้ำตาลซูโครส
3. กรดที่ไม่ระเหย (Non-volatile Acids)
4. สารประกอบระเหย (Volatile Compounds)
5. โปรตีน
6. คาเฟอีน (Caffeine)
7. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
8. น้ำมัน

ในเมล็ดกาแฟที่ยังไม่ผ่านการคั่ว (Green Bean) พบว่ามีองค์ประกอบของสารระเหยจำนวนมาก แต่ให้คุณลักษณะกลิ่นที่ไม่ดี ซึ่งองค์ประกอบจะมีความแตกต่างกันขึ้นกับปัจจัยทางด้านต่างๆ เช่น สายพันธุ์ สภาวะในการปลูก และกระบวนการแปรรูป ฯลฯ องค์ประกอบเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเมล็ดกาแฟผ่านกระบวนการคั่ว

ตารางที่ 16 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดกาแฟคั่ว (โดยน้ำหนักแห้ง)

	Classes and Components	**% (Soluble)**	**% (Insoluble)**
1	Carbohydrates (53%)		
	Reducing sugars	1.0 – 2.0	-
	Caramelized sugars	10.0 – 17.0	7.0 – 0.0
	Hemi-celluloses (hydrolysable)	1.0	14.0
	Fiber (not hydrolysable)	-	22.0
2	Oil	-	15.0
3	Protein (N x 6.25) ; amino acids are soluble	1.0 – 2.0	11.0
4	Ash (oxide)	3.0	1.0
5	Acids, non-volatile		
	Chlorogenic	4.5	-
	Caffeic	0.5	-
	Quinic	0.5	-

	Oxalic, Malic, Citric, Tartaric	1.0	-
	Volatile acids	0.35	-
6	Trigonelline	1.0	-
7	Caffeine (Arabica 1.0%, Robusta 2.0%)	1.2	-
8	Phenolics (estimate)	2.0	-
9	Volatiles		
	Carbon dioxide	Trace	2.0
	Essence of aroma and flavor	0.04	-

ที่มา : Sivetz (1963)

บทที่ 4

ผลการดำเนินการติดตั้งเซนเซอร์ และการทดสอบด้วยจมูกอิเล็กทรอนิกส์

4.1 ผลการดำเนินงานของเซนเซอร์

4.1.1 การติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูก

4.1.1.1 การพัฒนาสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอที

การพัฒนาสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ จะแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

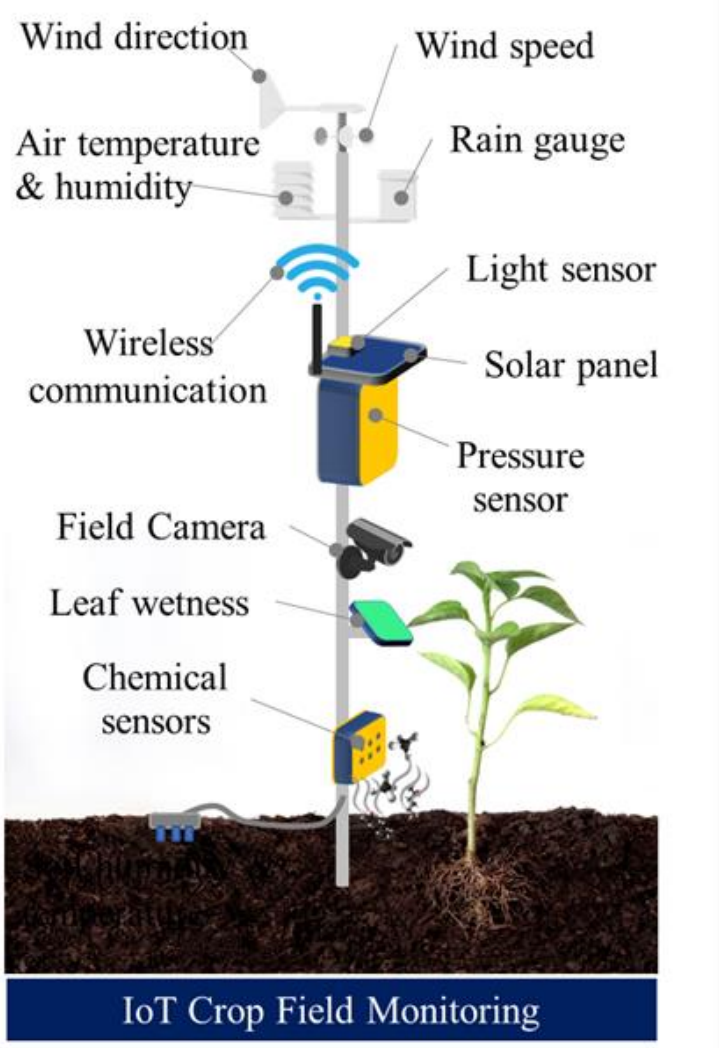
1. การออกแบบสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม

การออกแบบฮาร์ดแวร์เซนเซอร์ไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ ผู้พัฒนามีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาระบบเทคโนโลยีเซนเซอร์ไอโอทีที่สามารถตรวจวัด และแสดงผลข้อมูลให้กับเกษตกรได้ในแบบเรียล ไทม์ ผ่านทางเว็บไซต์หรือแอพพลิเคชันบนสมาร์ท โฟน โดยสถานีจะต้องสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ได้เอง ได้โดยไม่ต้องพึ่งพาการใช้ไฟฟ้า มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และสามารถทำงานได้ในทุกสภาพพื้นที่ สามารถติดตั้งและเคลื่อนย้ายได้สะดวก เกษตรกรสามารถดูแลและบำรุงรักษาได้ง่าย และมีอุปกรณ์สำรองสำหรับเปลี่ยนในกรณีที่มีการเสียหายในระยะยาวได้ โดยในส่วนของสถานีเซนเซอร์ตรวจวัด จะประกอบไปด้วยเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ สำหรับใช้ในการเก็บข้อมูลสภาพภูมิอากาศดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 17 แสดงข้อมูลเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งในสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศอัจฉริยะ

ลำดับ	เซนเซอร์	ประโยชน์ที่เกษตรกรได้รับ
	เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์	สภาพความชื้นในอากาศ ทำให้เฝ้าระวังเรื่องโรคได้ การติดตั้งสถานีเซนเซอร์ตามจุดต่าง ๆ ในไร่นา จะทำให้เห็นความแตกต่างของพื้นที่ เพื่อการเฝ้าระวังพื้นที่เป็นโซน ๆ ได้
2	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศ	ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างกลางวันกับกลางคืน ทำให้ทราบความเครียดของพืช การติดตั้งสถานีเซนเซอร์ในพื้นที่ย่อย ๆ ทำให้ทราบว่า พื้นที่แต่

		ละจุดมีความแตกต่างด้าน microclimate อย่างไร เพื่อตัดสินใจดูแลให้แตกต่างกัน
3	เซนเซอร์วัดปริมาณน้ำฝนและอัตราน้ำฝน	สภาพของน้ำในฟาร์มเกษตร การเปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนที่ได้รับในแต่ละปี นำมาสู่การวางแผนจัดการน้ำ นอกจากนี้ ข้อมูลทำนายว่าฝนจะตกหรือไม่ในกี่ชั่วโมงข้างหน้า จะช่วยทำให้สามารถประหยัดน้ำได้ ไม่ต้องรดน้ำ หากทราบว่าจะมีฝนตก รวมถึงการจัดการกิจกรรมต่าง ๆ ที่ไม่ควรทำ
4	เซนเซอร์วัดความเร็วและทิศทางลม	ในการเพาะปลูกพืชหลายชนิด ข้อมูลนี้มีความสำคัญมาก เช่น การจัดการความชื้นในไร่องุ่น การวางผังการเพาะปลูกตามทิศทางของลม การทำนายการแพร่ระบาดของแมลง
5	เซนเซอร์วัดพลังงานแสงตกกระทบในไร่	พลังงานที่ตกกระทบต้นพืช สามารถนำมาทำนายผลผลิตได้ เช่น การสุกขององุ่น การสุกของข้าวที่ไวต่อแสง เป็นต้น รวมไปถึงการทำนายอัตราการคายน้ำและการบริหารจัดการการใช้น้ำในฟาร์ม
6	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิในดิน	มีประโยชน์ในการวิเคราะห์อัตราการระเหยของน้ำจากพื้นดิน และความเครียดของรากพืช
7	เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน	เพื่อบริหารจัดการในการให้น้ำ ควรจะรดน้ำหรือยัง หรือควรจะรอไปก่อนหากมีการทำนายว่าฝนจะตกในไม่ช้า ซึ่งเกษตรกรได้รับประโยชน์จากเซนเซอร์ส่วนนี้ค่อนข้างมากในการประหยัดน้ำและไฟ (ค่าสูบน้ำ)
8	เซนเซอร์ตรวจความกดอากาศ	มีประโยชน์ต่อเกษตรกรในการใช้ทำนายสภาพอากาศท้องถิ่นในเรื่องของโอกาสที่ฝนจะตก หรือเกิดพายุฝนฟ้าคะนอง



ภาพที่ 97 แสดงภาพส่วนประกอบของสถานีเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ

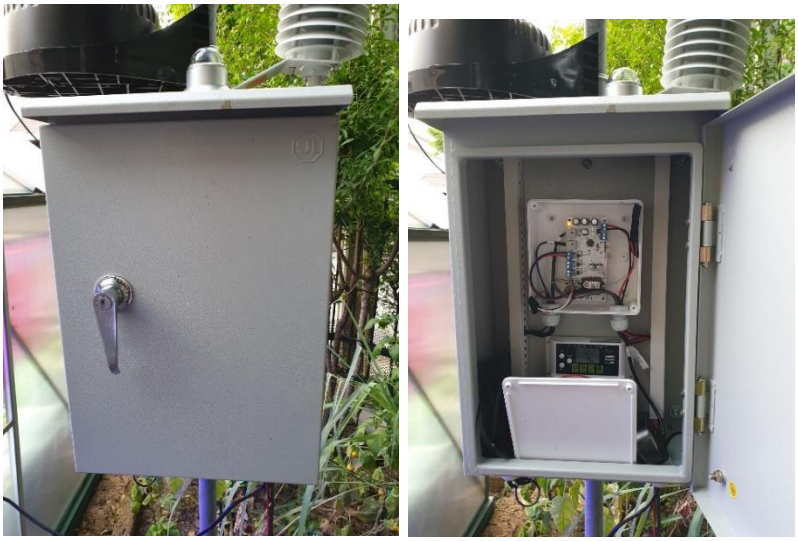
จากภาพแสดงตัวอย่างสถานีเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟ โดยสถานีถูกออกแบบมาให้สามารถทำงานได้โดยใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยใช้ระบบโซล่าเซลล์ที่มีแบตเตอรี่สำรองในกรณีที่แสงอาทิตย์มีปริมาณน้อย โดยสามารถทำงานต่อเนื่องได้นาน 1 อาทิตย์ ตัวสถานีตรวจอากาศสามารถติดตั้งและเคลื่อนย้ายได้ง่าย เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ทำให้เกษตรกรสามารถเคลื่อนย้ายไปติดตั้งตามจุดต่าง ๆ ในไร่ได้ตามความต้องการ สถานีมีความทนทานต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถใช้งานได้ในทุกสภาพพื้นที่ เนื่องจากอุปกรณ์ไฟฟ้าและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ถูกติดตั้งไว้ในกล่องเหล็กกันน้ำอย่างดี ทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องความชื้นหรือแมลงที่จะส่งผลกระทบต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ของสถานี

2. การสร้างสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม

การสร้างสถานีเซนเซอร์ไอโอทีที่จะนำไปติดตั้งในพื้นที่ไร่กาแฟของโครงการ ออกแบบและสร้างโดยทีมคณะวิจัยของโครงการ โดยมีรายละเอียดการสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

ภาพที่ 98 แสดงสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมจริงสำหรับที่จะนำไปติดตั้งในไร่กาแฟ

(1) ตัวสถานี ออกแบบโดยใช้ตู้ไฟอเนกประสงค์คุณภาพดี มีมาตรฐานในการป้องกันน้ำและฝุ่น 6X สามารถกันฝุ่น ละอองน้ำ และสามารถใช้งานกลางแจ้งได้ ภายในตู้จะเป็นที่สำหรับติดตั้งแผงวงจรหลักของสถานี ระบบควบคุมการชาร์จโซล่าเซลล์ และแบตเตอรี่สำรองของสถานี โดยแผงวงจรหลักจะถูกติดตั้งไว้ในกล่องพลาสติกอีกหนึ่งชั้นเพื่อป้องกันความชื้นที่อาจจะสามารถเข้ามาในตู้สถานีได้ อุปกรณ์ต่าง ๆ ถูกจัดวางให้เป็นระเบียบเพื่อง่ายต่อการดูและบำรุงษาเบื้องต้นโดยเกษตรกรในระยะยาวต่อไป

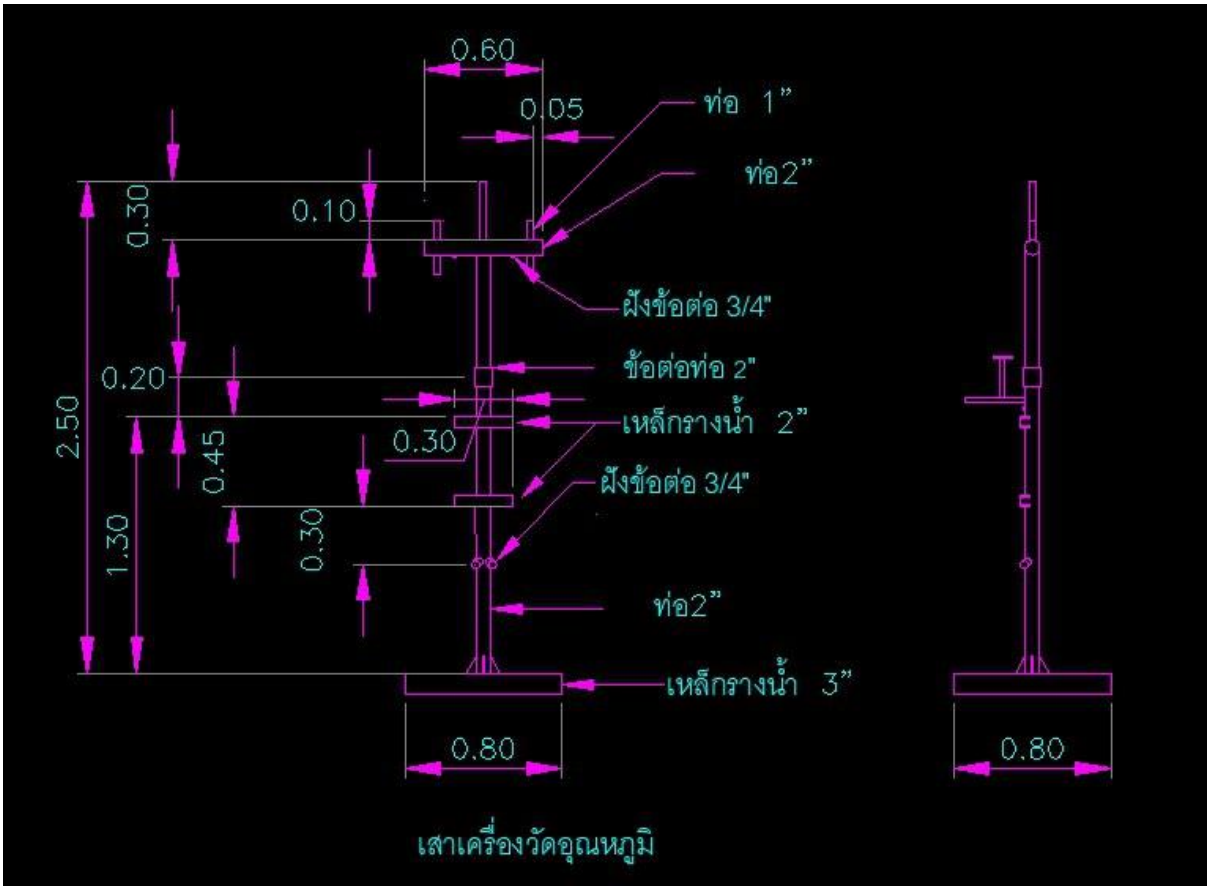


ภาพที่ 99 แสดงตู้สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม

(2) เซนเซอร์ชนิดต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะถูกติดตั้งบนเสาของสถานีบางส่วน และมีบางชนิดที่ติดตั้งไว้กับสถานี โดยเซนเซอร์ทุกชนิดที่ใช้ในโครงการนี้สามารถทำงานได้ทุกสภาพพื้นที่ รองรับการติดตั้งในพื้นที่โล่ง กลางแจ้ง สามารถป้องกันน้ำในกรณีที่ฝนตก และมีความทนทานแข็งแรงในระดับหนึ่ง ทำให้สามารถใช้งานได้ในระยะยาว และสามารถเปลี่ยนเซนเซอร์ในกรณีที่มีการชำรุด เสียหาย หรือการอ่านข้อมูลมีความผิดพลาดในอนาคต

ภาพที่ 100 แสดงเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม

(3) เสาสำหรับติดตั้งสถานี มีขนาดฐาน 0.8x0.8 เมตร และมีความสูง 2.5 เมตร ทำจากเหล็กกัลวาไนซ์และทาสีเคลือบกันสนิม โครงสร้างของเสาออกแบบให้สามารถติดตั้งสถานี และเซนเซอร์ต่าง ๆ ได้ง่าย สามารถถอดประกอบ และเคลื่อนย้ายได้สะดวก เหมาะสำหรับการติดตั้งในพื้นที่ไร่กาแฟบนดอยต่าง ๆ



ภาพที่ 101 แสดงภาพโครงร่างวิศวกรรมของเสาสำหรับติดตั้งสถานี

3. การทดสอบสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในพื้นที่จำลอง

สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมหลังจากสร้างเสร็จแล้วจะถูกทดสอบในพื้นที่จำลองเพื่อประเมินประสิทธิภาพ ปัญหาในการใช้งานก่อนนำไปติดตั้ง และใช้งานในพื้นที่จริงที่ไร่กาแฟเป็นระยะเวลาอย่างน้อย 1 เดือน โดยเซนเซอร์ทุกชนิดจะถูกติดตั้ง และตรวจสอบการทำงานจริงเพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลต่าง ๆ ที่เซนเซอร์อ่านค่าได้มีความถูกต้องเทียบกับเซนเซอร์และอุปกรณ์มาตรฐานดังแสดงในรูปด้านล่าง ในกรณีที่พบว่าเซนเซอร์ไหนมีการอ่านข้อมูลที่ผิดพลาดไปจากเซนเซอร์มาตรฐาน จะมีการศึกษาสาเหตุของความผิดพลาด และหาวิธีแก้ไข เช่น การสร้างสมการ calibration สำหรับเซนเซอร์บางชนิดที่อ่านค่าได้ไม่ตรงกับเซนเซอร์มาตรฐาน แต่มีแนวโน้มของข้อมูลไปในทิศทางเดียวกัน เป็นต้น

ภาพที่ 102 แสดงการติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการ

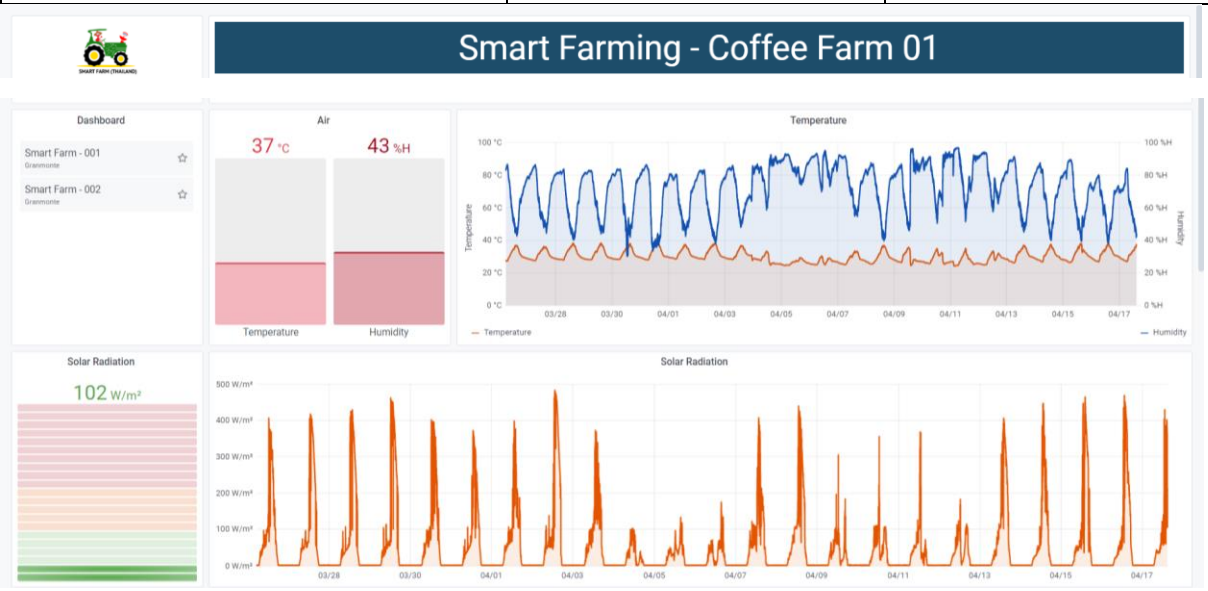
4.1.1.2 ผลการทดสอบสถานีในระดับห้องปฏิบัติการ

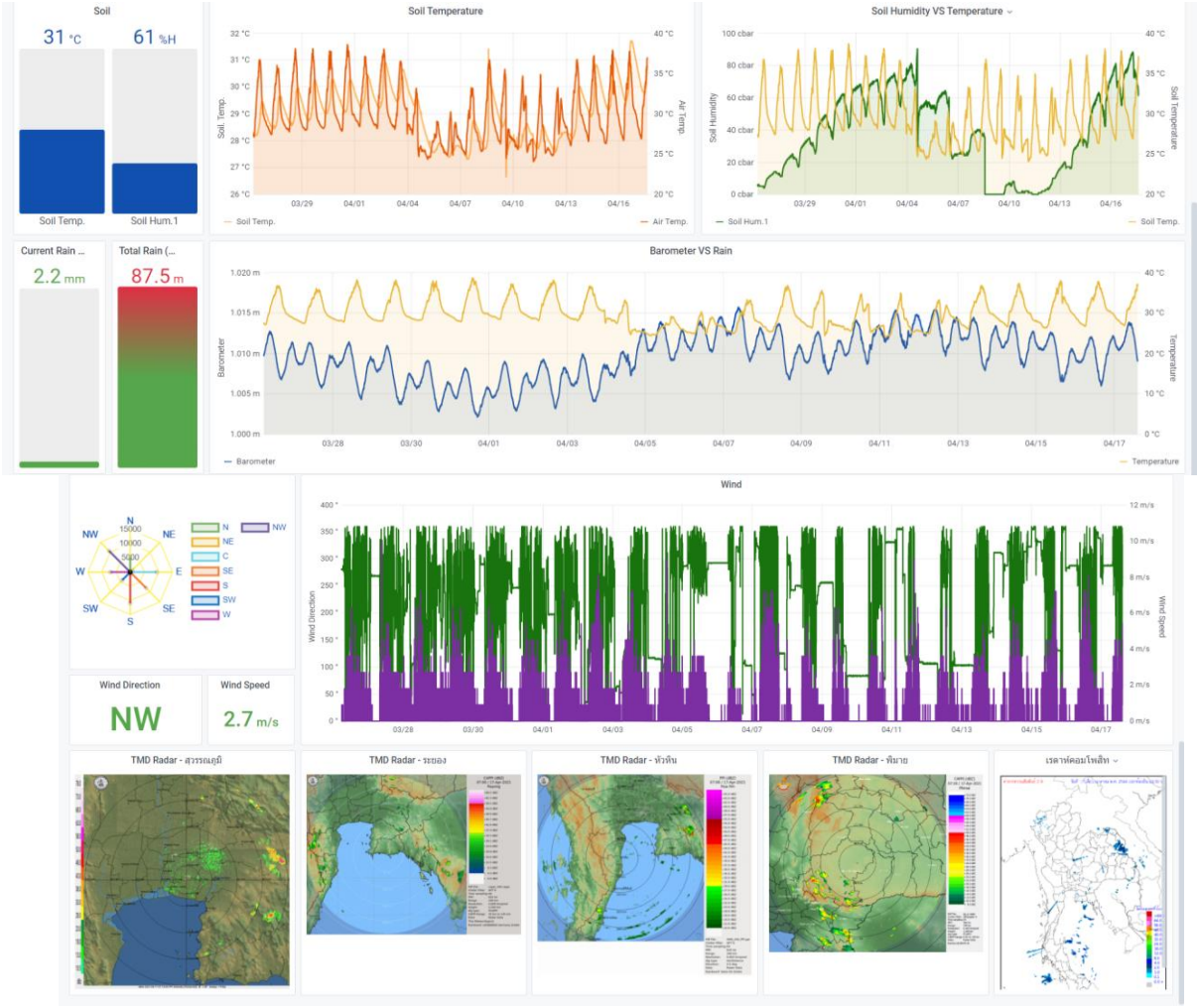
จากการทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ในพื้นที่ทดสอบของโครงการต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมงเป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่า อุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การส่งข้อมูลของสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมผ่านเครือข่าย NB-IoT ไปยังเซิฟเวอร์ของโครงการมีความเสถียรสูง ไม่พบการหยุดทำงานของสถานี โดยสามารถสรุปข้อมูลผลการทดสอบเป็นตารางได้ ดังนี้

ตารางที่ 18 แสดงผลการทดสอบการทำงานข้อสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการ

รายละเอียดการทดสอบ	ผลการทดสอบสถานีที่ 1	ผลการทดสอบสถานีที่ 2
1. การทำงานของอุปกรณ์ตลอด 24 ชั่วโมง	ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ไม่พบการหยุดทำงานของสถานี	ทำงานตลอด 24 ชั่วโมง ไม่พบการหยุดทำงานของสถานี
2. เครือข่าย NB-IoT	มีความเสถียร ไม่พบการหยุดส่งข้อมูล	มีความเสถียร ไม่พบการหยุดส่งข้อมูล
3. เซนเซอร์ชนิดต่างๆ	ทำงานได้ต่อเนื่อง และอ่านข้อมูลได้ถูกต้องเทียบกับเซนเซอร์มาตรฐาน	ทำงานได้ต่อเนื่อง และอ่านข้อมูลได้ถูกต้องเทียบกับเซนเซอร์มาตรฐาน
4. ระบบแบตเตอรี่สำรอง และโซล่าเซลล์	ทำงานได้ต่อเนื่อง	ทำงานได้ต่อเนื่อง

5. ความชื้นในกล่องสถานี	ความชื้นต่ำ ไม่พบสนิม การกัดกร่อนหรือตะกรันที่แผงวงจร	ความชื้นต่ำ ไม่พบสนิม การกัดกร่อนหรือตะกรันที่แผงวงจร
6. ข้อมูลสภาพอากาศ	มีความถูกต้องสอดคล้องกับเซนเซอร์มาตรฐาน	มีความถูกต้องสอดคล้องกับเซนเซอร์มาตรฐาน
7. ข้อมูลสภาพดิน	มีความถูกต้องสอดคล้องกับเซนเซอร์มาตรฐาน	มีความถูกต้องสอดคล้องกับเซนเซอร์มาตรฐาน
8. เซิฟเวอร์ของโครงการ	มีความเสถียร สามารถรองรับข้อมูลที่ส่งเข้ามาต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ไม่พบการหยุดทำงานของระบบ	มีความเสถียร สามารถรองรับข้อมูลที่ส่งเข้ามาต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ไม่พบการหยุดทำงานของระบบ



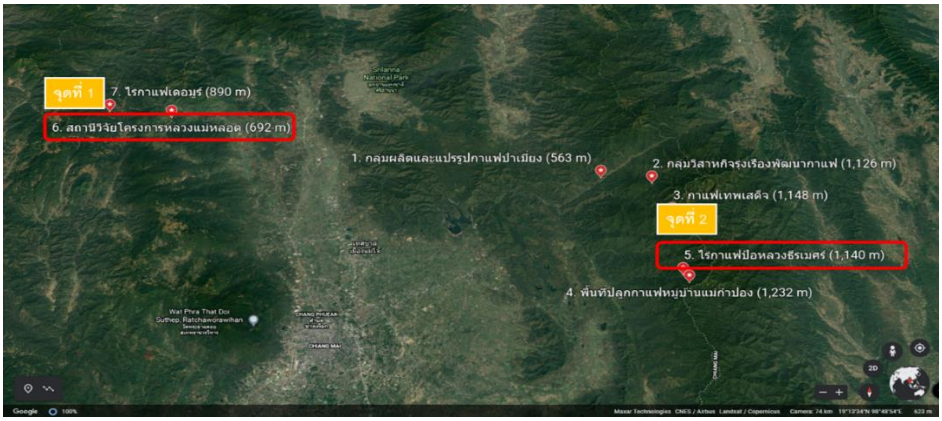


ภาพที่ 103 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมตลอดระยะเวลา 1 เดือน

จากภาพจะเห็นว่าสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมที่พัฒนาขึ้นในโครงการสามารถเก็บข้อมูลสภาพอากาศและสภาพดินในพื้นที่ทดสอบต่อเนื่องได้อย่างสมบูรณ์แบบ ข้อมูลเหล่านี้ทำให้จะทำให้เกษตรกรมองเห็นภาพรวมของสภาพอากาศในพื้นที่ปลูกกาแฟในช่วงดือนต่าง ๆ ตลอดทั้งปี และสามารถนำข้อมูลมาสร้างโมเดลผลกระทบของสภาพอากาศต่อปริมาณผลผลิตของกาแฟ รสชาติของกาแฟ และโรคที่เกิดขึ้นในกาแฟได้ในอนาคต

4.1.2 ผลการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูกจริง

ในเฟสที่ 1 คณะวิจัยได้ดำเนินการติดตั้งสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูกทั้งหมด 2 พื้นที่ คือ เขตอำเภอแม่แตง ติดตั้งที่สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด และเขตอำเภอแม่ออน ติดตั้งที่บ้านแม่กำปอง ดังแสดงในแผนที่ด้านล่าง



ภาพที่ 104 แสดงพื้นที่ติดตั้งสถานี 2 จุดแรกที่สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด และ เขตอำเภอแม่ออน ติดตั้งที่บ้านแม่กำปอง

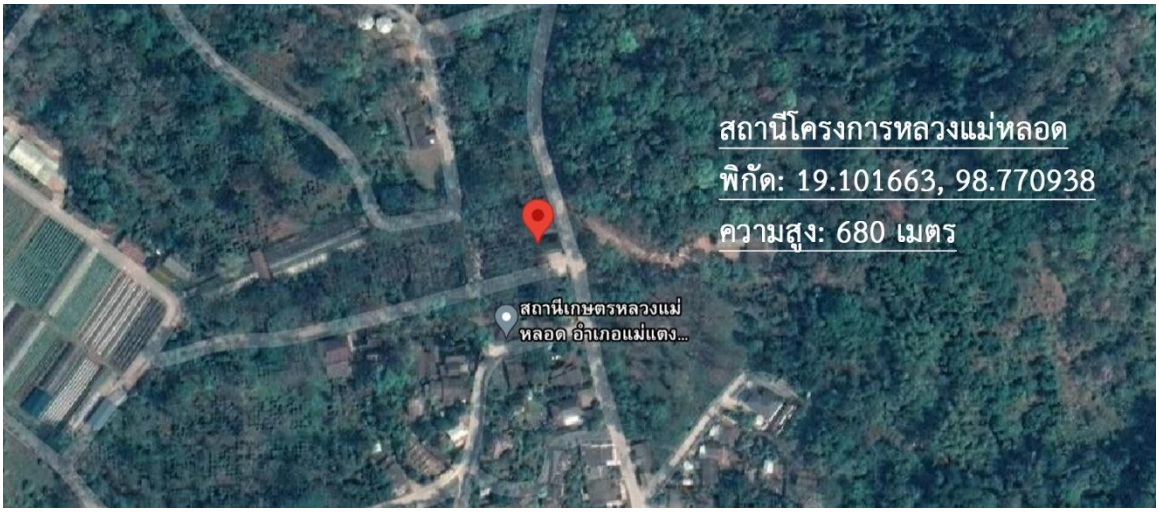
4.1.2.1 สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด

ข้อมูลทั่วไป

สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด พัฒนามาจากศูนย์วิจัยกาแฟอะราบิกา ที่บ้านแม่หลอดซึ่งมีการปลูกกาแฟอะราบิกา และมีการแพร่ระบาดโรคราสนิมอย่างรุนแรง พันธุ์กาแฟลูกผสม เป็นสายพันธุ์ต้านทานโรคราสนิม

จากศูนย์วิจัยโรคราสนิม ของโปรตุเกส ชั่วที่ 2 (F2) จำนวน 28 คู่ผสม รวมทั้งพันธุ์แท้อื่นๆ ทั้งหมดนำลงปลูกที่ศูนย์วิจัยกาแฟบ้านแม่หลอด การดำเนินงานวิจัยสายพันธุ์ จึงเริ่มจากปี พ.ศ.2517 ถึงปี พ.ศ.2523 สายพันธุ์กาแฟได้แพร่หลายออกไปยังแหล่งปลูกต่างๆ เช่นที่ ขุนวาง วาวี เขาค้อ ดอยมูเซอ ป่าเมี่ยงดอยสะเก็ด ปีพ.ศ. 2527 หม่อมเจ้าภีศเดช รัชนี ทรงพระกรุณารับไว้ในความดูแลของโครงการหลวง และได้ชื่อว่า “สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด” การคัดเลือกสายพันธุ์ต้านทานโรคราสนิมดำเนินมาอย่างต่อเนื่อง มีแปลงลูกผสมชั่วที่ 3-4-5 และชั่วที่ 6 สถานีได้นำไม้โตเร็วมาปลูกให้เป็นร่มเงามากถึง 7 ชนิด จนเป็นสวนกาแฟภายใต้ร่มเงาที่สมบูรณ์ที่สุด

<u>จุดติดตั้งสถานี</u>



ข้อมูล	รายละเอียด
พิกัด	19.101663, 98.770938
ความสูงจากระดับน้ำทะเล	~680 เมตร

ภาพการติดตั้งสถานี

1. การปรับพื้นที่สำหรับเตรียมติดตั้งสถานี

2. การเตรียมอุปกรณ์และการกอบสถานีเข้ากับเสา

3. สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด หลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย

4.1.2.2 สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน บ้านพ่อหลวง ธีรเมศร์

<u>ข้อมูลทั่วไป</u>

บ้านแม่กำปอง เป็นแหล่งท่องเที่ยวชื่อดังของจังหวัดเชียงใหม่ และยังเป็นแหล่งปลูกกาแฟที่มีชื่อเสียงอีกด้วย โดยคณะวิจัยได้เลือกจุดติดตั้งสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมที่บ้านของพ่อหลวงธีรเมศร์ อดีต

ผู้ใหญ่บ้านและประธานการท่องเที่ยวโฮมสเตย์ แม่กำปอง โดยติดตั้งในบริเวณบ้านของพ่อหลวงที่ความสูงจากระดับน้ำทะเลประมาณ 1,063 เมตร จากระดับน้ำทะเล

<u>จุดติดตั้งสถานี</u>

ข้อมูล	รายละเอียด
พิกัด	18.866133, 99.355172
ความสูงจากระดับน้ำทะเล	~1,100 เมตร

<u>ภาพการติดตั้งสถานี</u>

1. ภาพสถานที่จริงสำหรับติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม

2. การติดตั้งเสากัลป์วาไนซ์สำหรับติดตั้งสถานี

3. การประกอบสถานีเข้ากับเสากัลป์วาไนซ์

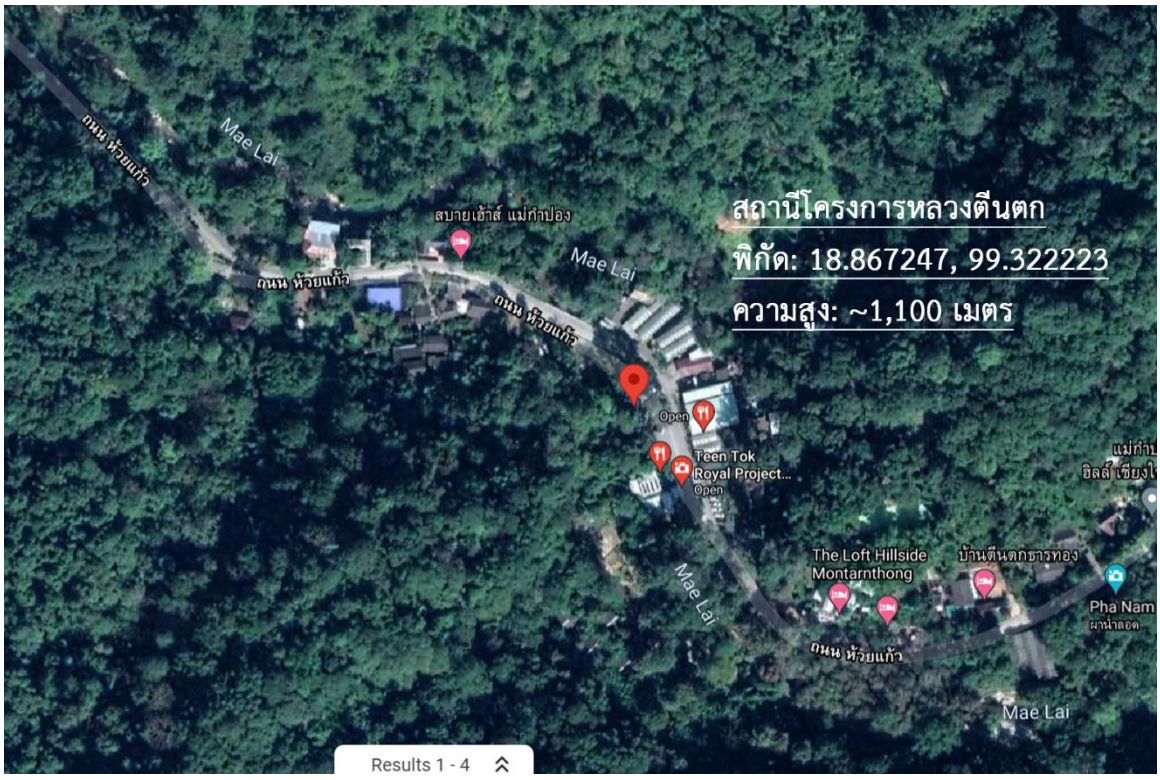
4. สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม บ้านแม่กำปอง หลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย

4.1.2.3 สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน โครงการหลวงตีนตก

ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่

ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงตีนตก ตำบลห้วยแก้ว กิ่งอำเภอแม่ออน เป็นอีกหนึ่งศูนย์วิจัยที่คณะวิจัยเลือกเป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งสถานีฯ เนื่องจากเป็นแหล่งพัฒนา สาธิต และส่งเสริมการเพาะเห็ดหอม และกาแฟให้เป็นอาชีพเสริมให้แก่คนในพื้นที่ โดยศูนย์ฯ แห่งนี้ตั้งอยู่สูงจากระดับน้ำทะเลระหว่าง 700-1,200 เมตร เป็นพื้นที่ในเขตอุทยานแห่งชาติแม่ตะไคร้

จุดติดตั้งสถานี



ข้อมูล	รายละเอียด
พิกัด	18.867171, 99.322342
ความสูงจากระดับน้ำทะเล	~770 เมตร

ภาพการติดตั้งสถานี

1. การเตรียมอุปกรณ์และกำหนดจุดติดตั้งสถานี

2. การติดตั้งสถานีและการตั้งทิศเซนเซอร์ลม

3. สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม โครงการหลวงตีนตก หลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย

4.1.2.4 สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง โครงการหลวงม่อนเงาะ

ข้อมูลทั่วไปของพื้นที่

ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงตีนตก ตำบลห้วยแก้ว กิ่งอำเภอแม่ออน เป็นอีกหนึ่งศูนย์วิจัยที่คณะวิจัยเลือกเป็นพื้นที่สำหรับติดตั้งสถานีฯ เนื่องจากเป็นแหล่งพัฒนา สาธิต และส่งเสริมการเพาะเห็ดหอม และกาแฟให้เป็นอาชีพเสริมให้แก่คนในพื้นที่ โดยศูนย์ฯ แห่งนี้ตั้งอยู่สูงจากระดับน้ำทะเลระหว่าง 700-1,200 เมตร เป็นพื้นที่ในเขตอุทยานแห่งชาติแม่ตะไคร้

จุดติดตั้งสถานี

ข้อมูล	รายละเอียด
พิกัด	19.170970, 98.777720
ความสูงจากระดับน้ำทะเล	~1,240 เมตร

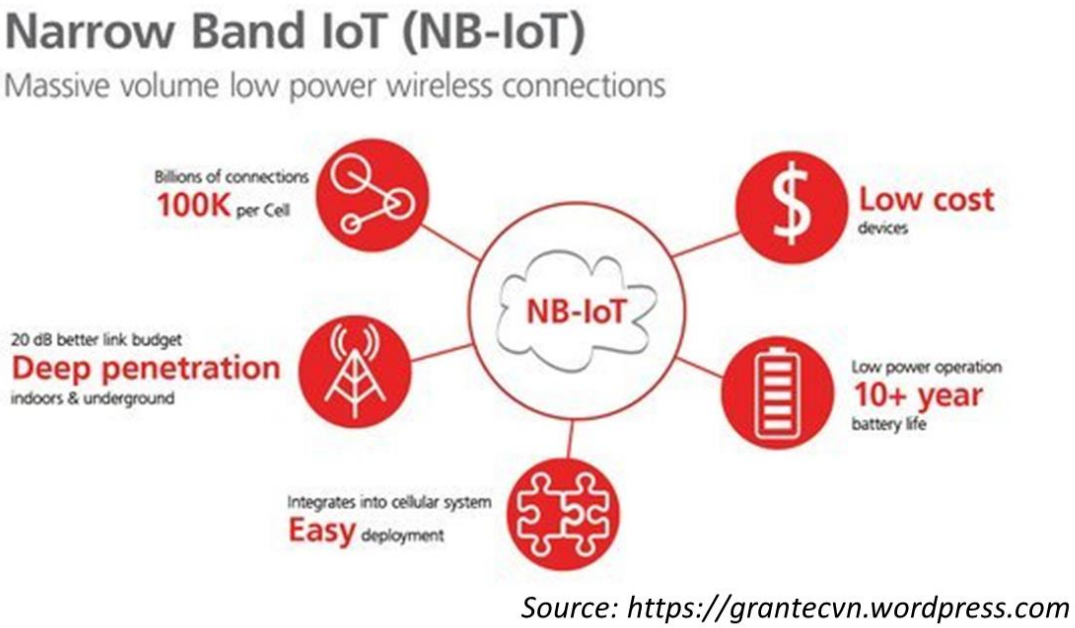
ภาพการติดตั้งสถานี

1. การติดตั้งสถานี

2. สถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อม โครงการหลวงม่อนเงาะ หลังจากติดตั้งเสร็จเรียบร้อย

4.1.3 ระบบฐานข้อมูลและเว็บไซต์แสดงผล สถาปัตยกรรม รูปแบบการรับส่งข้อมูล

จากการลงพื้นที่สำรวจไร่กาแฟในพื้นที่ต่าง ๆ พบว่าเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ในการสื่อสารระหว่างเซนเซอร์ไอโอทีกับเซิฟเวอร์และผู้ใช้หรือเกษตรกร คือ เทคโนโลยี NB-IoT เนื่องจากมีสัญญาณครอบคลุมพื้นที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีการส่งข้อมูลชนิดอื่น นอกจากนี้ NB-IoT ยังมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับความต้องการของการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ ดังตารางต่อไปนี้



ภาพที่ 105 แสดงข้อดีของเทคโนโลยี NB-IoT

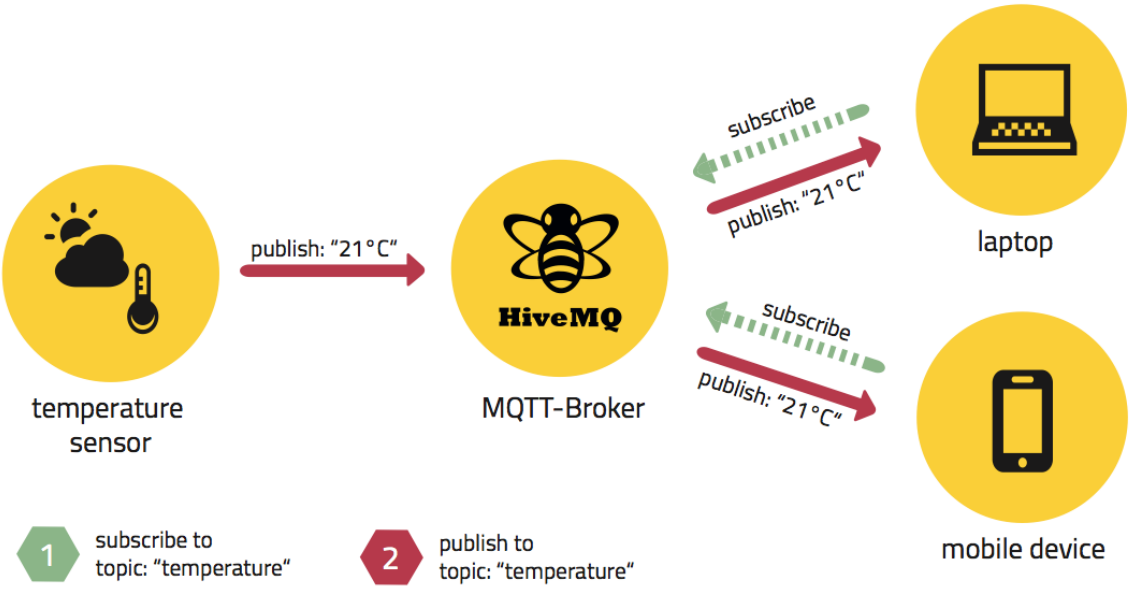
สถาปัตยกรรมของระบบสามารถแบ่งเป็นเลเยอร์ต่าง ๆ ได้ ดังนี้

1. End Device Layer เป็นส่วนที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอทีสำหรับตรวจวัดข้อมูลต่าง ๆ ในไร่กาแฟ เพื่อส่งข้อมูลไปยังเซิฟเวอร์ หรือเรียกว่า End Node โดยในโครงการนี้คือ เซนเซอร์ไอโอทีสำหรับเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมในไร่กาแฟ

2. Device Connectivity Layer คือ จุดต่อเชื่อมของ Node ต่าง ๆ ในโครงการ ทำหน้าที่เป็นทางเข้าสู่ระบบเครือข่ายต่าง ๆ บนอินเตอร์เน็ต สำหรับในโครงการนี้ Gateway คือ เสาส่งสัญญาณ NB-IoT ของบริษัทแอดวานซ์ ดาต้าเน็ตเวิร์ค คอมมิวนิเคชั่นส์ จำกัด

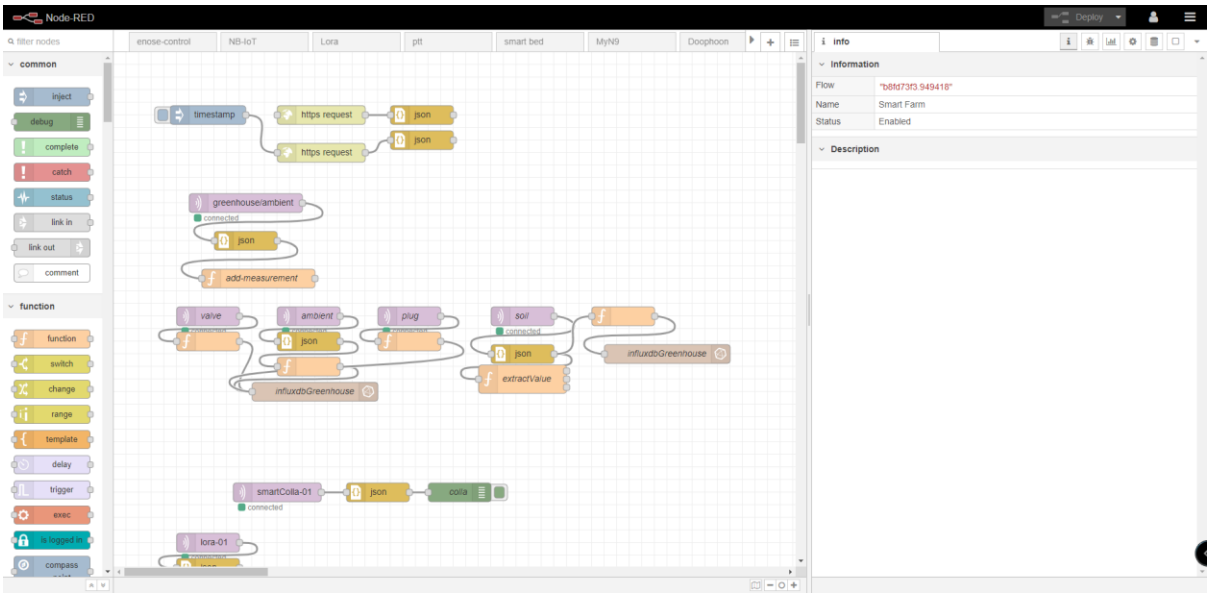
3. Device & Data Management Layer คือ ส่วนซอฟต์แวร์สำหรับบริหารจัดการข้อมูลต่าง ๆ ที่ส่งเข้ามายังเซิฟเวอร์ เป็นส่วนที่ถูกติดตั้งไว้บนคลาวด์เซิฟเวอร์จึงมีความเสถียรสูง และสามารถทำงานต่อเนื่องได้ตลอด 24 ชั่วโมง ซึ่งประกอบไปด้วย

(1) MQTT Broker หรือ MQTT Server เป็นซอฟต์แวร์สำหรับรับข้อมูลจาก MQTT Client ที่ได้ publish เข้ามาและสามารถ publish ข้อมูลจาก MQTT Broker ไปยัง MQTT Client ที่ได้ Subscribe ข้อมูลไว้ได้ หากมองในมุมมองของ Internet of Things อุปกรณ์นี้อาจจะเป็น Cloud Server ของค่ายต่าง ๆ เช่น CloudMQTT NETPIE Azure AWS เป็นต้น หรือใช้ Single Board Computer เช่นบอร์ด Raspberry Pi LattePanda Beagle Bone nanoPi อื่น ๆ แล้วติดตั้งซอฟต์แวร์เพิ่มเติมก็สามารถใช้งานได้เช่นกัน



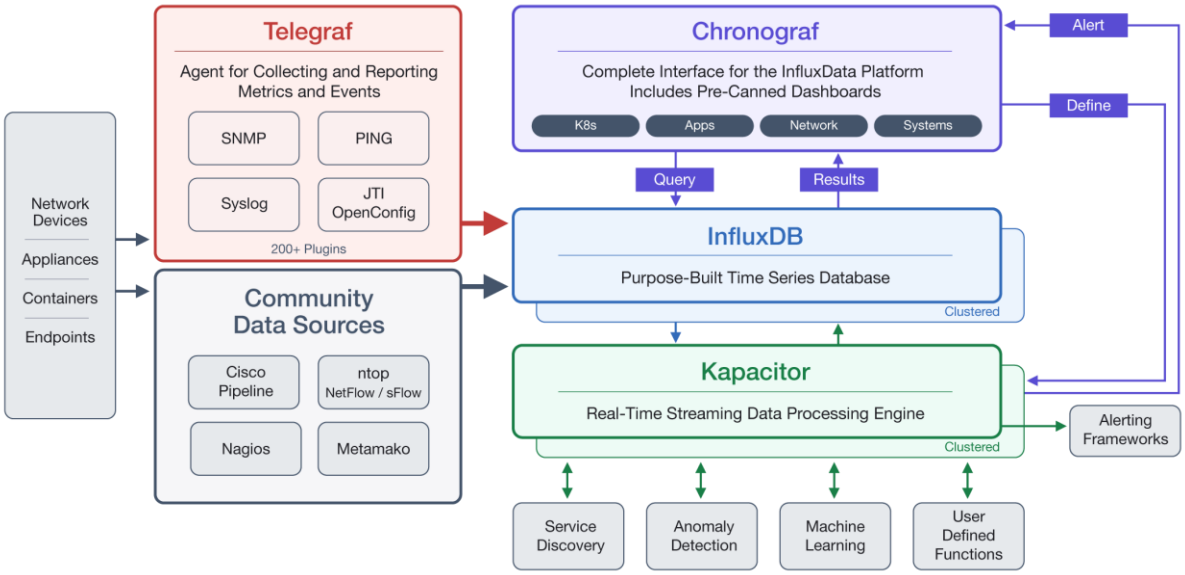
ภาพที่ 106 แสดงตัวอย่างการทำงานของ MQTT Borker

(2) Node Red เป็นซอฟต์แวร์ Open Source ที่มีการทำงานแบบ Flow-based programing สำหรับใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ IoT ให้สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ฝั่งฮาร์ดแวร์ เข้ากับ APIs (Application Programing Interface) โดยมี User Interface ให้ใช้งานได้ผ่านทาง Web Browser ซึ่งข้อมูลสามารถเชื่อมโยงเข้าถึงกันได้ง่าย



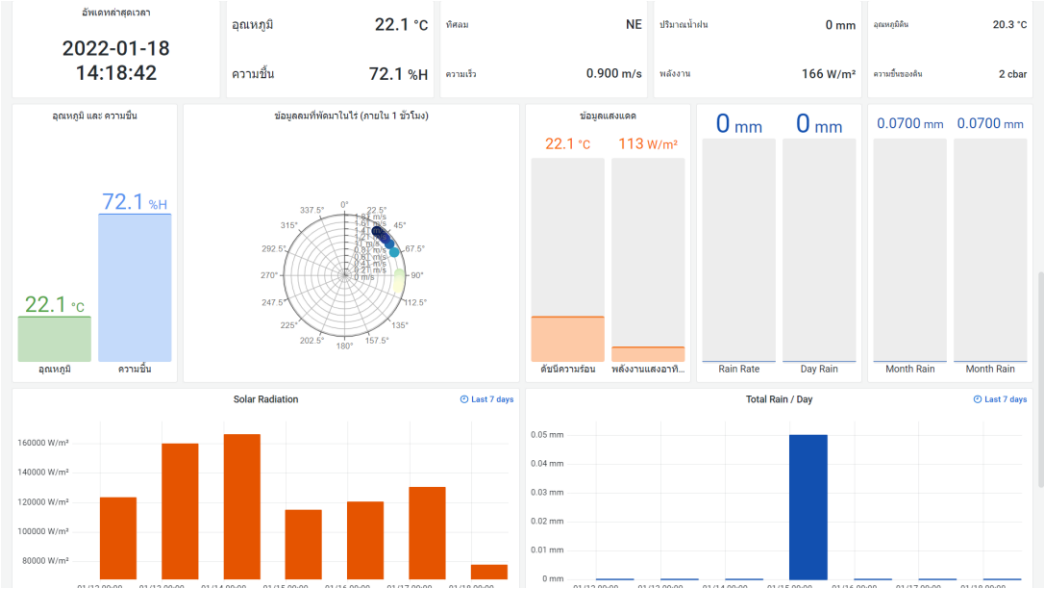
ภาพที่ 107 แสดงตัวอย่างการใช้งาน Node Red ผ่านทาง Web Browser

(3) InfluxDB คือ การเก็บข้อมูลในรูปแบบของ time series metrics และ analytics database ซึ่งเขียนด้วยภาษา Go ซึ่งไม่ต้องการ external dependency อื่นๆเพิ่มเติม InfluxDB มี feature ที่สำคัญ ได้แก่ ใช้ภาษา SQL มี HTTP(S) API สามารถรองรับการจัดเก็บข้อมูลได้สูงถึงระดับพันล้านชุดข้อมูล

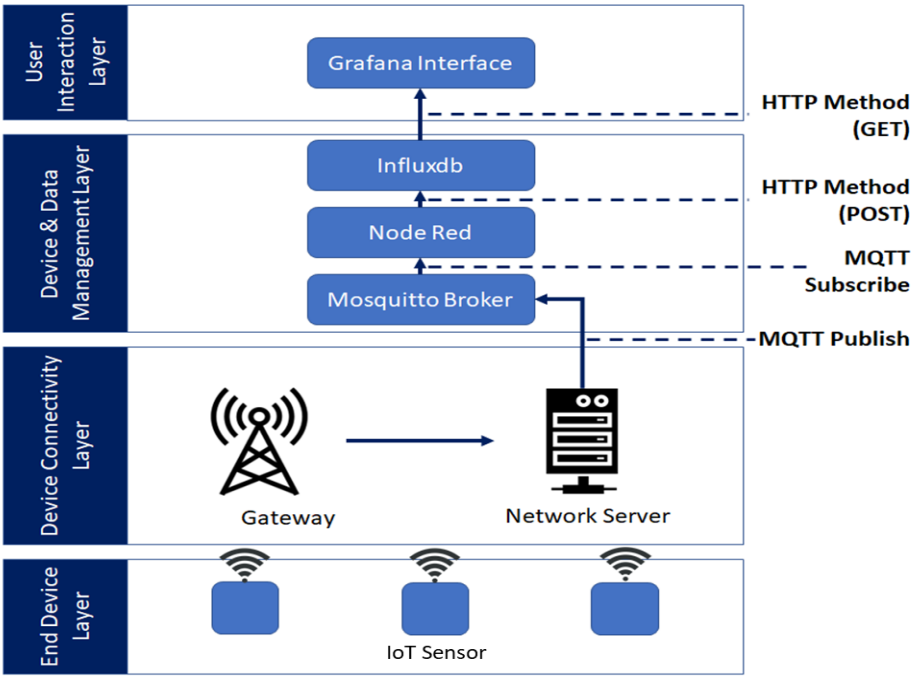


ภาพที่ 108 แสดงตัวอย่างโครงสร้างการทำงานของ InfluxDB

(4) User Interaction Layer คือ ส่วนแสดงผลข้อมูลซึ่งพัฒนาขึ้นโดยใช้ซอฟต์แวร์ Grafana สามารถแสดงผลข้อมูลโดยการดึงข้อมูลจากฐานข้อมูล InfluxDB มาแสดงผลในรูปแบบต่างๆ เช่น กราฟ ตาราง ตัวเลข เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ต่างๆ แบบเรียล-ไทม์



ภาพที่ 109 แสดงตัวอย่างของ User Interaction layer โดยใช้ซอฟต์แวร์ Grafana



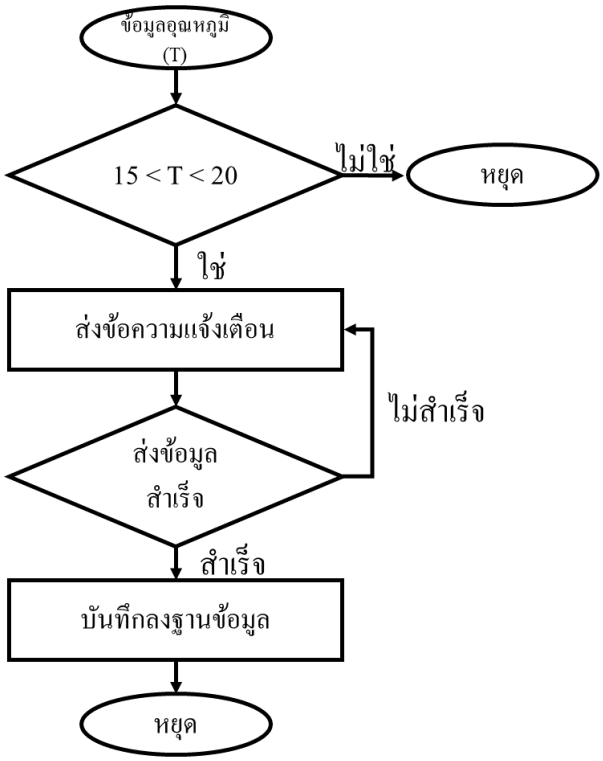
ภาพที่ 110 แสดงสถาปัตยกรรมของเครือข่ายเซนเซอร์ไอโอทีที่จะพัฒนาขึ้นในโครงการ

(5) การแจ้งเตือนผ่าน Line Application คือ การพัฒนาฟังก์ชันการแจ้งเตือนข้อมูลไปยังผู้ใช้งาน หรือเกษตรกรแบบเรียลไทม์ผ่านแอพพลิเคชัน Line เพื่อช่วยให้เกษตรกรสามารถตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทันสถานการณ์ โดยในเบื้องต้นเป็นการพัฒนาระบบการแจ้งเตือนข้อมูลสภาพปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ จากสถานีเซนเซอร์ที่ติดตั้งในพื้นที่ปลูกกาแฟ เพื่ออัพเดทสภาพแวดล้อมในไร่กาแฟให้กับเกษตรกร ในกรณีที่พารามิเตอร์ต่าง ๆ มีค่าเกินที่เกษตรกรกำหนด อ้างอิงตามข้อมูลสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตของกาแฟจากศูนย์ส่งเสริมและพัฒนาอาชีพเกษตรจังหวัดเลย (เกษตรที่สูง) ดังตารางต่อไปนี้

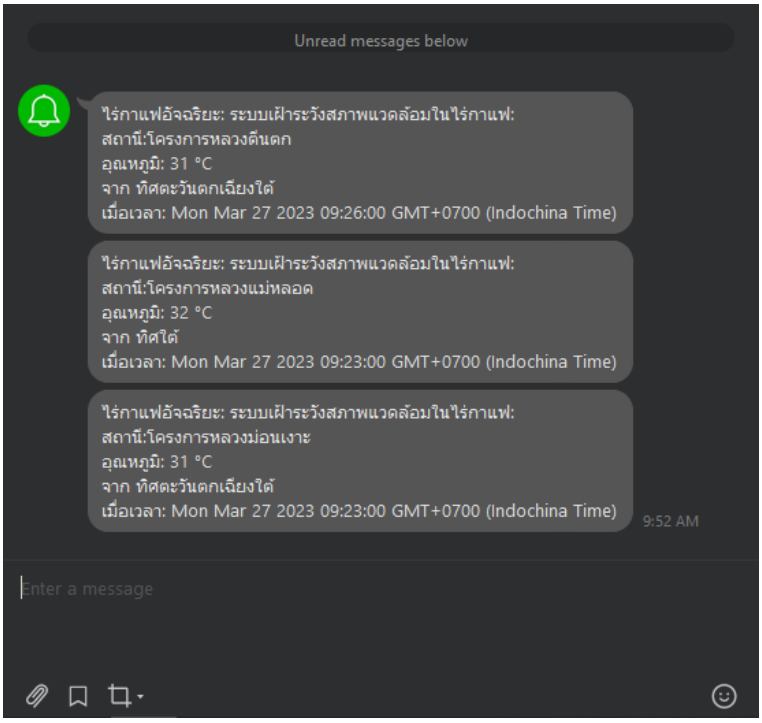
ตาราง 19 แสดงข้อมูลสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตของกาแฟ

สภาพแวดล้อม	ความเหมาะสม	เซนเซอร์ที่ใช้ตรวจวัด
1. สภาพภูมิอากาศ	ประมาณ 15 – 20 องศาเซลเซียส	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิของอากาศ
2. สภาพพื้นที่	ควรปลูกในพื้นที่ 700 เมตร เหนือระดับน้ำทะเลขึ้นไป	พิกัด GPS
	พื้นที่ปลูกมีความลาดเอียงไม่เกิน 30% ไม่มีน้ำท่วมขัง	เซนเซอร์วัดความลาดเอียง
3. สภาพดิน	ดินร่วนระบายน้ำได้ดี มีอินทรีย์วัตถุไม่ต่ำกว่า 1%	-
	ชั้นดินลึกไม่น้อยกว่า 50 ซม.	-
	ความเป็นกรดด่าง 5.5 – 6.5	เซนเซอร์วัดค่าความเป็นกรดด่างของดิน
4. ธาตุอาหาร	ควรมีธาตุโปแตสเซียมสูง เพราะเป็นธาตุอาหารสำคัญในการติดตามผลกาแฟ (ไม่น้อยกว่า 120 mg/kg)	เซนเซอร์วัดแร่ธาตุโปแตสเซียม
5. สภาพน้ำ	ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยไม่ควรต่ำกว่า 1,500 มม./ปี มีการกระจายของฝน 7-8 เดือน มีน้ำเพียงพอในฤดูแล้ง	เซนเซอร์วัดปริมาณน้ำฝน

จากข้อมูลในตารางจะเห็นว่าอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอทีที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้มีเซนเซอร์บางชนิดที่มีการติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์แล้ว คือ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิของอากาศ และเซนเซอร์ตรวจวัดปริมาณน้ำฝน โดยสามารถนำมาใช้ในการพัฒนาระบบแจ้งเตือนข้อมูลเบื้องต้นได้ โดยมีไดอะแกรมแสดงการทำงานของระบบแจ้งเตือนข้อมูลดังนี้



ภาพที่ 111 แสดงแผนผังการทำงานของระบบแจ้งเตือนข้อมูล



ภาพที่ 112 แสดงตัวอย่างการแจ้งเตือนข้อมูลผ่านแอพพลิเคชัน Line

4.1.4 ผลการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูก

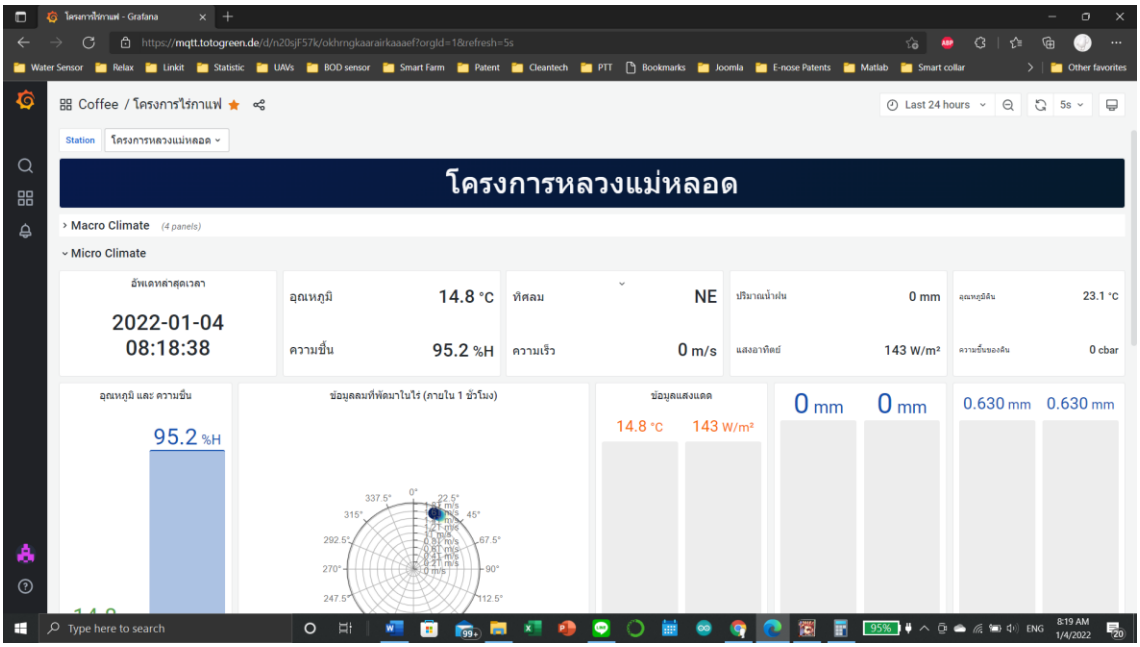
4.1.4.1 การใช้งานเว็บไซต์สำหรับแสดงผลข้อมูล

หลังจากการติดตั้งสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมในพื้นที่อำเภอแม่ริม ที่โครงการหลวงแม่หลอด และอำเภอแม่ออน ที่หมู่บ้านแม่กำปอง เป็นระยะเวลาประมาณ 1 เดือน คณะวิจัยได้ติดตามการทำงานของสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมอย่างใกล้ชิดผ่านทางเว็บไซต์ที่ถูกพัฒนาขึ้นในโครงการ โดยมีรายละเอียดของเว็บไซต์ ดังนี้

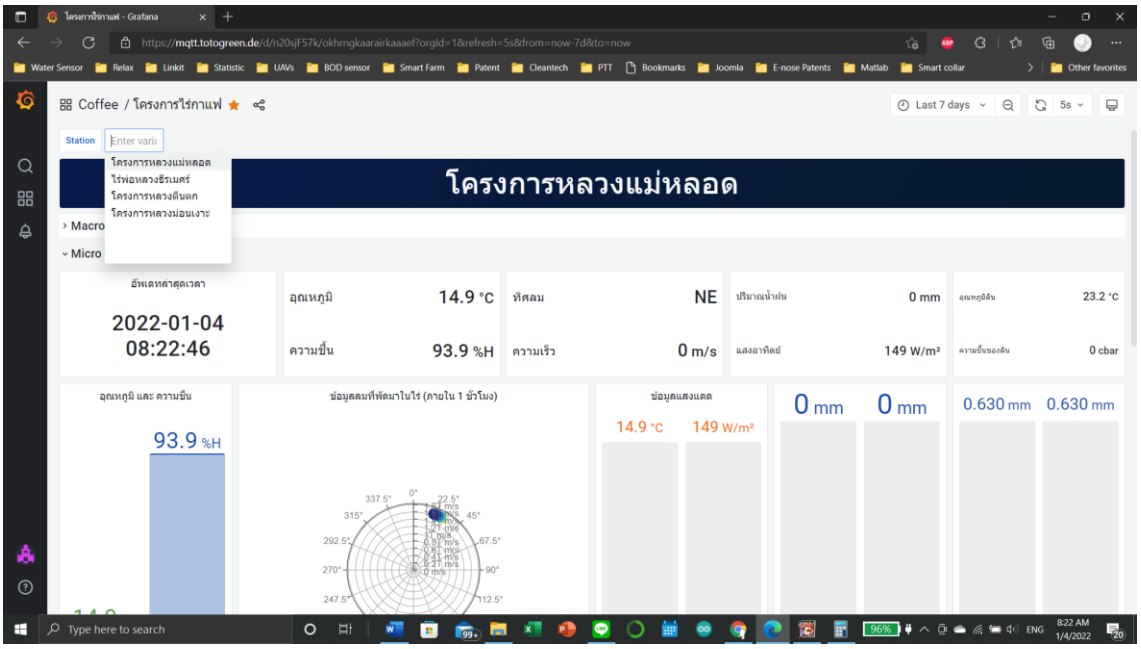
URL ของเว็บไซต์	https://mqtt.totogreen.de/
Username	coffee
Password	coffee2021

ผู้ใช้สามารถเข้าไปดูข้อมูลของสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ตามรายละเอียดข้างต้น โดยมีหน้า Dashboard สำหรับการแสดงผลข้อมูลมีรายละเอียด ดังนี้

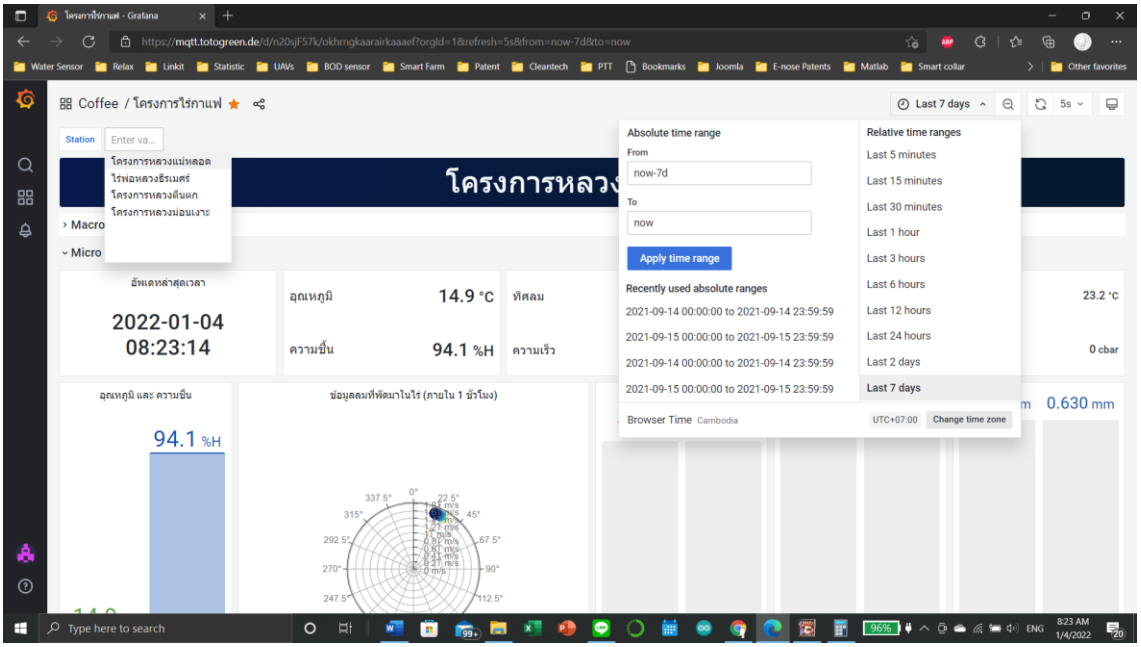
1. หน้า Home จะเป็นหน้าหลักสำหรับแสดงผลข้อมูล โดยจะมีรายละเอียดข้อมูลแบบ Real-time จากสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมตามจุดต่าง ๆ และผู้ใช้สามารถเลือกดูข้อมูลของแต่ละสถานีได้จากหน้าจอนี้



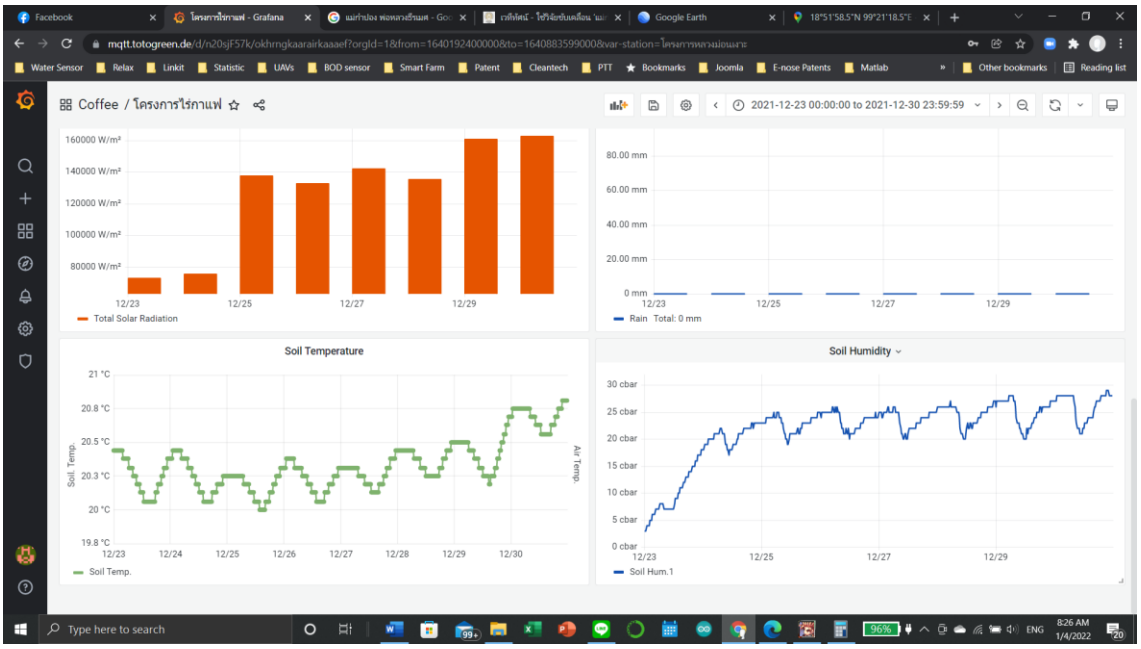
2. การเลือกดูข้อมูลของแต่ละสถานีจากเมนู Station



3. การเลือกดูข้อมูลตามช่วงเวลาต่างๆ ของแต่ละสถานี



4. กราฟสรุปข้อมูลรายวัน



จากตัวอย่างหน้าจอแสดงผลข้อมูลที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้น หลังจากเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมในพื้นที่ปลูกเป็นระยะเวลาหนึ่ง ข้อมูลของแต่ละสถานีเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของสภาพแวดล้อมต่อรสชาติ และคุณภาพของกาแฟต่อไป

4.1.4.2 ผลข้อมูลการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างแต่ละสถานี

<u>สภาพอากาศที่เหมาะสำหรับการปลูกกาแฟในธรรมชาติ</u>

กาแฟสายพันธุ์อะราบิกามีต้นกำเนิดมาจากบริเวณที่ราบสูงของประเทศเอธิโอเปีย เติบโตภายใต้ร่มเงาของต้นไม้ใหญ่ ที่ระดับความสูงจากน้ำทะเลประมาณ 1,600 ถึง 2,000 เมตร มีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งปีประมาณ 15 ถึง 20 องศาเซลเซียส มีปริมาณฝนสะสมตลอดทั้งปีประมาณ 1,600 ถึง 2,000 มิลลิเมตร และมีฤดูแล้งครั้งเดียวที่กินระยะเวลานานประมาณสามถึงสี่เดือน

จากการเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมของสถานที่ต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มติดตั้งแต่ละสถานีจนถึงปัจจุบัน โดยแบ่งการติดตั้งออกเป็น 2 ครั้ง มีรายละเอียด ดังนี้

ตารางที่ 20 แสดงวันที่ทำการติดตั้งแต่ละสถานี

สถานี	ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล (เมตร)	วันที่ติดตั้ง
1. สถานีโครงการหลวงแม่หลอด	680	วันที่ 15 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2564
2. สถานีบ้านแม่กำปอง	1,100	วันที่ 18 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2564
3. สถานีโครงการหลวงตีนตก	770	วันที่ 21 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2565
4. สถานีโครงการหลวงม่อนเงาะ	1,240	วันที่ 22 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2565

จากตารางจะเห็นว่าทั้งสี่สถานี ติดตั้งคนละวัน ทำให้การบันทึกข้อมูลจึงเริ่มต้นแตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับรายงานฉบับนี้จะขอนับตั้งแต่วันที่เริ่มติดตั้งสถานีที่ 4 เป็นวันแรกของการเก็บข้อมูลคือวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2564 จนถึงวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2565 เพื่อให้อยู่ในกรอบเวลาเดียวกันทั้ง 4 สถานี โดยจากการเก็บข้อมูลในพื้นที่ต่าง ๆ ด้วยสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมสามารถสรุปผลในเบื้องต้นได้ ดังนี้

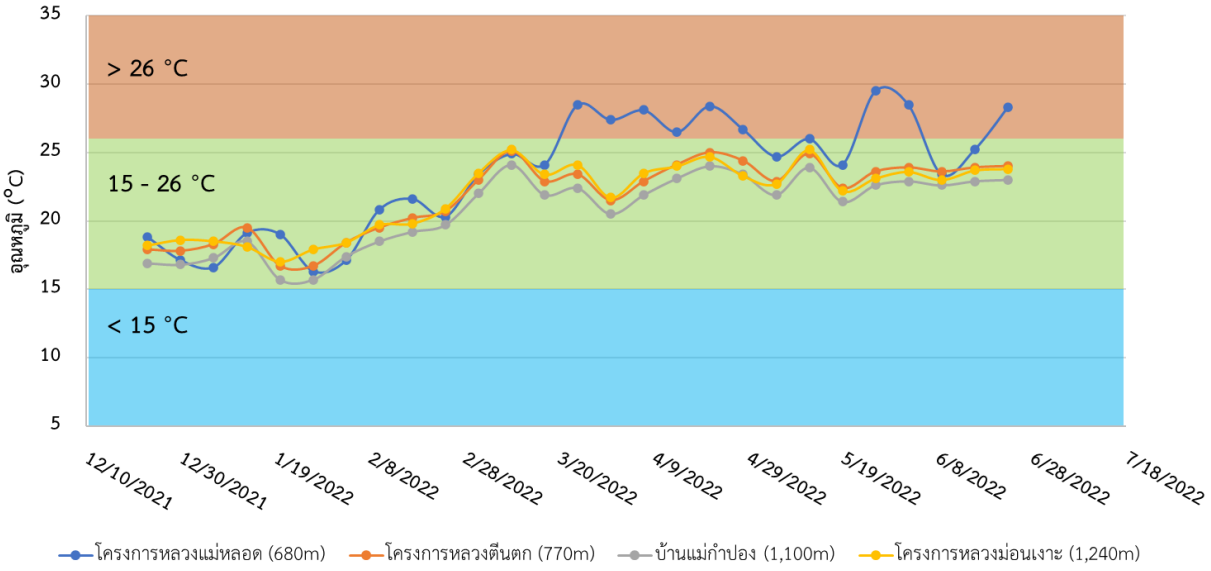
ตารางที่ 21 สรุปข้อมูลสภาพแวดล้อมของพื้นที่เก็บข้อมูลทั้ง 4 จุด

สภาพแวดล้อม	โครงการหลวงแม่หลอด	โครงการหลวงตีนตก	บ้านแม่กำปอง	โครงการหลวงม่อนเงาะ
พิกัด	19°06'06.0"N 98°46'15.4"E	18°52'01.8"N 99°19'20.4"E	18°51'58.1"N 99°21'18.6"E	19°10'15.5"N 98°46'39.8"E
ความสูงจาก ระดับน้ำทะเล	680 เมตร	770 เมตร	1,100 เมตร	1,240 เมตร
อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด	15 – 20 °C	15 – 20 °C	15 – 20 °C	15 – 30 °C
ความชื้นสัมพัทธ์สูงสุด-ต่ำสุด	60 – 95 %	60 – 95 %	60 – 95 %	50 – 95 %
อุณหูมิของดินสูงสุด-ต่ำสุด	18 – 27 °C	18 – 29 °C	18 – 27 °C	18 – 27 °C
ความชื้นในดินสูงสุด-ต่ำสุด	4 – 10 cBar	5 – 80 cBar	5 – 80 cBar	5 – 80 cBar
ปริมาณฝนสะสม	800 – 900	1,200 – 1,400	1,200 – 1,400	1,100 – 1,200

	มม.	มม.	มม.	มม.
ปริมาณพลังงานที่พืชได้รับ	5 – 13 MJ/m^2.day	7 – 14 MJ/m^2.day	4 – 15 MJ/m^2.day	5 – 25 MJ/m^2.day

จากตารางสรุปข้อมูลสภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่มีการเก็บข้อมูลทั้ง 4 จุดพบว่า

ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่



ภาพที่ 113 แสดงข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายสัปดาห์ของแต่ละพื้นที่

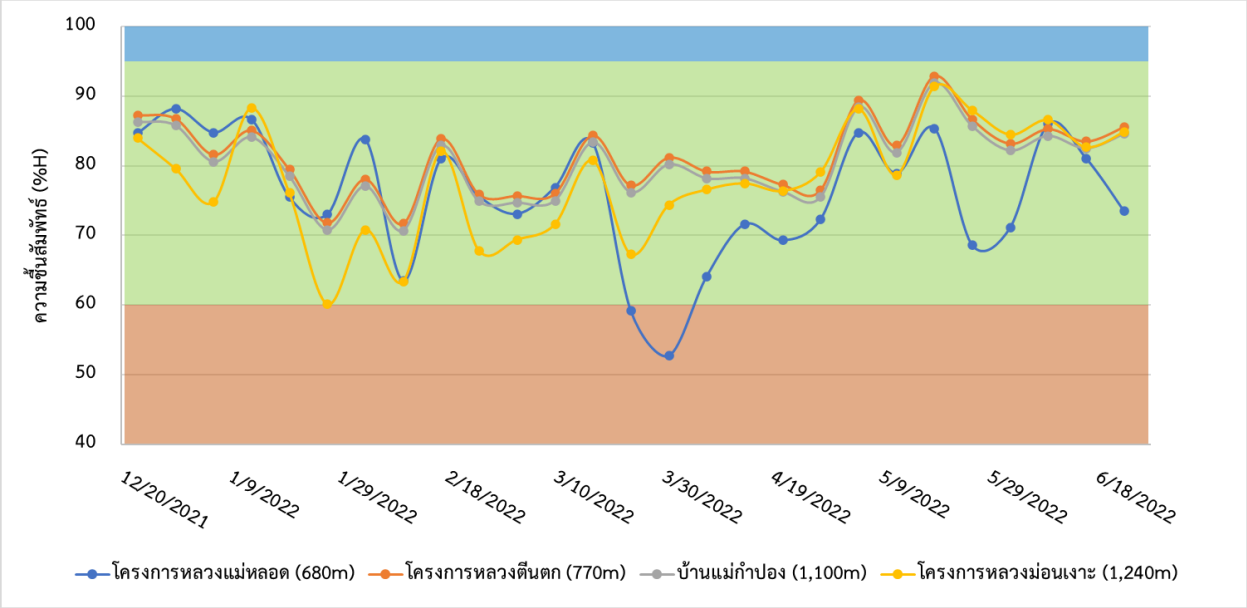
จากกราฟการวิเคราะห์อุณหภูมิเฉลี่ยรายสัปดาห์ จะเห็นว่าสถานีที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงที่สุดเรียงลำดับจากมากไปน้อย เป็นดังนี้

1. สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 680 เมตร
2. สถานีวิจัยโครงการหลวงตีนตก ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 770 เมตร
3. สถานีวิจัยโครงการหลวงม่อนเงาะ ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,240
4. สถานีบ้านแม่กำปอง ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,100 เมตร

นอกจากนี้จากกราฟจะเห็นว่าสถานีวิจัยโครงการหลวงตีนตก สถานีวิจัยโครงการหลวงม่อนเงาะ และสถานีบ้านแม่กำปองมีอุณหภูมิเฉลี่ยรายสัปดาห์ในช่วงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 จนถึง เดือนมิถุนายน พ.ศ. 2565 อยู่ในช่วง 15 ถึง 26 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสำหรับการปลูกกาแฟพันธุ์อะราบิกา ในขณะที่สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอดมีอุณหภูมิเฉลี่ยเหมาะสมกับการปลูกกาแฟพันธุ์อะราบิกา เฉพาะในช่วงเดือน ธันวาคม ถึงประมาณกลางเดือนมีนาคม หลังจากนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยจะอยู่ในช่วงประมาณ 26 ถึง 30 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการปลูกกาแฟพันธุ์อะราบิกา จึงอาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต รสชาติ และกลิ่นของกาแฟได้

ข้อมูลปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในแต่ละพื้นที่

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในแต่ละพื้นที่รายสัปดาห์ สามารถแสดงผลได้ในรูปแบบกราฟ ดังนี้



ภาพที่ 114 แสดงผลข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายสัปดาห์ของแต่ละพื้นที่

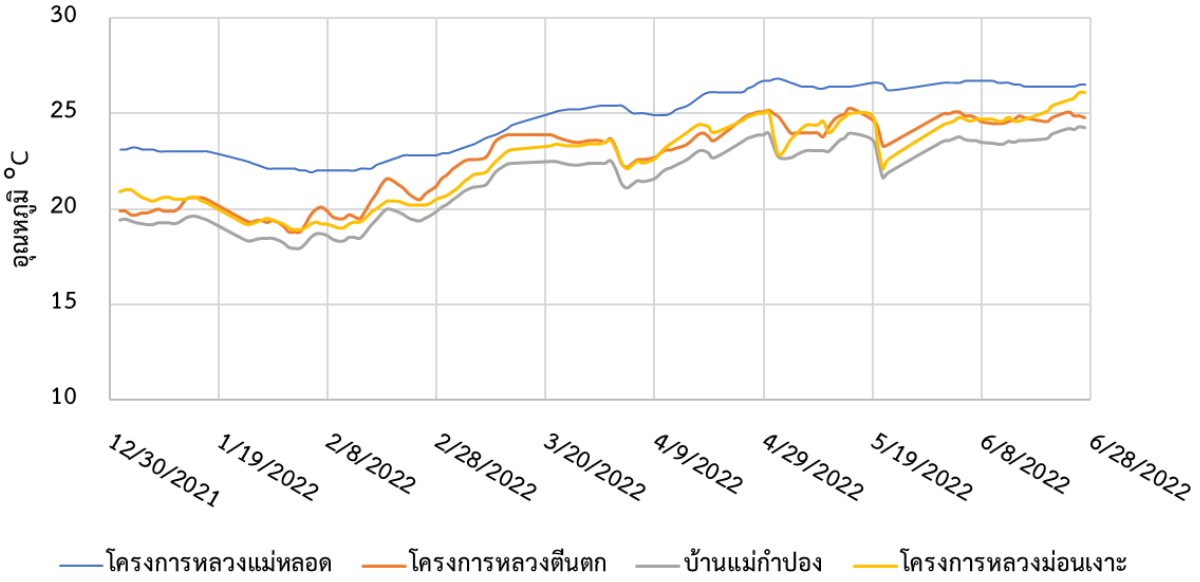
จากกราฟการวิเคราะห์ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายสัปดาห์ จะเห็นว่าสถานีที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเรียงลำดับจากมากไปน้อย เป็นดังนี้

1. สถานีวิจัยโครงการหลวงตีนตก ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 770 เมตร
2. สถานีบ้านแม่กำปอง ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,100 เมตร
3. สถานีวิจัยโครงการหลวงม่อนเงาะ ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,240
4. สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 680 เมตร

จากกราฟข้อมูลปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตั้งแต่เดือนธันวาคม พ.ศ. 2564 จนถึงเดือน มิถุนายน พ.ศ. 2565 จะเห็นว่า สถานีวิจัยโครงการหลวงตีนตก และหมู่บ้านแม่กำปองมีปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เหมาะสมสำหรับการปลูกกาแฟสายพันธุ์อะราบิกา คือ มีความชื้นสัมพันธ์มากกว่า 60% ในขณะที่ โครงการหลวงม่อนเงาะและสถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด มีปริมาณความชื้นสัมพันธ์ต่ำในบางเดือน คือ ปลายเดือนมกราคม และเดือนมีนาคม ตามลำดับ

ข้อมูลอุณหภูมิของดินเฉลี่ยรายสัปดาห์ในแต่ละพื้นที่

จากการวิเคราะห์ข้อมูลของปริมาณความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในแต่ละพื้นที่รายสัปดาห์ สามารถแสดงผลได้ในรูปแบบกราฟ ดังนี้



ภาพที่ 115 แสดงผลข้อมูลอุณหภูมิของดินเฉลี่ยรายสัปดาห์ของแต่ละพื้นที่

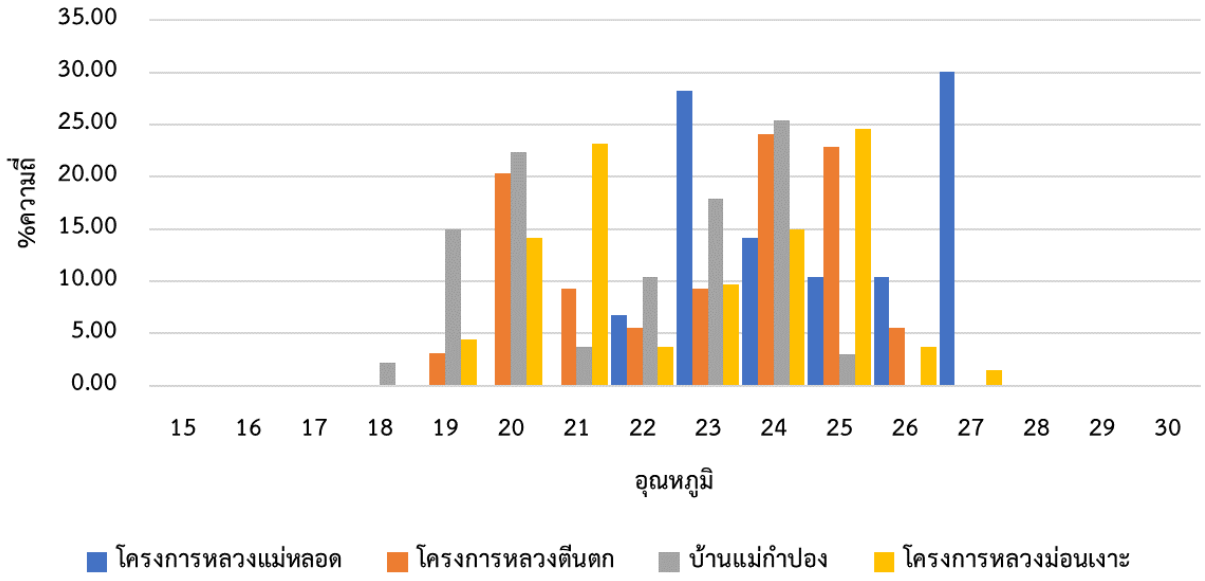
จากกราฟการวิเคราะห์ข้อมูลอุณหภูมิของดินเฉลี่ยรายวัน จะเห็นว่าสถานีที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเรียงลำดับจากมากไปน้อย เป็นดังนี้ คือ

1. สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 680 เมตร
2. สถานีวิจัยโครงการหลวงตีนตก ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 770 เมตร
3. สถานีวิจัยโครงการหลวงม่อนเงาะ ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,240
4. สถานีบ้านแม่กำปอง ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,100 เมตร

จากกราฟจะเห็นว่าอุณหภูมิของดินเฉลี่ยในแต่ละสถานีโดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชคือ น้อยกว่า 27 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามในปัจจุบันงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของอุณหภูมิของดินต่อการปลูกกาแฟสายพันธุ์อะราบิกา หรือสายพันธุ์อื่น ๆ ยังมีไม่มากนัก จึงไม่อาจจะวิเคราะห์ได้ว่าอุณหภูมิของดินมีผลกระทบต่อคุณภาพของกาแฟหรือไม่อย่างไร

ตารางที่ 22 แสดงความถี่ของอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงระยะเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล

อุณหภูมิ °C	โครงการหลวงแม่หลอด	โครงการหลวงตีนตก	บ้านแม่กำปอง	โครงการหลวงม่อนเงาะ
18	0.00	0.00	2.24	0.00
19	0.00	3.09	14.93	4.48
20	0.00	20.37	22.39	14.18
21	0.00	9.26	3.73	23.13
22	6.75	5.56	10.45	3.73
23	28.22	9.26	17.91	9.70
24	14.11	24.07	25.37	14.93
25	10.43	22.84	2.99	24.63
26	10.43	5.56	0.00	3.73
27	30.06	0.00	0.00	1.49

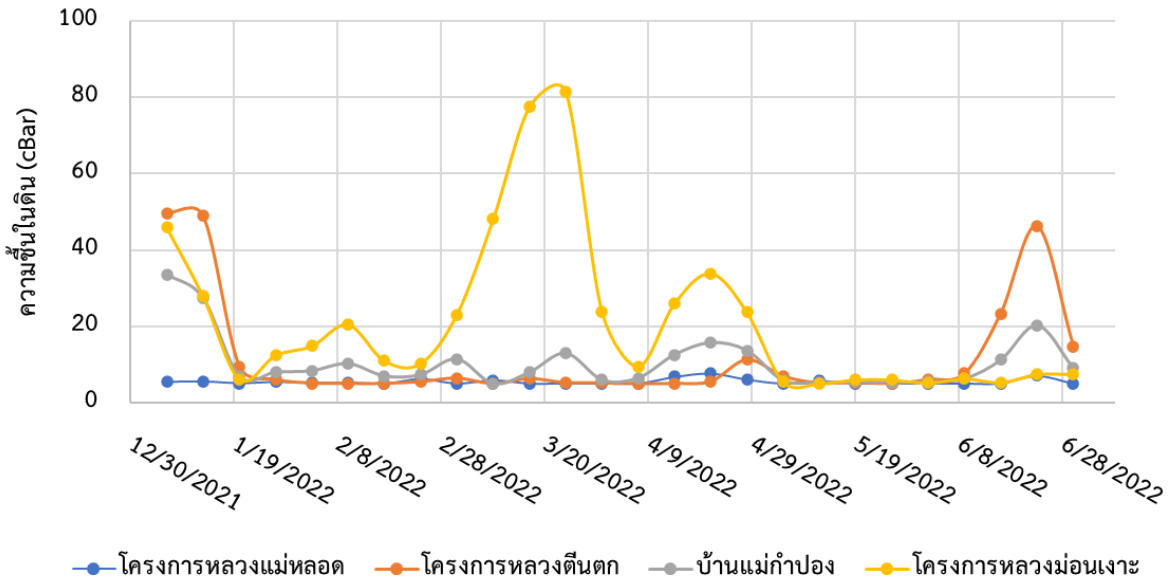


ภาพที่ 116 แสดงความถี่ของอุณหภูมิในแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าโครงการหลวงตีนตก บ้านแม่กำปอง และโครงการหลวงม่อนเงาะ มีอุณหภูมิส่วนใหญ่ต่ำกว่า 26 องศาเซลเซียส ตลอดช่วงระยะเวลาการเก็บบันทึกข้อมูล คิดเป็นประมาณ 90% ในขณะที่โครงการหลวงแม่หลอดมีอุณหภูมิสูงกว่า 26 องศาเซลเซียสคิดเป็นประมาณ 30% ตลอดช่วงเวลาที่มีการ

เก็บข้อมูล ซึ่งความแตกต่างของอุณหภูมิของพื้นที่เพาะปลูกในแต่ละพื้นที่นี้อาจจะส่งผลให้รสชาติและกลิ่นของกาแฟมีความแตกต่างกัน รวมถึงปริมาณผลผลิตก็อาจจะแตกต่างกันด้วย

ข้อมูลความชื้นในดินเฉลี่ยรายสัปดาห์ในแต่ละพื้นที่



ภาพที่ 117 แสดงข้อมูลความชื้นในดินเฉลี่ยรายสัปดาห์ในแต่ละพื้นที่

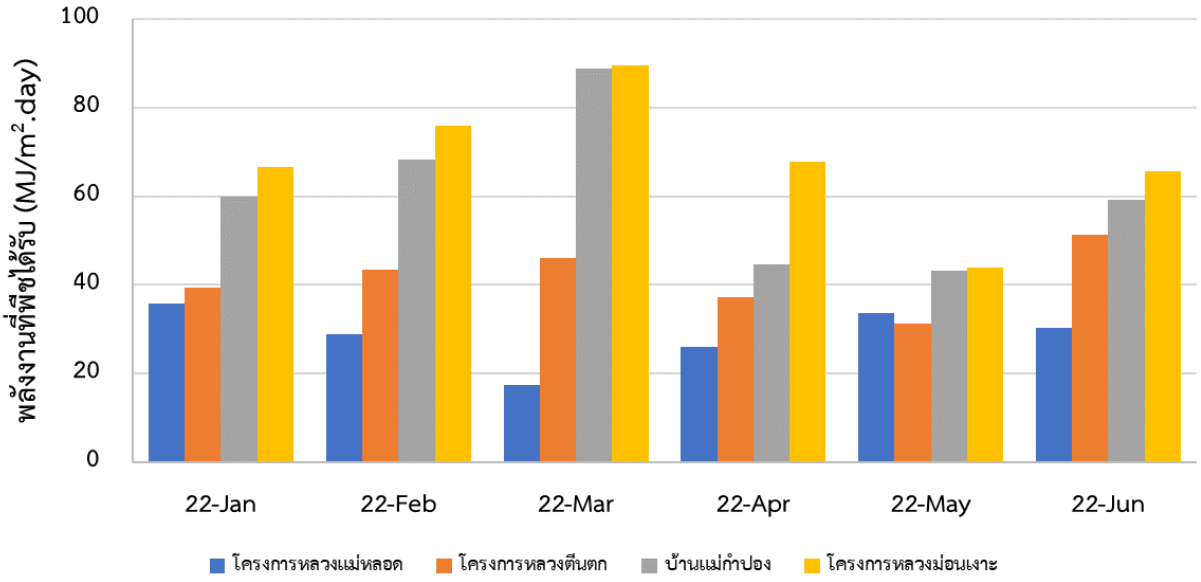
จากกราฟการวิเคราะห์ข้อมูลความชื้นของดินเฉลี่ยรายวัน จะเห็นว่าสถานีที่มีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเรียงลำดับจากมากไปน้อย เป็นดังนี้ คือ

1. สถานีวิจัยโครงการหลวงม่อนเงาะ ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,240
2. สถานีวิจัยโครงการหลวงตีนตก ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 770 เมตร
3. สถานีบ้านแม่กำปอง ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,100 เมตร
4. สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด ติดตั้งที่ความสูงจากระดับน้ำทะเล 680 เมตร

จากกราฟจะเห็นว่าความชื้นของดินเฉลี่ยของโครงการหลวงม่อนเงาะในช่วงเดือนมีนาคมมีค่าปริมาณความชื้นในดินมีค่ามากและเมษายนมีค่าต่ำกว่าค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่น เนื่องจากในช่วงเวลาเดียวกันบริเวณนั้นมีปริมาณฝนสะสมในพื้นที่ต่ำกว่าบริเวณอื่น ทำให้ความชื้นในดินลดลงต่ำกว่าปกติ ซึ่งกินระยะเวลายาวนานประมาณเกือบสองเดือน จึงอาจจะส่งผลต่อปริมาณผลผลิตของกาแฟ รวมถึงรสชาติด้วยก็เป็นได้ สำหรับในพื้นที่อื่นตลอดช่วงระยะเวลาการเก็บข้อมูลปริมาณความชื้นในดินอยู่ในระดับที่เหมาะสมกับการปลูกพืช แต่อย่างไรก็ตามอาจจะเนื่องมาจากจุดที่ติดตั้งสถานีในบางจุดมีการรดน้ำร่วมด้วย ข้อมูลนี้จึงอาจจะไม่สามารถแสดงถึงสภาพแวดล้อมจริงของการปลูกกาแฟในธรรมชาติของแต่ละพื้นที่ได้อย่างแม่นยำ การเปลี่ยนแปลงจุดติดตั้ง

หรือการเพิ่มสถานีเก็บข้อมูลในบริเวณอื่น อาจจะช่วยทำให้สามารถเก็บข้อมูลสภาพความชื้นในดินของการปลูกกาแฟจริงโดยชาวบ้านได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ซึ่งอาจจะสามารถทำได้ในการวิจัยต่อเนื่องในเฟสถัดไปในอนาคต

ข้อมูลปริมาณพลังงานแสงที่พืชได้รับรายเดือนในแต่ละพื้นที่



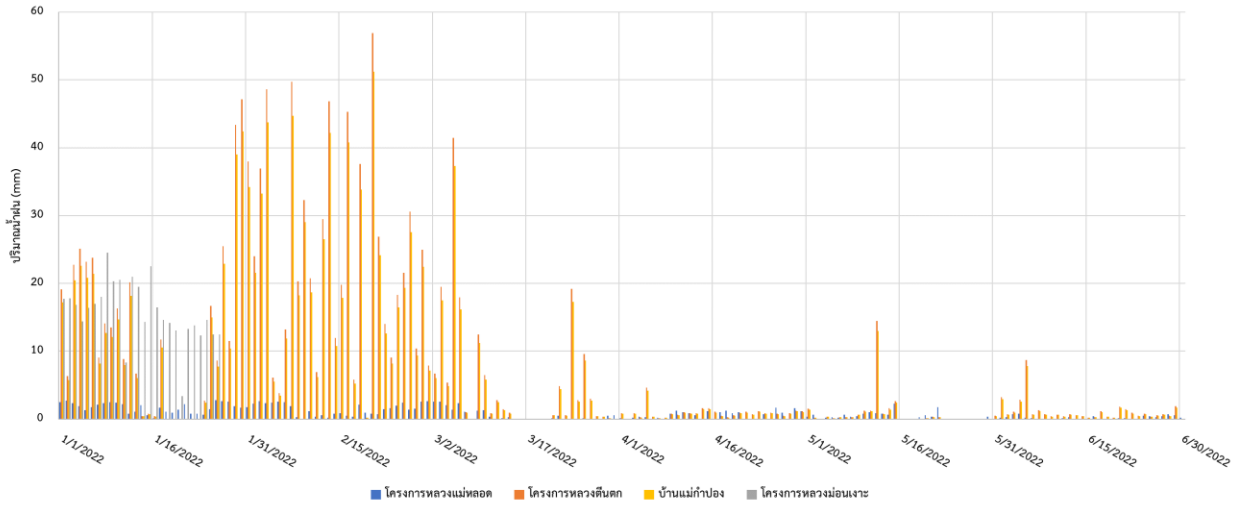
ภาพที่ 118 แสดงข้อมูลพลังงานสะสมที่พืชได้รับในแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บข้อมูล

จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าบริเวณโครงการหลวงม่อนเงาะ และบ้านแม่กำปอง มีปริมาณพลังงานที่พืชได้รับสะสมแต่ละเดือนมากกว่าบริเวณโครงการหลวงแม่หลอดและโครงการหลวงตีนตก โดยหากพิจารณาจากข้อมูลปริมาณพลังงานสะสมที่พืชได้รับในแต่ละวันพบว่าโครงการหลวงม่อนเงาะเป็นบริเวณที่ได้ พืชได้รับปริมาณพลังงานสะสมเฉลี่ยมากที่สุด และถัดลงมาคือ บ้านแม่กำปอง โครงการหลวงตีนตก และโครงการหลวงแม่หลอดตามลำดับ ซึ่งปริมาณพลังงานที่พืชได้รับนี้อาจจะมีผลต่อผลผลิตของกาแฟ รวมไปถึงรสชาติที่อาจจะมีความแตกต่างกันโดยการศึกษาด้วยหลักการจมูกอิเล็กทรอนิกส์จะสามารถบอกความสัมพันธ์ของสภาพแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ ถึงรสชาติของกาแฟได้ในรายงานหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 23 แสดงปริมาณพลังงานที่พืชได้รับต่ำสุดและสูงสุดในแต่ละวันของแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล

สภาพแวดล้อม	โครงการหลวงแม่หลอด	โครงการหลวงตีนตก	บ้านแม่กำปอง	โครงการหลวงม่อนเงาะ
ปริมาณพลังงานที่พืชได้รับ	5 – 13 $MJ/m^2.day$	7 – 14 $MJ/m^2.day$	4 – 15 $MJ/m^2.day$	5 – 25 $MJ/m^2.day$

ข้อมูลปริมาณฝนสะสมรายเดือนในแต่ละพื้นที่



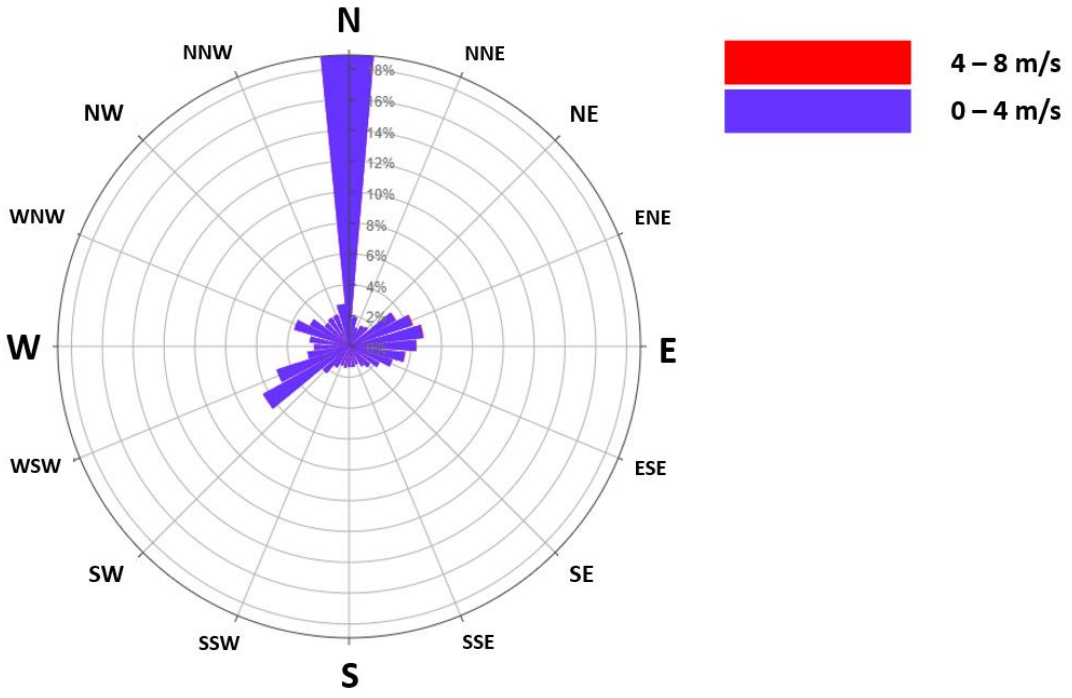
ภาพที่ 119 แสดงปริมาณน้ำฝนสะสมรายวันของแต่ละพื้นที่ตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล

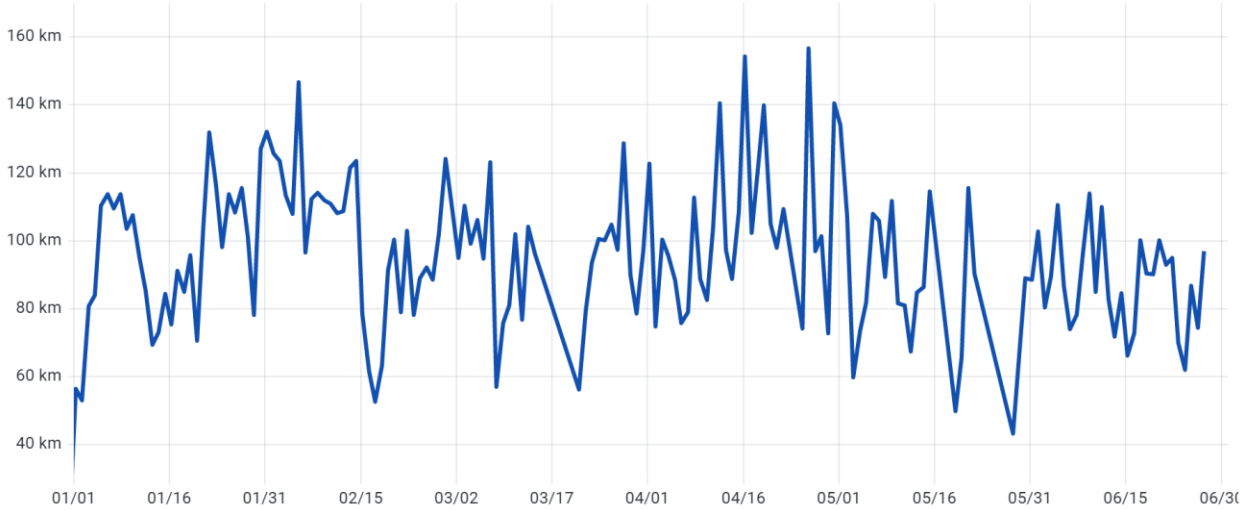
ตารางที่ 24 แสดงปริมาณน้ำฝนสะสมตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บข้อมูลของแต่ละพื้นที่

สภาพแวดล้อม	โครงการหลวงแม่หลอด	โครงการหลวงตีนตก	บ้านแม่กำปอง	โครงการหลวงม่อนเงาะ
ปริมาณนฝนสะสม	800 – 900 มม.	1,200 – 1,400 มม.	1,200 – 1,400 มม.	1,100 – 1,200 มม.

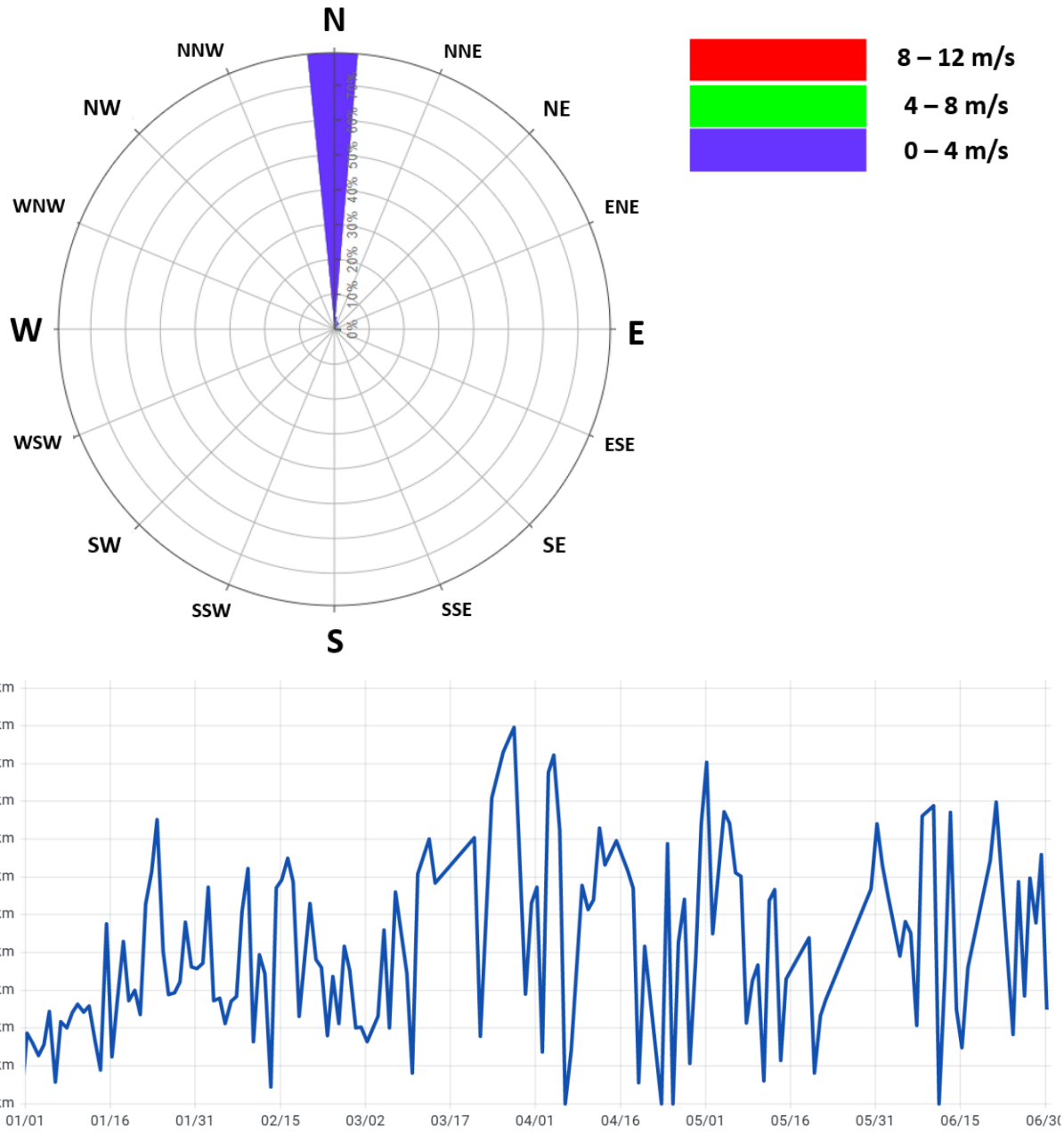
จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าปริมาณฝนสะสมรายวันบริเวณตีนตกและหมู่บ้านแม่กำปองมีปริมาณฝนมากกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณโครงการหลวงแม่หลอดและโครงการหลวงม่อนเงาะ ซึ่งสำหรับข้อมูลของโครงการหลวงม่อนเงาะถ้าสังเกตจากกราฟปริมาณฝนสะสมรายวันในช่วงเดือนมีนาคมจะมีความสอดคล้องกับข้อมูลปริมาณความชื้นในดินที่มีค่าต่ำเนื่องจากมีปริมาณฝนตกค่อนข้างน้อยในช่วงเวลาดังกล่าว สอดคล้องกับปริมาณความชื้นในดิน

ข้อมูลทิศทางกระแสลมและความเร็วลมเฉลี่ยในแต่ละพื้นที่

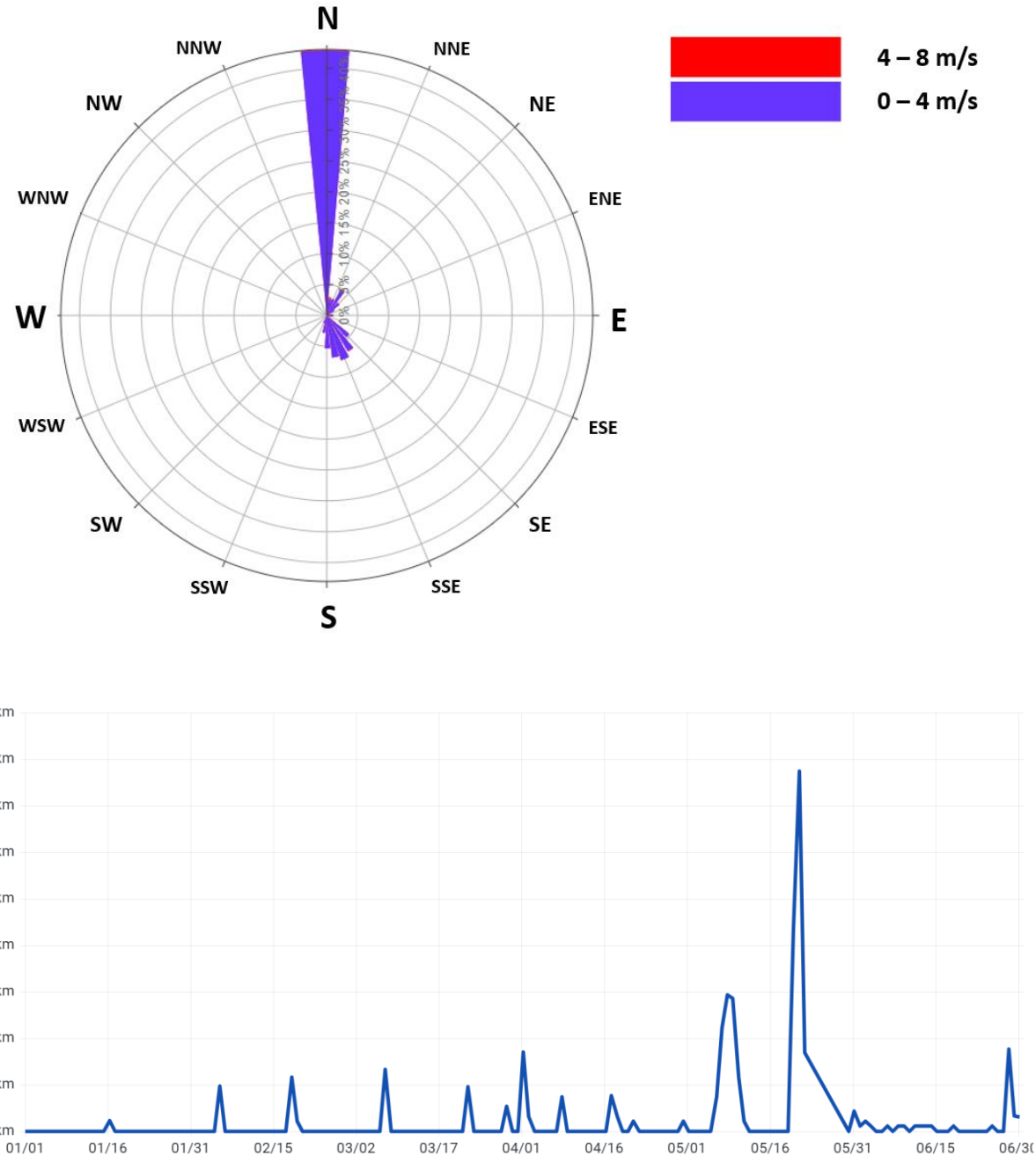




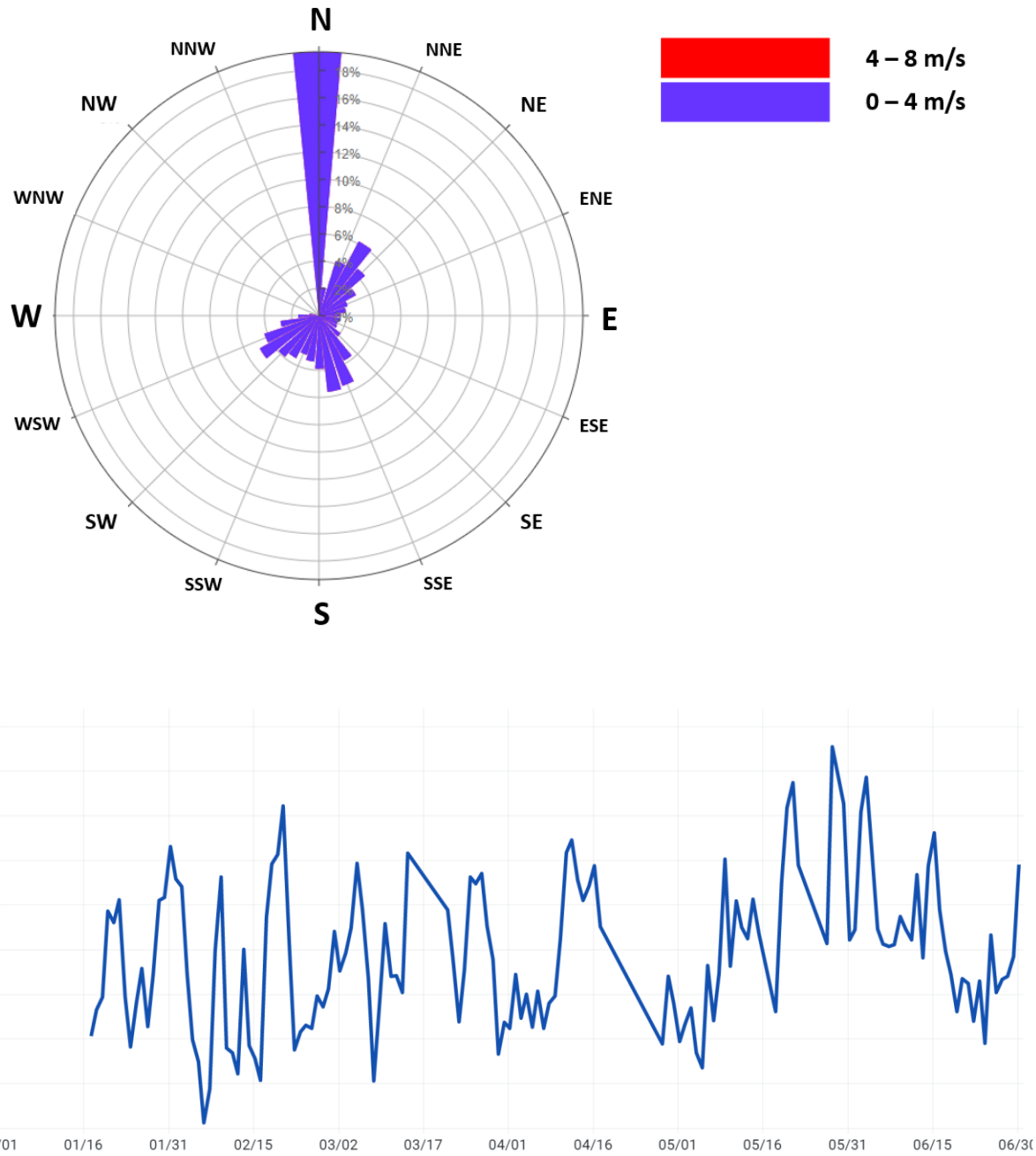
ภาพที่ 120 แสดงข้อมูลทิศทางลมของสถานีโครงการหลวงม่อนเงาะตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 121 แสดงข้อมูลทิศทางลมของสถานีโครงการหลวงแม่หลอดตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 122 แสดงข้อมูลทิศทางลมของสถานีโครงการหลวงตีนตกตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 123 แสดงข้อมูลทิศทางลมของสถานีบ้านแม่กำปองตลอดช่วงเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล

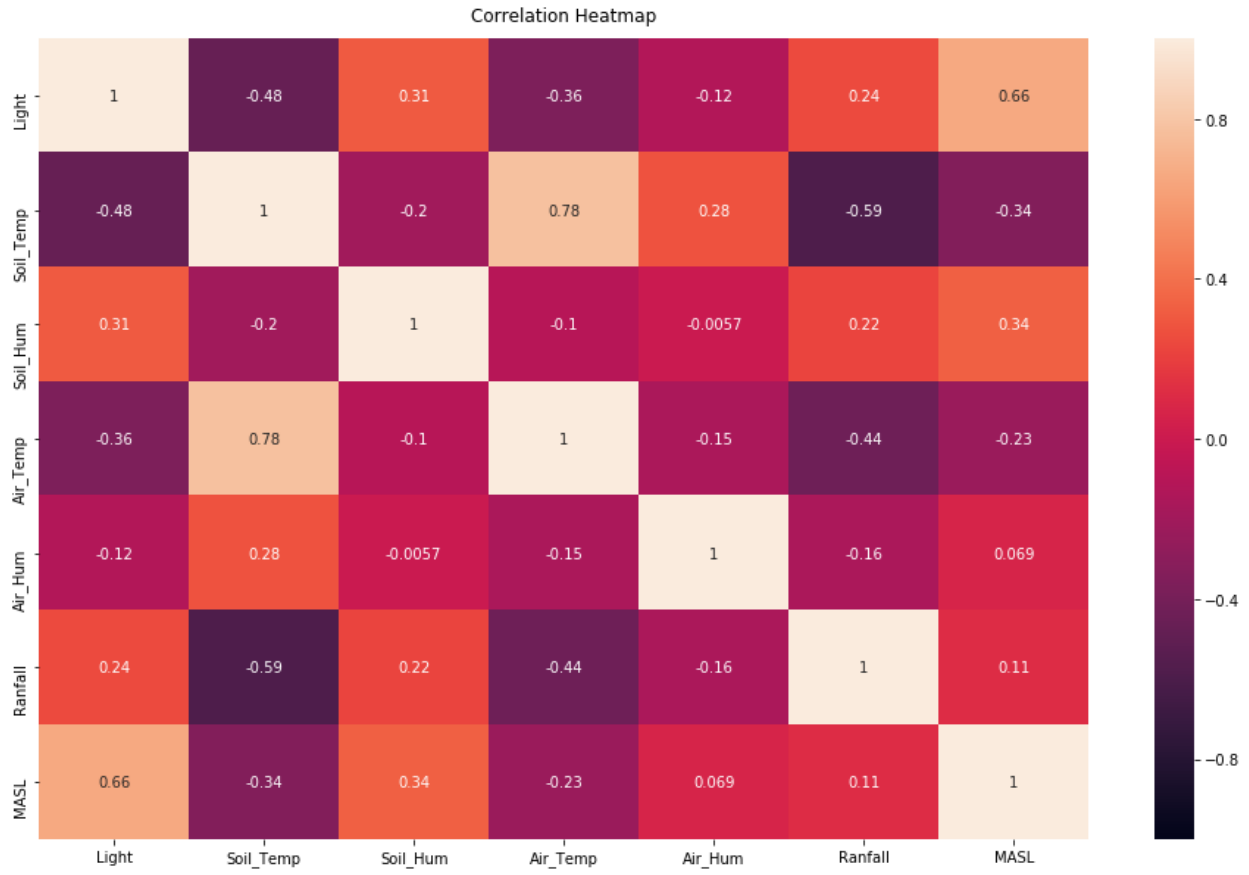
จากกราฟจะสังเกตเห็นว่าในแต่ละพื้นที่มีทิศทางลมเฉลี่ยคล้ายกัน จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่สถานีสามารถเก็บบันทึกได้พบว่า จุดติดตั้งสถานีทั้ง 4 จุด มีทิศทางลมโดยเฉลี่ยส่วนใหญ่พัดมาจากทิศเหนือตลอดช่วงระยะเวลาที่มีการเก็บบันทึกข้อมูล โดยสถานีโครงการหลวงม่อนเงาะ และหมู่บ้านแม่กำปอง มีลมจากทิศอื่นพัดเข้ามามากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสถานีโครงการหลวงตีนตก และสถานีโครงการหลวงแม่หลอด การวิเคราะห์ข้อมูลทิศทางลมรวมถึงความเร็วลมร่วมกันจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการเจริญเติบโตและสุขภาพ

ของต้นกาแฟได้ ซึ่งเป็นส่วนที่นอกเหนือจากเป้าหมายหลักของงานวิจัยในครั้งนี้ แต่ก็แสดงให้เห็นว่าสถานีเซนเซอร์ไอโอทีที่ถูกพัฒนาขึ้นในโครงการนี้สามารถนำไปต่อยอดเพื่อใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพในการเพาะปลูกทั้งการปลูกกาแฟเองหรือพืชชนิดต่าง ๆ ได้ในอนาคต

4.1.5 การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ของตัวแปรต่าง ๆ

ค่า Pearson Correlation เป็นวิธีทางสถิติที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูลมากที่สุดวิธีหนึ่ง เนื่องจากเป็นวิธีที่เข้าใจง่ายและสามารถคำนวนได้ไม่ยาก โดยค่า Pearson Correlation จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 ซึ่งหากมีค่าใกล้ -1.0 หมายความว่าตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในเชิงตรงกันข้าม หากมีค่าใกล้ +1.0 หมายความว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในทิศทางเดียวกัน และหากมีค่าเป็น 0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยการหาค่า Pearson Correlation พบว่าข้อมูลสภาพแวดล้อมของพื้นที่ต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปต่อไปนี้



ภาพที่ 124 แสดง Correlation Heatmap ของตัวแปรสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

จากรูปแผนภูมิความร้อนแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เทียบกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล สามารถสรุปได้ดังนี้

• ปริมาณแสง ปริมาณความชื้นในดิน ที่ต้นกาแฟได้รับมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล กล่าวคือ ยิ่งความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของพื้นที่ปลูกกาแฟมาก ปริมาณแสงที่กาแฟได้รับและปริมาณความชื้นในดินยิ่งมีค่ามากตามไปด้วย

• อุณหภูมิในอากาศ และอุณหภูมิในดิน มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล กล่าวคือ ยิ่งความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของพื้นที่ปลูกกาแฟมาก อุณหภูมิในอากาศ และอุณหภูมิในดินมีแนวโน้มที่จะลดลง

• ปริมาณฝน และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ มีความสัมพันธ์น้อยเมื่อเทียบกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของพื้นที่ปลูกกาแฟตามจุดต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เทียบกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลทำให้พบว่า ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่อาจจะมีผลต่อคุณภาพของกาแฟที่ระดับความสูงเหนือน้ำทะเลแตกต่างกันอาจจะมาจาก ปริมาณแสง ปริมาณความชื้นในดิน อุณหภูมิของอากาศ และอุณหภูมิในดิน ซึ่งสามารถนำไปศึกษาต่อเพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้เทียบกับคุณภาพและรสชาติของกาแฟในบทถัดไป

4.1.6 ต้นทุนของอุปกรณ์เซนเซอร์ไอโอที

ในการวิเคราะห์ต้นทุนของระบบเซนเซอร์ไอโอทีที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้นั้นสามารถสรุปข้อมูลต้นทุนของอุปกรณ์ ระบบเครือข่ายการรับส่งข้อมูล ระบบฐานข้อมูล และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งได้ ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 25 แสดงข้อมูลโครงสร้างต้นทุนของระบบเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับไร่กาแฟอัจฉริยะ

รายการ	**ราคาต้นทุน/หน่วย (บาท)**
1. เซนเซอร์ตรวจวัดลม	9,500
2. เซนเซอร์ตรวจวัดพลังงานแสงอาทิตย์	5,500
3. เซนเซอร์ตรวจวัดปริมาณน้ำฝน	7,500
4. เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ	1,200
5. อุปกรณ์ป้องกันเซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ	1,500
6. เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิของดิน	500
7. เซนเซอร์ตรวจวัดปริมาณความชื้นในดิน	1,200
8. เมนบอร์ด	4,500
9. ตู้ควบคุม	1,500
10. โมดูล IoT	2,000
11. แผงโซล่าเซลล์	850

12. ตัวควบคุมการชาร์จ Solar Cell	650
13. แบตเตอรี่	550
14. เสาและฐาน	12,000
15. อุปรกร์สำหรับติดตั้งอื่นๆ	1,000
ราคารวมอุปกรณ์	49,950
ค่าติดตั้งและดำเนินงาน (10% ของราคาอุปกรณ์)	5,000
ค่าเช่า Server (ต่อปี)	4,000
รวมต้นทุนทั้งหมด	58,950 ปัดเป็น 60,000

**ราคาต้นทุนคำนวณเมื่อวันที่ 15 มกราคม 2566 โดยราคาอาจมีความคลาดเคลื่อนหรือเปลี่ยนแปลง*

จากตารางจะเห็นว่าต้นทุนของอุปกรณ์และการติดตั้งต่อสถานีจะมีราคาอยู่ที่ประมาณ 60,000 ซึ่งเป็นราคาที่ถูกคำนวณจากการอ้างอิงในกรณีที่ต้องการสร้างอุปกรณ์เพียงหนึ่งสถานี อย่างไรก็ตาม ราคาต้นทุนต่อสถานีสามารถลดลงได้จากปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- การสร้างอุปกรณ์ในปริมาณมาก ทำให้ต้นทุนราคาค่าเซนเซอร์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อชิ้นลดลงตามปริมาณการสั่งซื้อ โดยสามารถลดลงได้มากถึง 10-15% ในกรณีที่มีการสั่งในปริมาณที่มาก
- ราคาฐานและเสาอุปกรณ์สามารถลดลงได้ในกรณีที่มีการสั่งซื้อในปริมาณมาก
- ค่าเช่า server เป็นค่าใช้จ่ายที่จ่ายเพียงครั้งเดียว และสามารถใช้งานร่วมกันได้หลายสถานี ในส่วนนี้จึงมองว่าหากสามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ในปริมาณเยอะจะมีความคุ้มค่ากับการใช้งาน เนื่องจากในเบื้องต้นได้ออกแบบให้สามารถรองรับสถานีได้สูงสุดถึง 500 สถานี

จากปัจจัยที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าในกรณีที่มีการลงทุนสร้างอุปกรณ์มากกว่า 20 สถานีขึ้นไป จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนของต้นทุนได้อีกประมาณ 10-15% ซึ่งจะทำให้ราคาต้นทุนของสถานีจะอยู่ที่ประมาณ 51,000 – 54,000 บาทต่อสถานี ซึ่งทีมวิจัยมีความเห็นว่าเป็นราคาที่หน่วยงานของรัฐ เช่น สถานีวิจัยโครงการหลวงในพื้นที่ต่าง ๆ สามารถตั้งงบประมาณในการซื้ออุปกรณ์ได้ เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาปัจจัย และสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการเพาะปลูก เพื่อจะได้นำไปเผยแพร่ให้กับเกษตรกรได้ต่อไป

4.2 ผลการดำเนินงานของเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์

4.2.1 การทดลองตรวจวัดกลิ่นกาแฟด้วยเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์ และผลการทดลอง

จากการสำรวจพื้นที่ไร่กาแฟของวิสาหกิจชุมชน ผู้ประกอบการ และสถานที่วิจัยโครงการหลวงที่ระดับความสูงต่าง ๆ ทั้งหมดจำนวน 7 แห่งในอำเภอดอยสะเก็ด อำเภอแม่ออน และอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ทาง

คณะวิจัยได้นำตัวอย่างเมล็ดกาแฟคั่วบดจากแต่ละพื้นที่มาตรวจวิเคราะห์กลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์กลิ่นตัวอย่างกาแฟ ดังนี้

1. เพื่อเปรียบเทียบกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบด (Coffee Beans) จากพื้นที่ปลูกกาแฟที่แตกต่างกัน
2. เพื่อเปรียบเทียบกลิ่นของกาแฟแบบผง (Coffee Powder) จากพื้นที่ปลูกกาแฟที่แตกต่างกัน
3. เพื่อเปรียบเทียบกลิ่นของกาแฟแบบชง (Brewed Coffee) จากพื้นที่ปลูกกาแฟที่แตกต่างกัน
4. เพื่อศึกษาความสามารถในการวิเคราะห์และจำแนกกลิ่นของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ โดยการเปรียบเทียบกลิ่นตัวอย่างกาแฟทั้ง 3 รูปแบบ

ตารางที่ 26 แสดงข้อมูลไร่กาแฟ ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเล และระดับการคั่วที่แตกต่างกัน

	ไร่ปลูกกาแฟ	ระดับน้ำทะเล (เมตร)	ระดับคั่วกลาง	ระดับคั่วเข้ม
1	วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง (อ.ดอยสะเก็ด)	563	-	-
2	วิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ (อ.ดอยสะเก็ด)	1126	115°C	123°C
3	กลุ่มวิสาหกิจชุมชนกาแฟสดบ้านแม่ตอน (อ.ดอยสะเก็ด)	1148	200-250°C (26 min.)	200-250°C (28 min.)
4	กลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง (อ.แม่ออน)	1232	230-235°C	-
5	กลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกา แม่กำปอง (อ.แม่ออน)	1140	180°C (30 min.)	190°C
6	สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด	692	ไม่มีตัวอย่าง	ไม่มีตัวอย่าง
7	กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ (อ.แม่แตง)	890	200-250°C	200-250°C

จากตารางข้อมูลไร่กาแฟ พบว่าไร่กาแฟแต่ละแห่งตั้งอยู่บนพื้นที่ที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลแตกต่างกัน ตั้งแต่ 563-1232 เมตร อีกทั้งสภาวะในการคั่ว (อุณหภูมิ เวลา ฯลฯ) ของเมล็ดกาแฟคั่วบดจากแต่ละพื้นที่ยังมีความแตกต่างกัน ซึ่งนับเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตลักษณ์ของกาแฟแต่ละชนิด ในการศึกษา อัตลักษณ์ของกาแฟ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องกลิ่น รสชาติ ฯลฯ ซึ่งเป็นการทดสอบโดยใช้ประสาทสัมผัสของมนุษย์ จึงควรมีเครื่องมือที่มีความแม่นยำและสามารถวัดค่าต่าง ๆ เหล่านี้ออกมาเป็นตัวเลขได้ (Digitization) ยกตัวอย่างเช่น เทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์ ที่ทางคณะวิจัยจะนำมาใช้วิเคราะห์กลิ่นของกาแฟในโครงการฯ นี้

4.2.2 วิธีการทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ภาพที่ 125 แสดงการจัดการทดลองวัดกลิ่นตัวอย่างด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

ประกอบไปด้วย

(1) เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

(2) ท่อสายยางที่ใช้ในการเก็บกลิ่นตัวอย่าง โดยการดูดอากาศบริเวณรอบ ๆ ผ่านปั๊มลม

(3) Zero Grade Air ที่บรรจุอยู่ในถัง สำหรับเป็น Reference Gas และ Carrier Gas

(4) เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรับข้อมูลสัญญาณจากเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ และการแปลผลข้อมูลสัญญาณกลิ่น

1) วัตถุดิบ

กาแฟคั่วบดจากแหล่งเพราะปลูกกาแฟจำนวน 6 แห่ง จากอำเภอดอยสะเก็ด อำเภอแม่ออน และอำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่

ตารางที่ 27 แสดงพื้นที่ปลูกกาแฟ ข้อมูลระดับน้ำทะเล และระดับการคั่วที่แตกต่างกัน

	พื้นที่ปลูกกาแฟ	**ระดับน้ำทะเล (เมตร)**	**คั่วกลาง**	**คั่วเข้ม**
1	วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง	563	n/a	n/a
2	วิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ	1126	115°C	123°C
3	กลุ่มวิสาหกิจชุมชนกาแฟสดบ้านแม่ตอน	1148	200-250°C (26 min.)	200-250°C (28 min.)
4	กลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง	1232	230-235°C	n/a
5	กลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกา แม่กำปอง	1140	180°C (30 min.)	190°C
6	สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด	692	ไม่มีตัวอย่าง	ไม่มีตัวอย่าง
7	กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์	890	200-250°C	200-250°C

ตารางที่ 28 แสดงตัวอย่างกาแฟที่ใช้ในการทดสอบกลิ่น จากพื้นที่ปลูกกาแฟในจังหวัดเชียงใหม่

		ปริมาณที่ใช้ (กรัม)		
ไร่	**ระดับคั่วกลาง**	**เมล็ดกาแฟ**	**กาแฟผง**	**กาแฟชง**
1	วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง (อ.ดอยสะเก็ด)	10 g	10 g	50 ml (18 g)
2	วิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ (อ.ดอยสะเก็ด)	ไม่มีตัวอย่าง		
3	กลุ่มวิสาหกิจ*ชุมชน*กาแฟสดบ้านแม่ตอน (อ.ดอยสะเก็ด)	10 g	10 g	50 ml (18 g)
4	กลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง (อ.แม่ออน)	10 g	10 g	50 ml (18 g)
5	กลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกา แม่กำปอง (อ.แม่ออน)	10 g	10 g	50 ml (18 g)
6	สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด (อ.แม่แตง)	ไม่มีตัวอย่าง		
7	กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์	10 g	10 g	50 ml (18 g)
	ระดับคั่วเข้ม	**เมล็ดกาแฟ**	**กาแฟผง**	**กาแฟชง**
1	วิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง (อ.ดอยสะเก็ด)	10 g	10 g	50 ml (18 g)
2	วิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ (อ.ดอยสะเก็ด)	10 g	10 g	50 ml (18 g)

3	กลุ่มวิสาหกิจ*ชุมชน*กาแฟสดบ้านแม่ตอน (อ.ดอยสะเก็ด)	10 g	10 g	50 ml (18 g)
4	กลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง (อ.แม่ออน)	10 g	10 g	50 ml (18 g)
5	กลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกา แม่กำปอง (อ.แม่ออน)	10 g	10 g	50 ml (18 g)
6	สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด (อ.แม่แตง)	ไม่มีตัวอย่าง		
7	กาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ (อ.แม่แตง)	10 g	10 g	50 ml (18 g)

ภาพที่ 126 แสดงตัวอย่างกาแฟที่ใช้ในการทดสอบกลิ่น

2) อุปกรณ์

- เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง
- ขวดแก้ว ขนาด 100 มิลลิลิตร
- เครื่องบดกาแฟ
- เครื่องชงกาแฟ
- เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ E-Nose MU
- ถังแก๊ส Air Zero
- เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)

-

3) การเตรียมตัวอย่างสำหรับทดสอบกลิ่น

3.1) การทดสอบเมล็ดกาแฟคั่วบด

- ชั่งตัวอย่างเมล็ดกาแฟ 10 กรัม ใส่ขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร และปิดฝาให้มิดชิด

3.2) การทดสอบผงกาแฟ

- ชั่งตัวอย่างเมล็ดกาแฟ 10 กรัม
- บดเมล็ดกาแฟ โดยใช้เครื่องบดเมล็ดกาแฟ
- นำตัวอย่างใส่ขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร และปิดฝาให้มิดชิด

3.3) การทดสอบกาแฟแบบชง

- ชั่งตัวอย่างเมล็ดกาแฟ 18 กรัม
- บดเมล็ดกาแฟให้ละเอียด โดยใช้เครื่องบดเมล็ดกาแฟ
- ชงกาแฟปริมาณ 50 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องชงกาแฟ
- นำตัวอย่างใส่ขวดแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร และปิดฝาให้มิดชิด
- วัดอุณหภูมิของกาแฟให้ได้ 60 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปทดสอบกลิ่นโดยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์
- วัดอุณหภูมิของกาแฟหลังทำการทดสอบกลิ่นโดยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

ภาพที่ 127 แสดงตัวอย่างกาแฟที่ใช้ในการทดสอบกลิ่นทั้ง 3 แบบ

4) การทดสอบกลิ่นของกาแฟด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

- นำขวดแก้วที่บรรจุตัวอย่างต่อกับท่อรับกลิ่นของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์
- ตั้งค่าการดูดอากาศเปรียบเทียบ (Reference Air) 3 นาที
- ตั้งค่าการดูดอากาศในขวดทดสอบ (Sample) 1 นาที
- ตั้งค่ารอบการทำงาน (Circle) 1 รอบ
- กำหนดค่า Flow Rate 1 ลิตรต่อนาที
- เครื่องจะทำงานโดยปั๊มลมเข้าไปยังเซนเซอร์เพื่อกำจัดกลิ่นที่มีอยู่ในระบบออกไปก่อน

- จากนั้นปั๊มจะดูดอากาศจากขวดตัวอย่างเข้าระบบ กลิ่นจะถูกดูดจากขวดที่บรรจุตัวอย่างไปยังเซนเซอร์รับกลิ่นทั้ง 8 ตัว
- เมื่อเสร็จสิ้นโปรแกรมจะบันทึกผลข้อมูลในการวิเคราะห์ผลต่อไป
- เมื่อตรวจวัดกลิ่นเสร็จสิ้นทุกตัวอย่างแล้ว เลือกเมนู Analysis ที่หน้าต่าง Control Center
- เลือกโปรแกรม PCA และเลือกไฟล์ผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง
- เลือกค่า Offset โดยตั้งค่าเท่ากับ 0 แล้วกดปุ่ม Start
- โปรแกรมจะวิเคราะห์ข้อมูลและจัดกลุ่มด้วยวิธี Principle Component Analysis (PCA)
- เลือกโปรแกรม Sensing Response Plot และเลือกไฟล์ผลการวิเคราะห์ตัวอย่าง

5) พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 29 แสดงสภาวะการวิเคราะห์เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ ยี่ห้อ E-Nose MU

สภาวะการวิเคราะห์	**เมล็ดกาแฟ**	**ผงกาแฟ**	**กาแฟชง**
ปริมาณตัวอย่าง	10 กรัม	10 กรัม	18 กรัม (50 มล.)
อุณหภูมิของตัวอย่าง	25°C	25°C	60°C
Reference time	3 นาที	3 นาที	3 นาที
Sample time	1 นาที	1 นาที	1 นาที
Flow rate	1 ลิตร/นาที	1 ลิตร/นาที	1 ลิตร/นาที

4.2.3 ผลการวิเคราะห์กลิ่นเบื้องต้น

เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์จะตอบสนองต่อกลิ่น และแปลผลของกลิ่นนั้นออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ได้ 2 วิธีดังนี้

(1) อัตราการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์รายหัวต่อกลิ่นของสถานที่นั้น ๆ (Sensor Response)

(2) การวิเคราะห์ความแตกต่างของคุณลักษณะของกลิ่นแต่ละสถานที่ด้วยวิธี Principal Component Analysis (PCA)

โดยเครื่อง Electronic Nose ที่ใช้ในการทดลองนี้ มีรายละเอียดของแก๊สเซนเซอร์ที่ใช้ดังนี้

ตารางที่ 30 แสดงข้อมูลเบื้องต้นของแก๊สเซนเซอร์แต่ละชนิดในเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

Sensor	Target Gas
1	Combustible Gases
2	Ammonia (Low concentration)
3	Organic Solvent Vapor
4	Air Contaminant 2
5	Iso-Butane, Ammonia, Ethanol
6	Methyl mercaptan and Trimethyl amine
7	LP Gas
8	Solvent Vapor

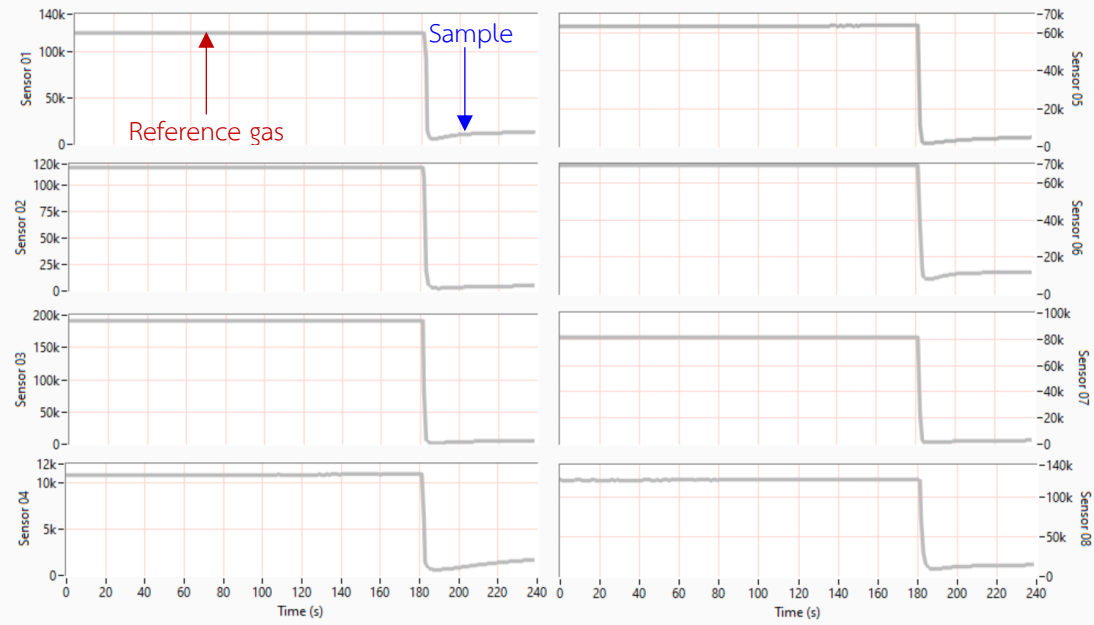
โดยทั่วไปแล้วการทดสอบอัตราการตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละหัว จะใช้ผลต่างของความต้านทานของเซนเซอร์แต่ละหัวที่ทำปฏิกิริยากับกลิ่นและความต้านทานของเซนเซอร์ในสภาวะอากาศบริสุทธิ์ ตามสมการที่ (1)

$$R_{\%change} = \frac{(R_0 - R)}{R_0} \times 100 \qquad (1)$$

โดยที่ $R_{\%change}$ คือ อัตราการตอบสนองของเซนเซอร์

R_0 คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ขณะวัดกลิ่น Reference

R คือ ค่าความต้านทานของเซนเซอร์ขณะวัดกลิ่น Sample



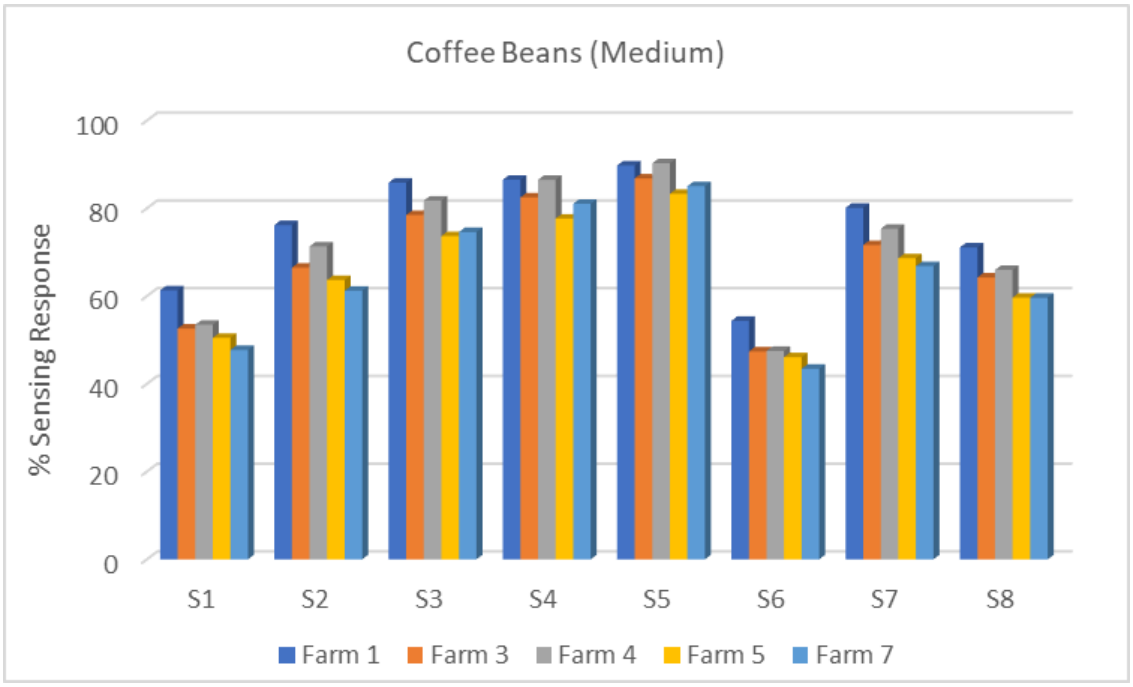
ภาพที่ 128 แสดงสัญญาณเปลี่ยนแปลงเอาต์พุตของเซนเซอร์ที่ได้จากการทดสอบตัวอย่างกาแฟ

<u>Principal Component Analysis (PCA)</u>

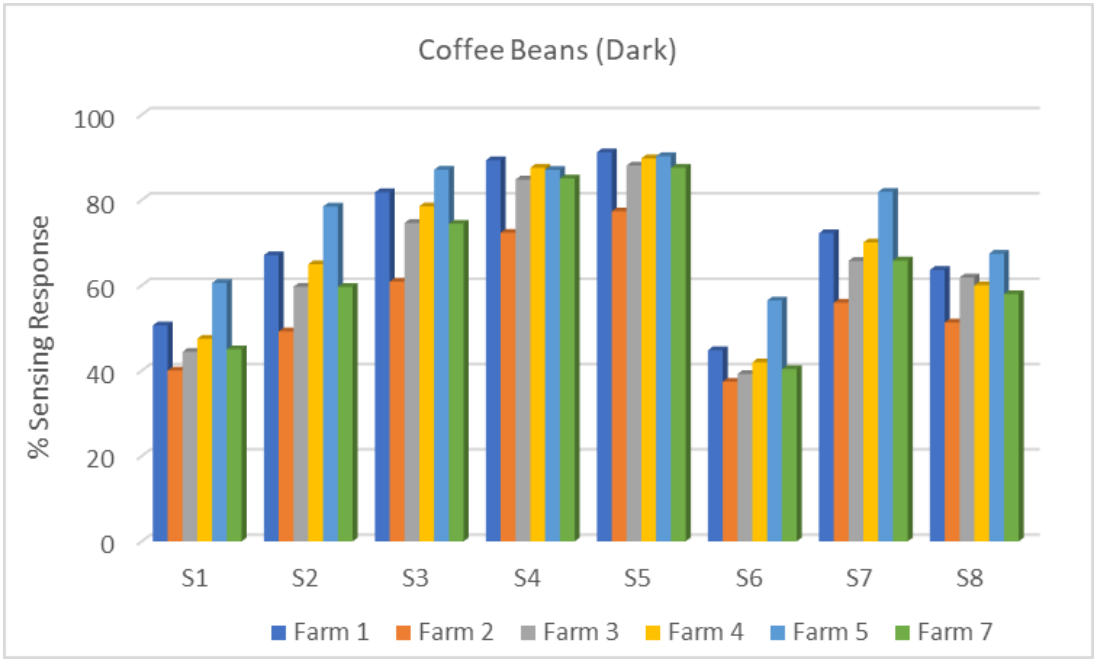
การวิเคราะห์ผลการวัดกลิ่นจากเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีทางสถิติ Principal Component Analysis (PCA) เป็นการเปรียบเทียบลักษณะข้อมูลการตอบสนองต่อกลิ่นของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการวัดกลิ่นกาแฟแบบคั่วกลางและกาแฟแบบคั่วเข้ม ซึ่งวิธีดังกล่าวเป็นการนำข้อมูลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อกลิ่นมาคำนวณและพล็อตออกมาเป็นกราฟแบบ 2 มิติ โดยทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูลกลิ่นระหว่าง Component ต่าง ๆ คือ PC1 vs PC2 (Component 1 vs Component 2), PC2 vs PC3 และ PC3 vs PC1 ซึ่งการวิเคราะห์ชุดข้อมูลด้วยวิธีดังกล่าวสามารถบอกได้ว่ากลิ่นของแต่ละตัวอย่างมีความเหมือนหรือแตกต่างกันมากแค่ไหน โดยแต่ละจุดที่เกิดขึ้นในกราฟของแต่ละสี คือจำนวนข้อมูลของการวัดซ้ำ (Cycle) และข้อมูลของตัวอย่างเดียวกันจะอยู่ในวงกลมสีเดียวกัน หากวงกลมของแต่ละสีมีการตัดกันหรือใกล้เคียงกัน หมายความว่าชุดข้อมูลนั้น ๆ จะมีความคล้ายคลึงกัน

1) ผลการวิเคราะห์กลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบด (Coffee Beans)

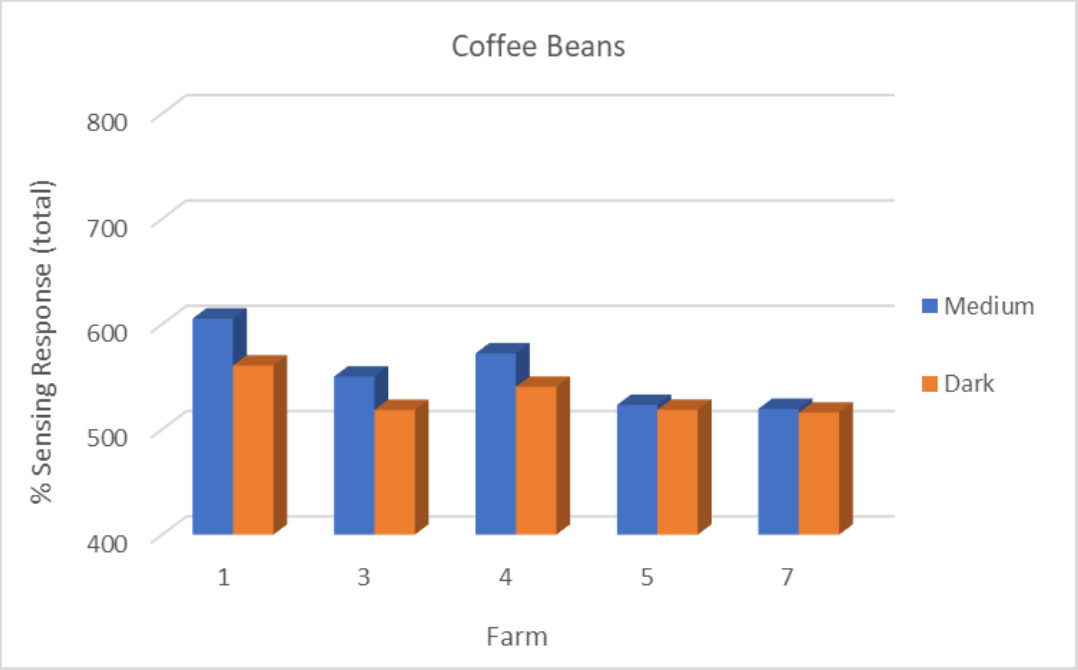
เมล็ดกาแฟคั่วบดจากแหล่งเพาะปลูกทั้ง 6 แหล่ง ในจังหวัดเชียงใหม่ ได้ถูกนำมาทดสอบกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ และเปรียบเทียบทั้งในเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) โดยระดับความเข้มข้นของกลิ่นกาแฟ สามารถพิจารณาได้จากอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างกาแฟ จากรูปด้านล่างจะเห็นได้ว่าค่าอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละตัวนั้นแตกต่างกัน นั่นหมายความว่า เมล็ดกาแฟแต่ละชนิดมีสารระเหยแต่ละกลุ่มในปริมาณที่ต่างกัน



ภาพที่ 129 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟแบบคั่วกลาง



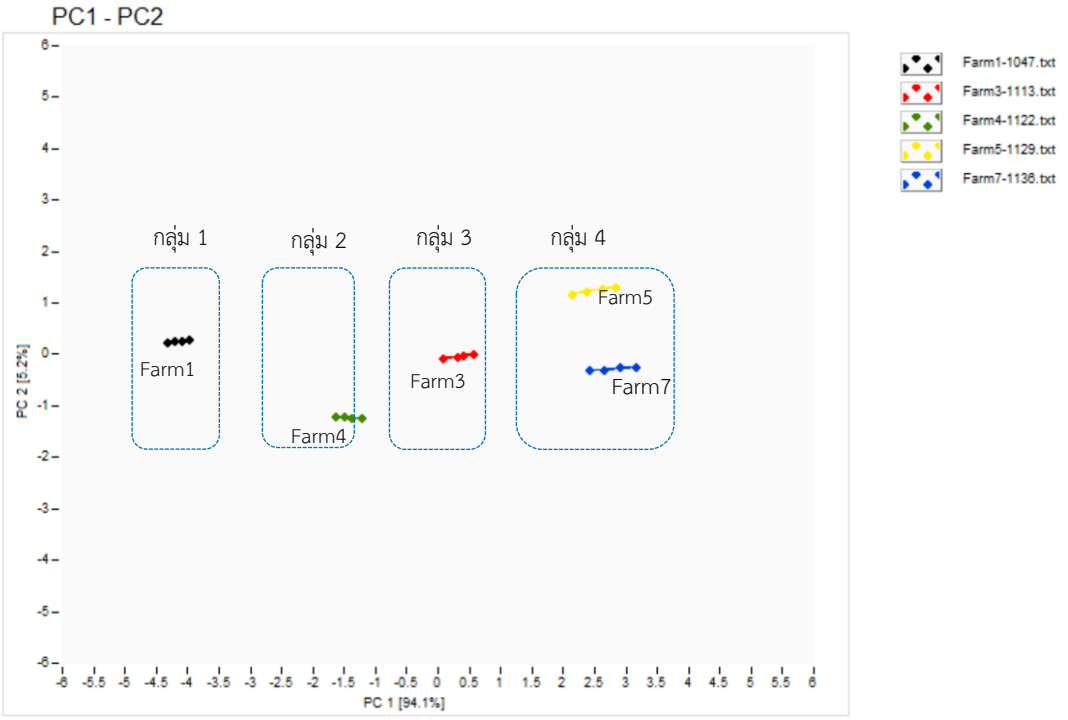
ภาพที่ 130 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟแบบคั่วเข้ม



ภาพที่ 131 แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของเมล็ดกาแฟแบบคั่วกลางและคั่วเข้ม

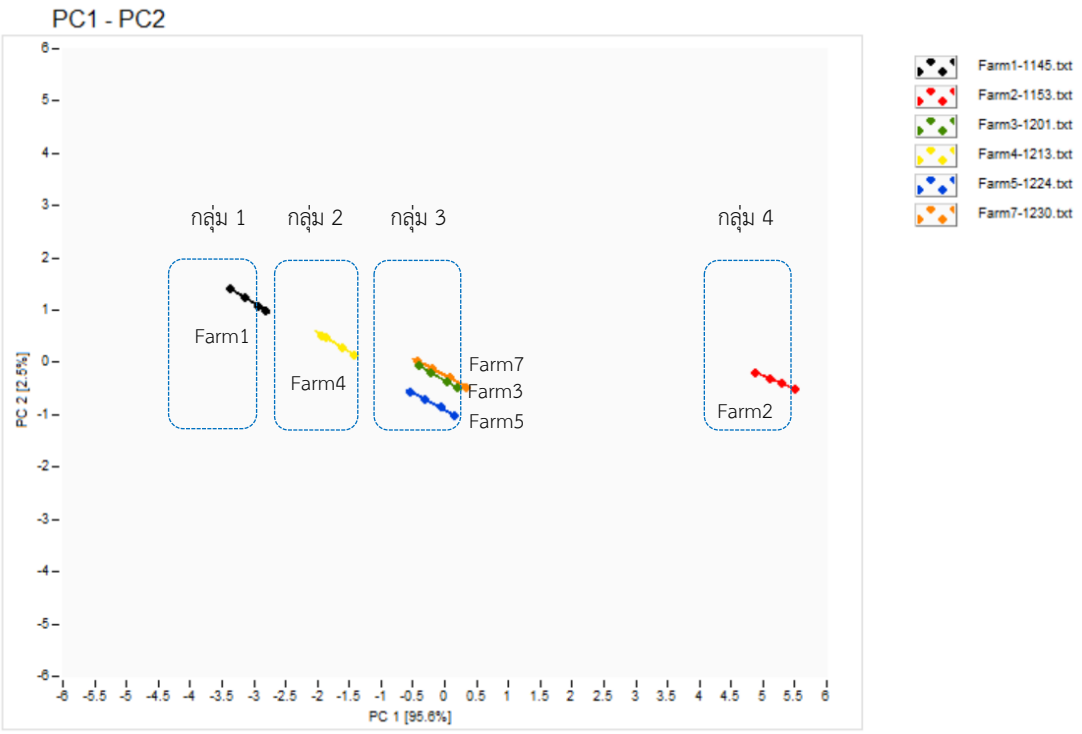
ระดับความเข้มข้นของกลิ่นสามารถคำนวณได้จากผลรวมของอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 ตัว จากรูปด้านบนแสดงถึงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของเมล็ดกาแฟจากไร่กาแฟทั้ง 5 แห่ง พบว่าเมล็ดกาแฟแบบคั่วกลาง (กราฟสีน้ำเงิน) มีระดับความเข้มข้นกลิ่นสูงกว่าเมล็ดกาแฟแบบคั่วเข้ม (กราฟสีส้ม) โดยกาแฟจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนป่าเมี่ยง (Farm 1) อ.ดอยสะเก็ด จ.เชียงใหม่ มีค่าความเข้มข้นกลิ่นสูงสุดเมื่อเทียบกับกาแฟจากแหล่งปลูกกาแฟอื่น ๆ กาแฟที่มีระดับความเข้มข้นกลิ่นรองลงมา คือ กาแฟจากกลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง (Farm 4) และกาแฟจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนกาแฟสดบ้านแม่ตอน (Farm 3) นอกจากนี้ยังพบว่ากาแฟจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนป่าแป๋ (Farm 7) มีระดับความเข้มข้นกลิ่นน้อยที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับกาแฟจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแม่กำปอง (Farm 5)

วิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี Principal Component Analysis (PCA)



ภาพที่ 132 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟแบบคั่วกลาง (Coffee Beans)

จากกราฟแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นเมล็ดกาแฟแบบคั่วกลาง พบว่าเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างกาแฟออกจากกันได้เป็นอย่างดี โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ซึ่งหมายถึงลักษณะของกลิ่นที่แตกต่างกัน หากพิจารณากลุ่มที่ 4 พบว่ากลิ่นของเมล็ดกาแฟแบบคั่วกลางจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนแม่กำปอง (Farm 5) และจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนป่าแป๋ (Farm 7) มีลักษณะของกลิ่นที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด อาจเนื่องมาจาก ตัวอย่างกาแฟทั้งสองมีองค์ประกอบของกลิ่นที่คล้ายคลึงกัน

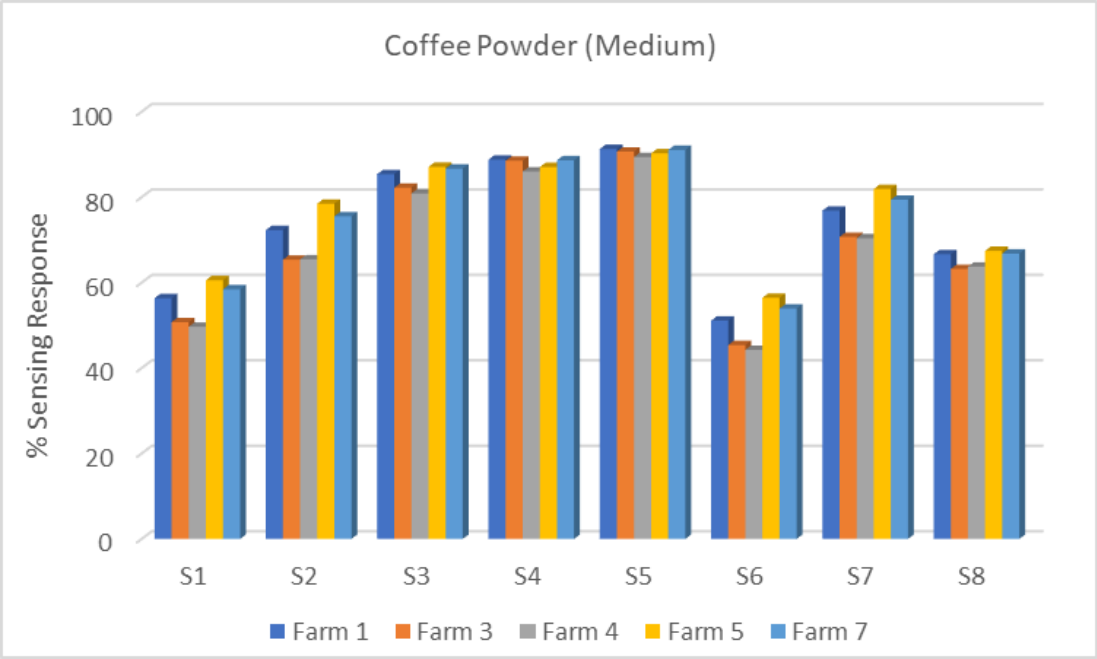


ภาพที่ 133 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟแบบคั่วเข้ม (Coffee Beans)

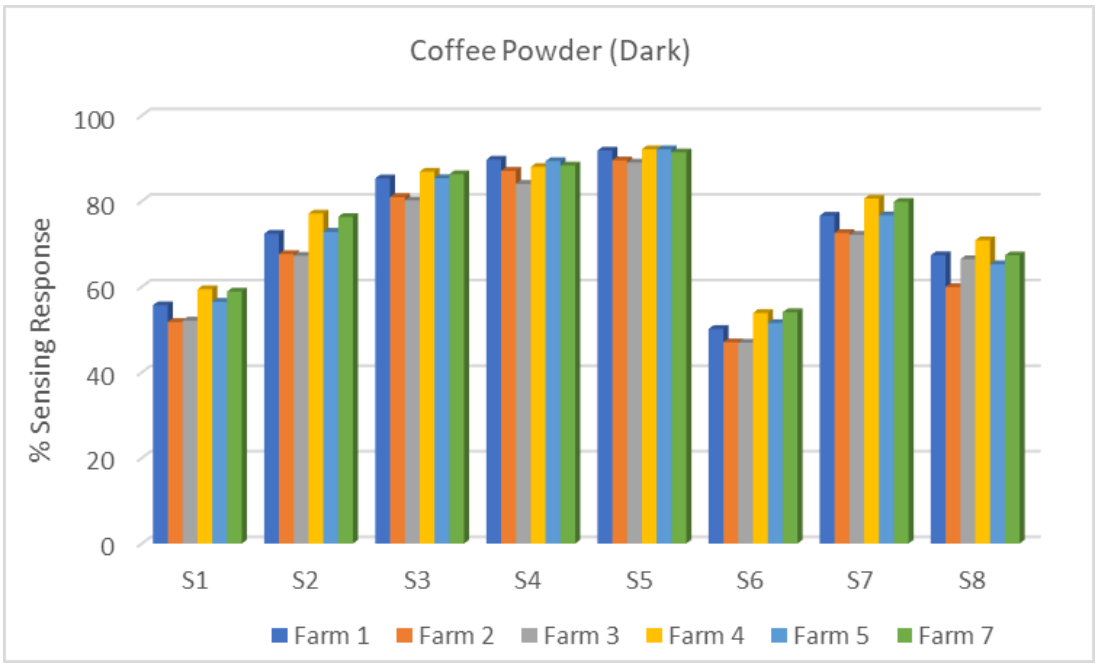
เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างกาแฟแบบคั่วเข้มออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่ม 1, 2, 3 และ 4 โดยพบว่ากาแฟจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ (Farm 2) มีลักษณะกลิ่นที่แตกต่างจากกาแฟจากแหล่งเพาะปลูกอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัดเมื่อพิจารณาจากการจัดกลุ่มและการกระจายตัวของข้อมูลในแนวแกน X (PC1=95.6%) ตัวอย่างกาแฟแบบคั่วเข้มจากไร่กาแฟ 3 และ 7 มีการจัดกลุ่มของข้อมูลแบบซ้อนทับกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างทั้งสองมีรูปแบบกลิ่นที่ใกล้เคียงกันมาก อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของสารระเหย รวมถึงอุณหภูมิและเวลาในการคั่ว โดยตัวอย่างกาแฟทั้งสองผ่านกระบวนการคั่วแบบเข้มที่อุณหภูมิ 200-250 องศาเซลเซียสเหมือนกัน

2) ผลการวิผลการวิเคราะห์กลิ่นของผงกาแฟ (Coffee Powder)

การตรวจวัดผงกาแฟด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีวิธีการตรวจวัดและวิเคราะห์ผลเหมือนกับการตรวจวัดกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบด เมื่อพิจารณาอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของผงกาแฟทั้งสองแบบ พบว่าก๊าซเซนเซอร์ 3, 4 และ 5 (S3, S4, S5) มีอัตราการตอบสนองต่อกลิ่นของกาแฟที่สูง เนื่องจากในเมล็ดกาแฟมีสารประกอบกลุ่ม Ketones, Phenols และ Esters เป็นหลัก

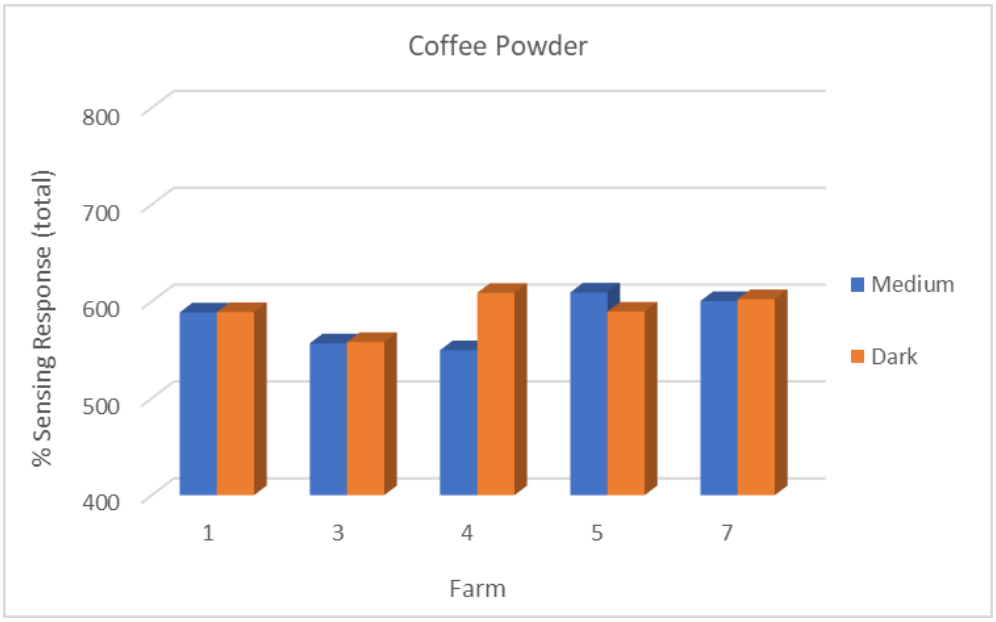


ภาพที่ 134 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของผงกาแฟแบบคั่วกลาง



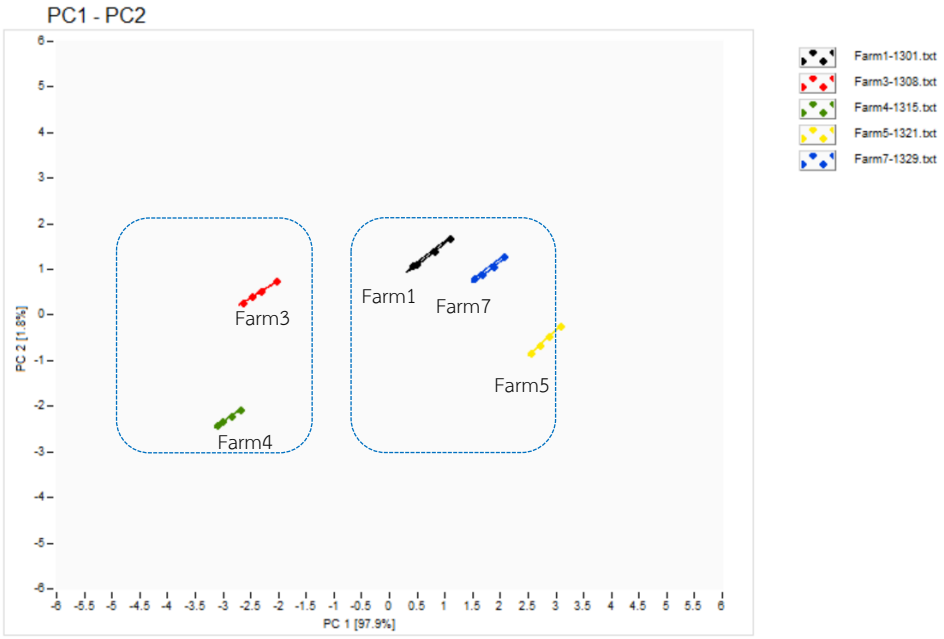
ภาพที่ 135 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของผงกาแฟแบบคั่วเข้ม

จากภาพแสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวพบว่า กาแฟผงทั้งแบบคั่วกลางและแบบคั่วเข้มจากแต่ละพื้นที่มีอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์ที่แตกต่างกัน นั่นหมายความว่า องค์ประกอบในตัวอย่างกาแฟมีความแตกต่างกันทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ



ภาพที่ 136 แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของตัวอย่างผงกาแฟ (Coffee Powder)

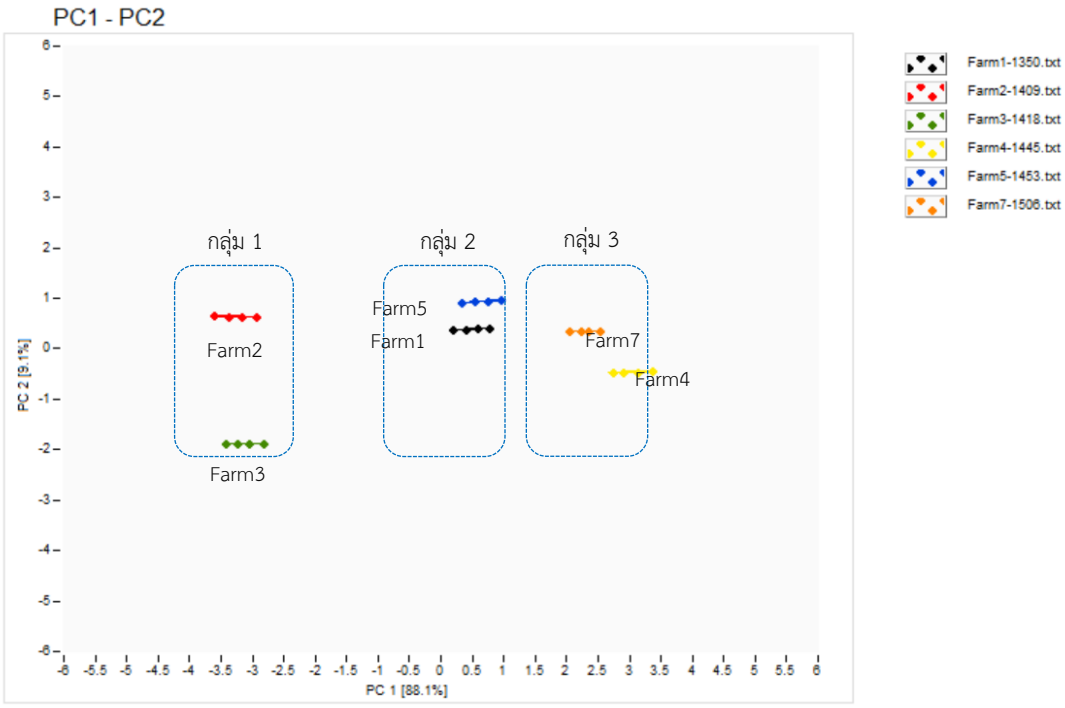
จากภาพแสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของผงกาแฟ พบว่าเมื่อนำเมล็ดกาแฟมาบดเป็นผงกาแฟแล้ว ระดับความเข้มข้นกลิ่นของผงกาแฟแบบคั่วกลางและคั่วเข้มโดยส่วนใหญ่ไม่ได้มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะกาแฟจากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง (Farm 1) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนกาแฟสดบ้านแม่ตอน (Farm 3) และกาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ (Farm 7) ที่ระดับความเข้มข้นกลิ่นของกาแฟแบบคั่วกลาง (กราฟสีน้ำเงิน) และแบบคั่วเข้ม (กราฟสีส้ม) มีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 137 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นผงกาแฟแบบคั่วกลาง (Coffee Powder)

จากกราฟแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟผงแบบคั่วกลาง พบว่าเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งกลิ่นของตัวอย่างกาแฟออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากการทับซ้อนกันของกลุ่มข้อมูลในกราฟ PCA พบว่ากาแฟผงแบบคั่วกลางจากทั้ง 5 แห่งยังคงมีความแตกต่างกัน

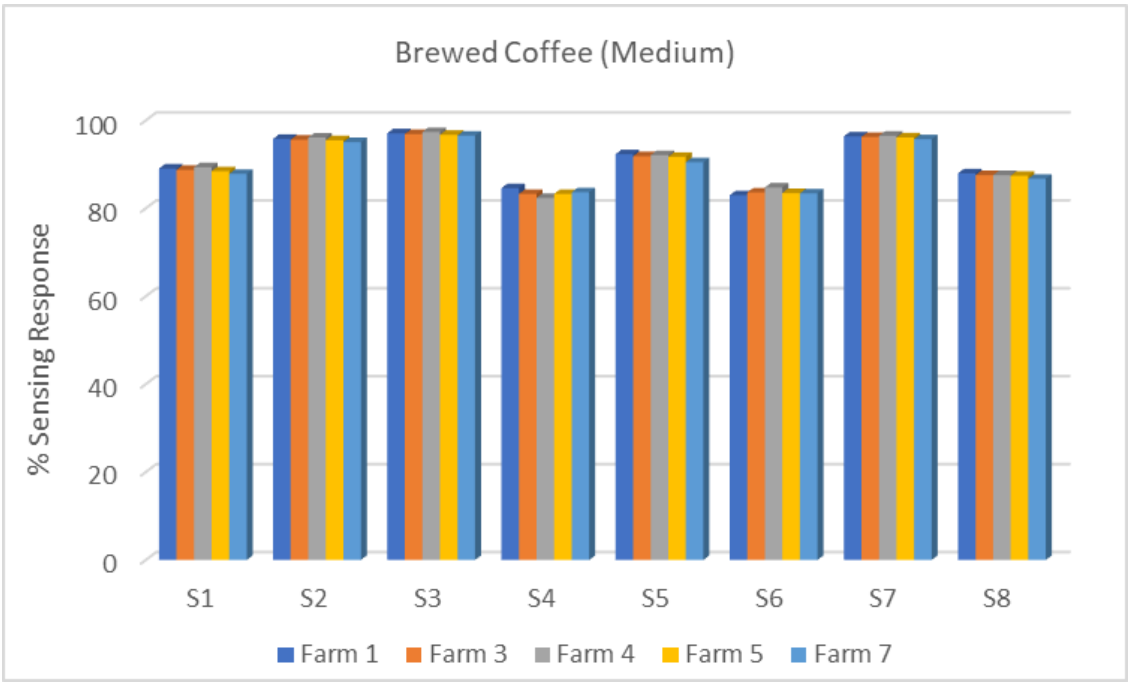
กราฟด้านล่างแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นกาแฟผงแบบคั่วเข้ม โดยพบว่าเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งกลิ่นของตัวอย่างกาแฟแบบคั่วเข้มออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ซึ่งกาแฟแต่ละกลุ่มมีลักษณะของกลิ่นที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณากลุ่มที่ 2 พบว่ากาแฟผงแบบคั่วเข้มจากวิสาหกิจชุมชนกลุ่มผลิตและแปรรูปกาแฟป่าเมี่ยง (Farm 1) และจากวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ (Farm 5) มีการจัดกลุ่มข้อมูลใกล้ ๆ กัน ซึ่งหมายถึงลักษณะของกลิ่นที่ใกล้เคียงกัน



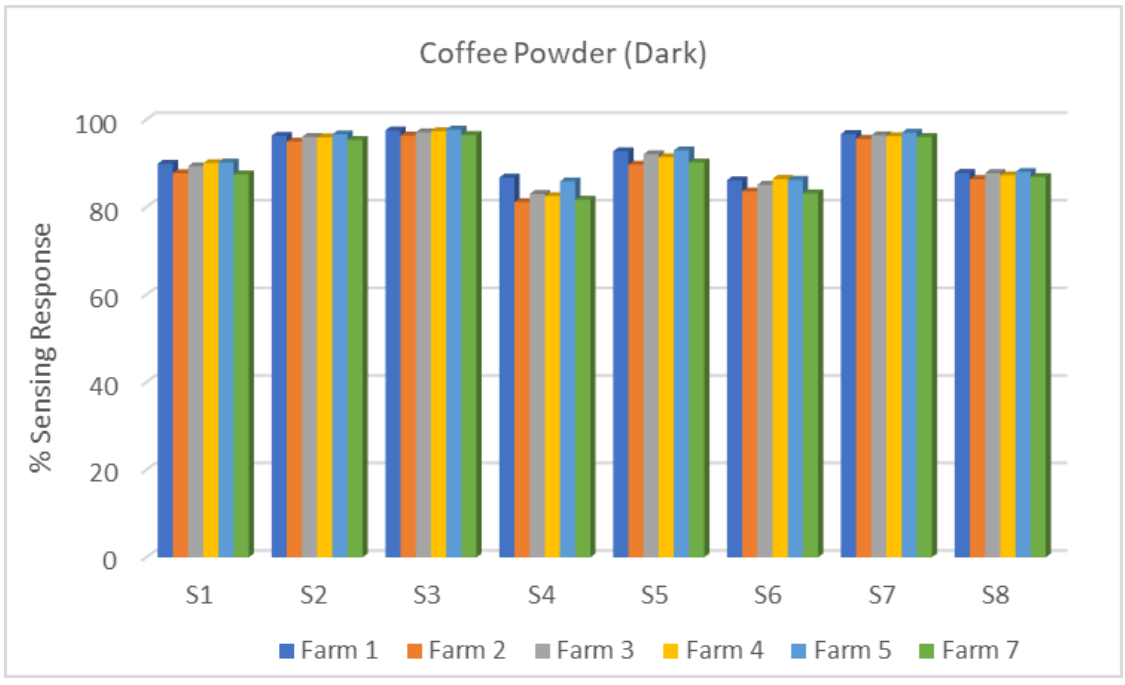
ภาพที่ 138 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นผงกาแฟแบบคั่วเข้ม (Coffee Powder)

3) ผลการวิผลการวิเคราะห์กลิ่นของกาแฟแบบชง (Brewed Coffee)

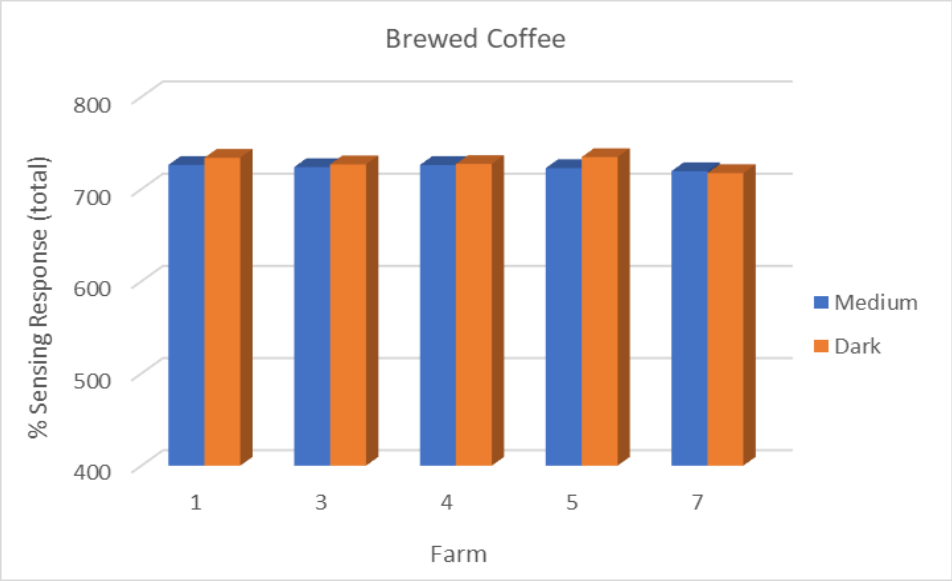
การตรวจวัดกลิ่นตัวอย่างกาแฟแบบชงด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีวิธีการตรวจวัดและวิเคราะห์ผลเหมือนกับการวัดกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบดและกาแฟผง โดยเริ่มจากการเตรียมตัวอย่างเมล็ดกาแฟปริมาณ 18 กรัม นำไปบดละเอียดและชงในปริมาณ 50 มิลลิลิตร อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาตรวจวัดกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ กราฟแสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของกาแฟชง แสดงให้เห็นว่าตัวอย่างกาแฟจากแต่ละพื้นที่ปลูก เมื่อนำมาชงแล้วจะมีลักษณะของสารระเหยหรือองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกันทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ (ดูรูปในหน้าถัดไป)



ภาพที่ 139 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของกาแฟชงแบบคั่วกลาง

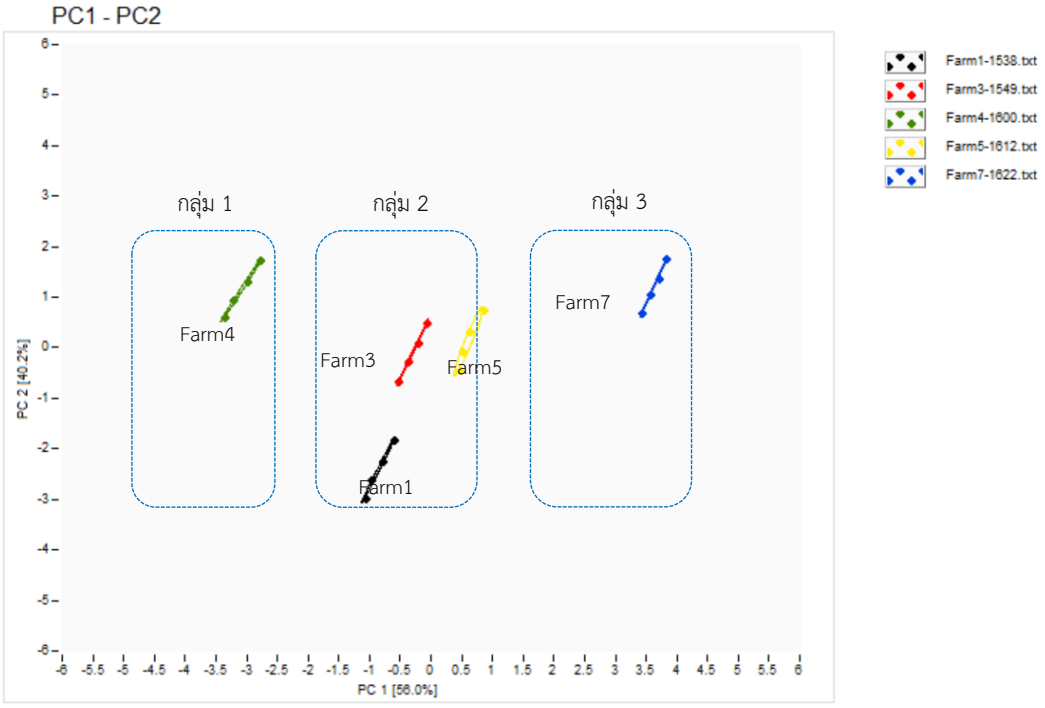


ภาพที่ 140 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของกาแฟชงแบบคั่วเข้ม



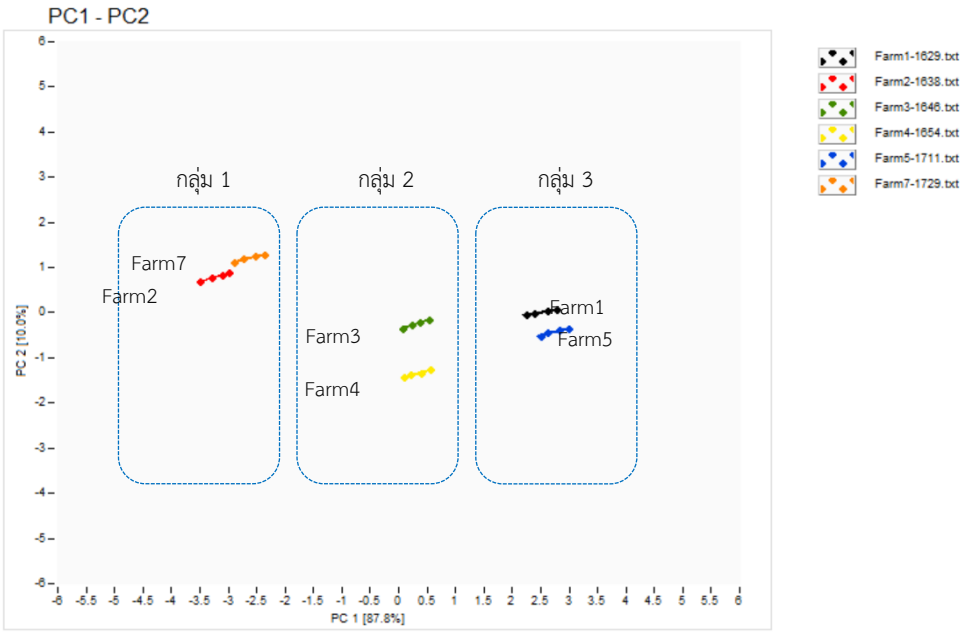
ภาพที่ 141 แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของกาแฟแบบชง (Brewed Coffee)

จากกราฟแสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของกาแฟแบบชง พบว่ากาแฟแบบชงจากทั้ง 5 พื้นที่เพาะปลูกมีระดับความเข้มข้นกลิ่นที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบว่ากาแฟแบบคั่วกลาง (กราฟสีน้ำเงิน) และแบบคั่วเข้ม (กราฟสีส้ม) ของแต่ละตัวอย่างก็มีความเข้มข้นกลิ่นอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน



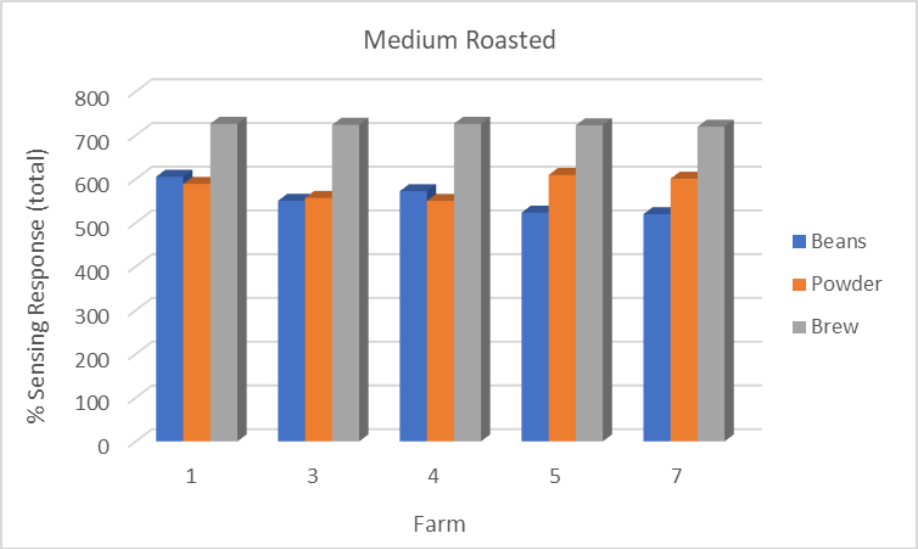
ภาพที่ 142 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นกาแฟชงแบบคั่วกลาง

จากกราฟแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟชงแบบคั่วกลาง พบว่าเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างกาแฟออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกาแฟแต่ละกลุ่มมีลักษณะของกลิ่นที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะกาแฟจากกลุ่มผู้ปลูกกาแฟแม่กำปอง (Farm 4) และกลุ่มแปรรูปกาแฟอะราบิกา แม่กำปอง (Farm 5) ที่แม้ว่าจะมาจากพื้นที่เพาะปลูกเดียวกันและอยู่ในระดับความสูงจากน้ำทะเลที่ใกล้เคียงกัน แต่ก็มีลักษณะกลิ่นที่แตกต่างกัน อาจเนื่องมาจากปัจจัยในการคั่วกาแฟ เช่น อุณหภูมิ เวลา ฯลฯ

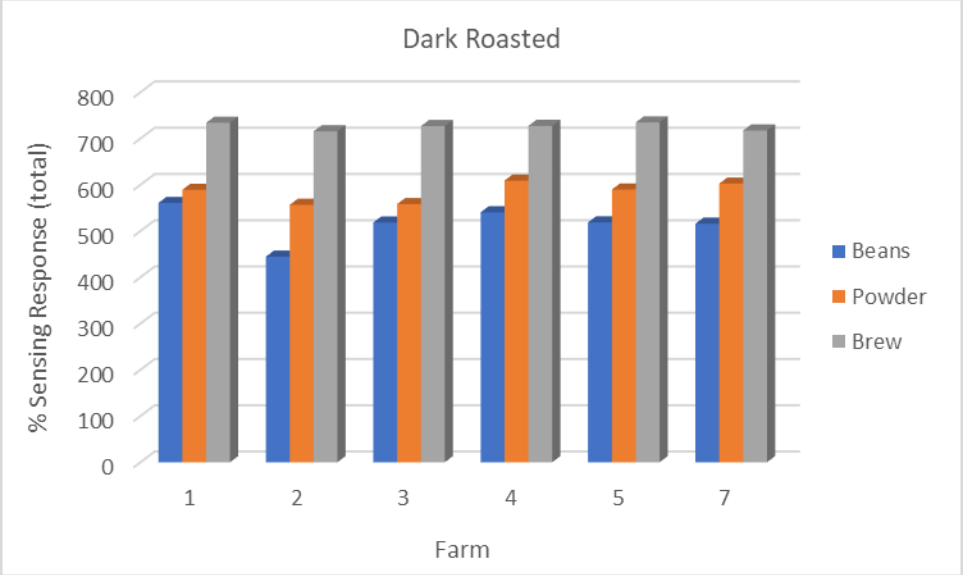


ภาพที่ 143 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟชงแบบคั่วเข้ม

เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างกาแฟแบบคั่วเข้มออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ โดยกาแฟแต่ละกลุ่มมีลักษณะของกลิ่นที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ถึงแม้ว่าตัวอย่างกาแฟทั้ง 6 ตัวอย่างจะมีระดับความเข้มข้นกลิ่นเท่า ๆ กันก็ตาม



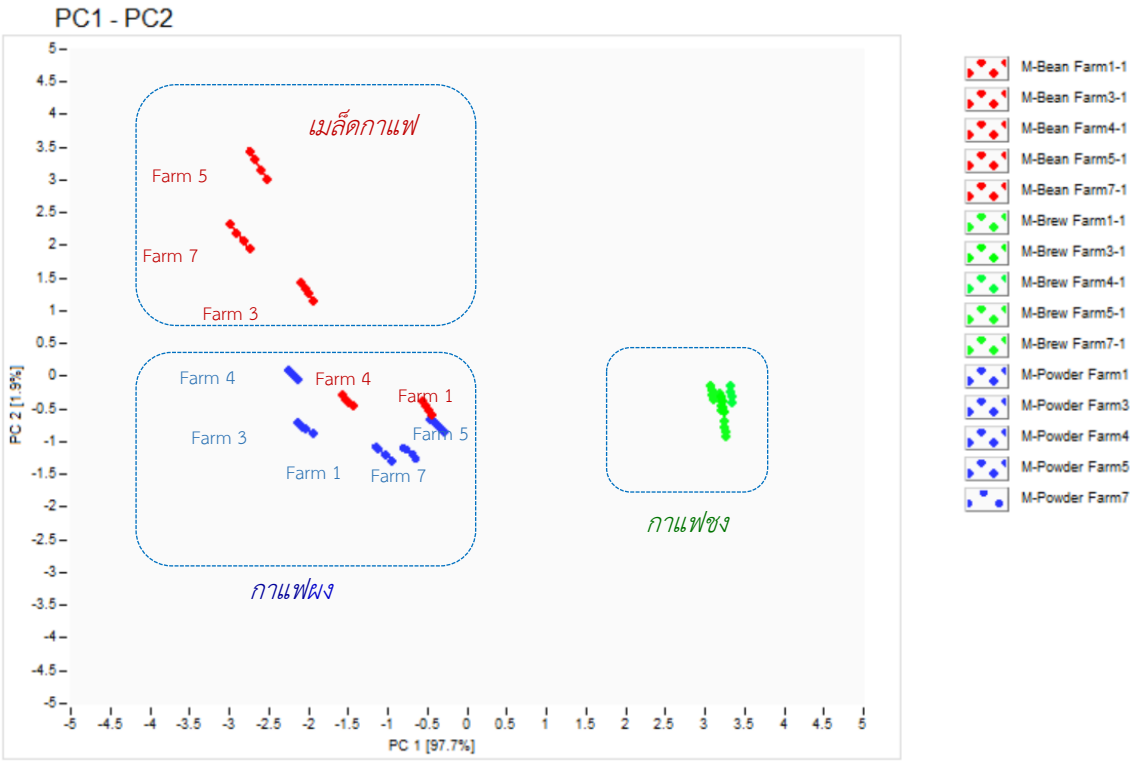
ภาพที่ 144 แสดงระดับความเข้มข้นกลิ่นของกาแฟแบบคั่วกลางทั้ง 3 รูปแบบ



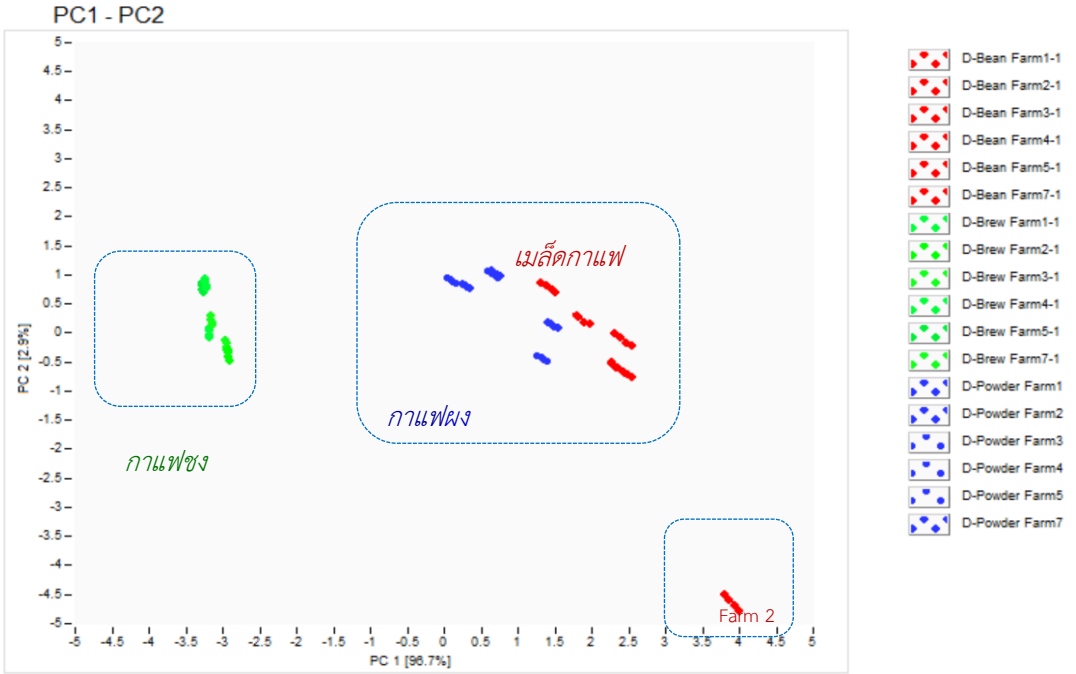
ภาพที่ 145 แสดงระดับความเข้มข้นกลิ่นของกาแฟแบบคั่วเข้มทั้ง 3 รูปแบบ

จากกราฟแสดงระดับความเข้มข้นกลิ่นทั้งสอง จะเห็นได้ว่าเมล็ดกาแฟที่นำมาบดและชงแล้วจะมีระดับความเข้มข้นกลิ่นที่สูงขึ้น อันเนื่องมาจากองค์ประกอบในเมล็ดกาแฟที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างกระบวนการคั่ว และการเกิดสารระเหยที่ทำให้เกิดกลิ่นหอมของกาแฟ ทั้งนี้กลิ่นของกาแฟจะแปรเปลี่ยนไปตามวิธีการคั่ว เวลาที่ใช้ในการคั่ว ชนิดของเมล็ดกาแฟ ความชื้นเริ่มต้น อัตราการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

4) ผลการเปรียบเทียบกลิ่นของกาแฟทั้ง 3 แบบ



ภาพที่ 146 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟแบบคั่วกลาง



ภาพที่ 147 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟแบบคั่วเข้ม

จากภาพแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟแบบคั่วกลางและคั่วเข้มทั้ง 3 แบบ พบว่าเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างกาแฟออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ โดยข้อมูลกลิ่นของกาแฟแบบชงจะมีลักษณะการจับกลุ่มที่แตกต่างจากเมล็ดกาแฟและกาแฟผงอย่างเห็นได้ชัด

เมล็ดกาแฟแบบคั่วเข้มจากวิสาหกิจชุมชนรุ่งเรืองพัฒนากาแฟ (Farm 2) นั้นมีลักษณะกลิ่นที่แตกต่างจากตัวอย่างอื่น ๆ อย่างมาก ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการคั่วที่อุณหภูมิต่ำ (123 องศาเซลเซียส) ในขณะที่ตัวอย่างอื่น ๆ ผ่านกระบวนการคั่วที่อุณหภูมิสูงกว่า หรือประมาณ 180-250 องศาเซลเซียส

4.2.4 สรุปผลการตรวจวัดกลิ่นของกาแฟด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์มีความสามารถในการตอบสนอง และจำแนกลักษณะเฉพาะของกลิ่นกาแฟ แต่ละชนิดได้เป็นอย่างดี โดยมีผลการวิเคราะห์ลักษณะกลิ่นดังนี้

1) เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถสร้างแผนที่ของกลิ่นที่วัดได้จากตัวอย่างกาแฟแต่ละชนิดได้ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี Principal Component Analysis (PCA) พบว่า
   - กลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบดจากแต่ละพื้นที่นั้นมีลักษณะแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม สภาพอากาศ สายพันธุ์ อุณหภูมิ และเวลาในการคั่ว ฯลฯ
   - เมื่อนำกาแฟมาบดละเอียด พบว่าลักษณะกลิ่นนั้นจะแตกต่างจากกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบดดั้งเดิม โดยเฉพาะเมื่อนำกาแฟมาชงในน้ำร้อน จะทำให้ลักษณะกลิ่นแตกต่างไปจากเดิมอย่างมาก และกาแฟที่ได้มีความเข้มข้นกลิ่นที่สูงขึ้น อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบในเมล็ดกาแฟที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างกระบวนการคั่วหรือชง และการเกิดสารระเหยที่ทำให้เกิดกลิ่นหอมของกาแฟ
   - กาแฟจากแต่ละพื้นที่ที่นำมาชงแล้ว จะมีความเข้มข้นกลิ่นและลักษณะกลิ่นไม่ต่างกันมากนัก สังเกตได้จากกราฟ PCA ที่ชุดข้อมูลนั้นจับกลุ่มบริเวณใกล้เคียงกัน
2) เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถตรวจวัดระดับความเข้มข้นของกลิ่นกาแฟได้ ซึ่งพิจารณาได้จากค่าอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างกาแฟ
   - เมล็ดกาแฟคั่วกลางจะมีระดับความเข้มข้นกลิ่นที่สูงกว่าเมล็ดกาแฟคั่วเข้ม
   - เมื่อนำกาแฟไปบดหรือชง พบว่าระดับความเข้มข้นกลิ่นของกาแฟทั้ง 2 แบบนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน
   - เมล็ดกาแฟคั่วบดจากกลุ่มวิสาหกิจชุมชนป่าเมี่ยง (Farm 1) มีระดับความเข้มข้นกลิ่นสูงที่สุด ในขณะที่เมล็ดกาแฟคั่วบดจากกาแฟต้นน้ำป่าแป๋และการท่องเที่ยวเชิงอนุรักษ์ (Farm 7) มีระดับความเข้มข้นกลิ่นน้อยที่สุด

จากผลการศึกษาและทดสอบกลิ่นของตัวอย่างกาแฟด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ จะเห็นได้ว่าเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีความสามารถในการตรวจวัดกลิ่นทั้งในเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถจำแนกลักษณะเฉพาะของกลิ่นกาแฟแต่ละชนิดได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากตัวอย่างกาแฟคั่วบดจากแต่ละพื้นที่นั้นได้ผ่านกรรมวิธีการคั่ว และอุณหภูมิที่ต่างกัน จึงทำให้ยังไม่สามารถวิเคราะห์ปัจจัยด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในการเกิดกลิ่นที่แตกต่างกันได้ เช่น สภาพแวดล้อม สภาพอากาศ ระดับความสูงจากน้ำทะเล และปัจจัยอื่นๆ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับกลิ่นกาแฟ โดยการเตรียมตัวอย่างเมล็ดกาแฟดิบ และนำมาคั่วด้วยวิธีการคั่วและสภาวะเดียวกัน อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการทดลองให้แม่นยำมากขึ้นสำหรับการใช้เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ในการจำแนกกลิ่นของกาแฟต่อไป

4.2.5 การพัฒนาจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับการตรวจวัดกาแฟ

4.2.5.1 การพัฒนาเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์สำหรับตรวจวัดกาแฟ

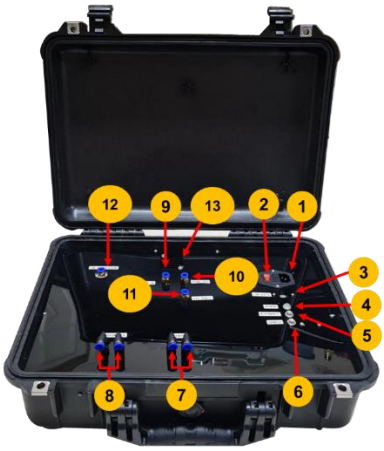
กลิ่นในกาแฟนั้นเกิดจากสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds, VOCs) หลากหลายชนิดที่ทำให้ประสาทสัมผัสของมนุษย์สามารถรับรู้กลิ่นและรสชาติได้ ซึ่งการประเมินคุณภาพกาแฟโดยอาศัยข้อมูลจากประสาทสัมผัสรับกลิ่นของมนุษย์นั้นทำได้ยาก อย่างไรก็ตาม เราสามารถประเมินคุณภาพของเมล็ดกาแฟโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางประสาทสัมผัสแบบดิจิทัลที่สามารถเลียนแบบการทำงานของจมูกมนุษย์ได้ หรือที่เรียกว่า จมูกอิเล็กทรอนิกส์

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose หรือ E-nose) มีกลไกการทำงานโดยอาศัยหลักการตรวจวัดกลิ่นที่คล้ายกับระบบดมกลิ่นของมนุษย์ โดยมีเซนเซอร์ทำงานร่วมกับซอฟต์แวร์ในการจำแนกและจดจำกลิ่น ปัจจุบันได้มีการนำจมูกอิเล็กทรอนิกส์ไปประยุกต์ใช้ในงานหลากหลาย อาทิเช่น การควบคุมคุณภาพอาหาร การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งกาแฟถือเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ยอดนิยมที่มักมีการวิเคราะห์และควบคุมคุณภาพโดยการดมกลิ่น และชิมรสชาติ

เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีลักษณะเป็นกระเป๋าหิ้ว (Portable) ที่มีระบบตรวจวัดกลิ่น ซึ่งประกอบไปด้วยแก๊สเซนเซอร์แบบโลหะกึ่งตัวนำทั้งหมด 8 หัว (Metal oxide semiconductor gas sensor array) สำหรับตรวจจับโมเลกุลกลิ่น อุปกรณ์ต่างๆ (Hardware) จะถูกควบคุมและต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง USB โดยอาศัย Data Acquisition (DAQ) ที่มีความละเอียดในการเก็บข้อมูล 12 บิต และมีอัตราการสุ่ม

ตัวอย่าง (Sampling Rate) 10 KS/s โดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกลิ่นและแก๊สเซนเซอร์จะถูกเก็บข้อมูลแบบ Real Time ทุกๆ 1 วินาที

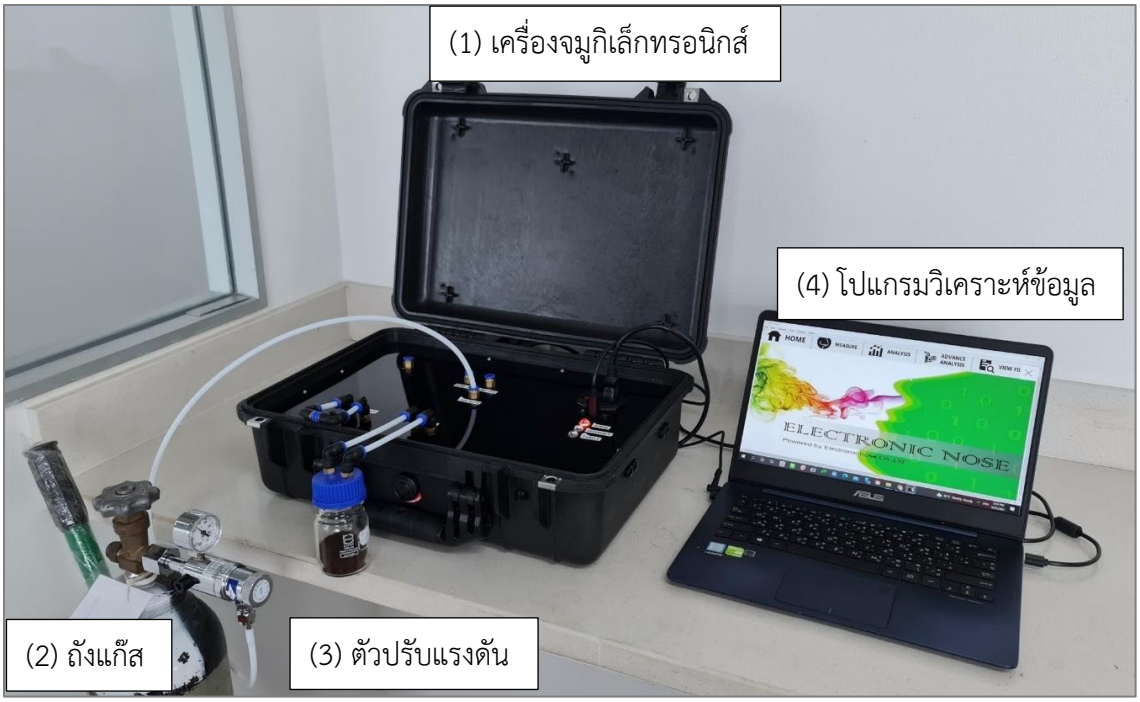
<u>ส่วนประกอบของจมูกอิเล็กทรอนิกส์</u>



ภาพที่ 148 แสดงส่วนประกอบของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 31 แสดงส่วนประกอบของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

1. ช่องสำหรับเสียบสายไฟ 220 V	8. จุดต่อขวด Reference
2. สวิตช์เปิด/ปิดเครื่อง	9. ช่องสำหรับดูดอากาศ (Pump in) หรือช่องต่อท่อกรองอากาศ
3. ช่องต่อสาย USB กับ คอมพิวเตอร์	10. ช่องสำหรับดูดอากาศ (Pump out)
4. ไฟแสดงสถานะเปิด/ปิดเครื่อง	11. ช่องต่อ Air Zero
5. ไฟแสดงสถานะการตรวจวัดกลิ่น Reference	12. ช่องระบายอากาศจาก Sensors Chamber
6. ไฟแสดงสถานะการตรวจวัดกลิ่นตัวอย่าง	13. พัดลมระบายอากาศ
7. จุดต่อขวด Sample	



ภาพที่ 149 แสดงระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์เมื่อเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์แบบพกพา

(1) เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ พร้อมขวดแก้วสำหรับบรรจุตัวอย่าง โดยจะดูดกลิ่นของตัวอย่างผ่านปั๊มลม

(2) Zero Grade Air ที่บรรจุอยู่ในถัง สำหรับเป็น Reference Gas และ Carrier Gas

(3) ตัวปรับแรงดัน (Pressure Regulator) เพื่อควบคุมอัตราการไหล

(4) เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรับข้อมูลสัญญาณ และการแปลผลข้อมูลสัญญาณกลิ่น

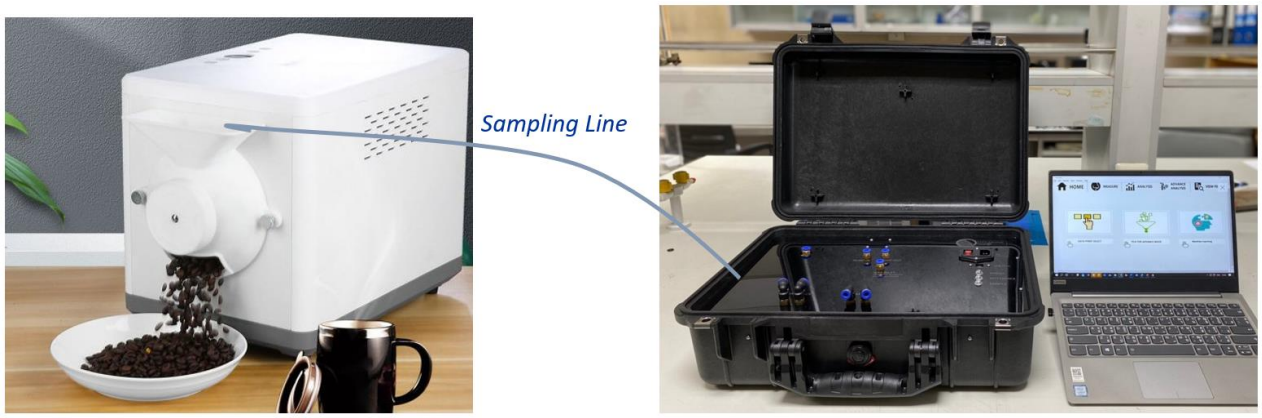
<u>ระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์</u>

	เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา (Portable Electronic Nose)

	สายไฟ (Main Power Supply)
	สาย USB
	เครื่องปรับความดัน (Pressure Regulator)
	Air Zero Grade Oxygen (O_2): 20% Nitrogen (N_2): Balance Moisture (H_2O) <5 ppm Total Hydrocarbons < 1 ppm

เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์แบบกระเป๋าหิ้วได้ถูกแบบให้สามารถวัดกลิ่นของผลิตภัณฑ์ ที่มีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซได้ ซึ่งในโครงการวิจัยนี้จะมีการตรวจวัดสถานะของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สถานะ คือ เมล็ดกาแฟ กาแฟชง และไอระเหยจากกระบวนการคั่วกาแฟ

ในโครงการวิจัยนี้ ระบบการตรวจวัดกลิ่นแบบเรียลไทม์ได้ถูกพัฒนาขึ้นสำหรับการตรวจวัดกลิ่นกาแฟในระหว่างกระบวนการคั่วกาแฟด้วยเครื่องคั่ว Coffee Roaster ดังแสดงในรูปด้านล่าง ท่อเทปล่อน (Teflon) จากเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ได้ถูกนำไปต่อกับเครื่องคั่วกาแฟบริเวณช่องที่มีการระเหยของกลิ่นกาแฟ ระบบการนำกลิ่นจะนำพาโมเลกุลกลิ่นเข้าสู่ห้องวัดกลิ่น และกำจัดโมเลกุลกลิ่นจากห้องวัดกลิ่นได้อย่างอัตโนมัติ โดยอาศัยหลักการทำงานของโซลินอยด์วาล์ว (Solenoid Valves) ซึ่งเป็นตัวควบคุมให้โมเลกุลกลิ่นจากสารตัวอย่าง (Sample) หรืออากาศบริสุทธิ์จากภายนอก (Reference) เข้าสู่ห้องวัดกลิ่น



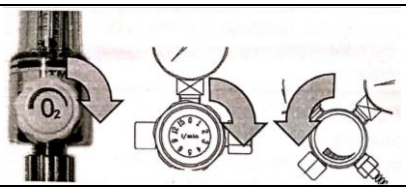
ภาพที่ 150 แสดงเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องคั่วกาแฟ (Coffee Roaster)

<u>ขั้นตอนการใช้งานระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์</u>

1. เสียบปลั๊กไฟ 220 V และเปิดสวิตช์ของเครื่อง
2. ต่อสาย USB จากตัวเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับคอมพิวเตอร์
3. เปิดโปรแกรม CIMS NOSE
4. ต่อท่อกรองอากาศ (Activated Carbon Filter) เข้ากับช่องต่ออุปกรณ์กรองอากาศ
5. ทำการวอร์มเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์เป็นเวลา 30 นาที
6. นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบใส่ลงในขวด Sample และต่อขวด Sample เข้ากับช่อง Sample ที่ตัวเครื่อง
7. ทำการตั้งค่าสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องจากโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ (ขั้นตอนการใช้งานจะอธิบายในส่วนของการใช้โปรแกรม) และกดปุ่ม Start
8. รอเครื่องทำงานจนเสร็จ

ขั้นตอนการใช้งานตัวปรับแรงดัน (Pressure Regulator)

การเชื่อมต่อตัวปรับแรงดัน (Pressure regulator) กับวาล์วถังแก๊ส (Cylinder valve) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

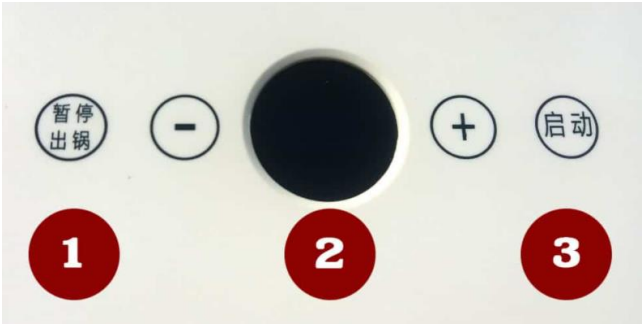
ที่	ขั้นตอน	ภาพประกอบ
1	ตรวจสอบให้แน่ใจว่าตั้งค่าอัตราการไหลเป็นศูนย์ หมุนวงล้อมือหรือตัวเลือกปาก (orifice selector) ในทิศทางที่แสดงเพื่อปิด	
2	ตรวจสอบให้แน่ใจว่าถังแก๊ส • อยู่ในแนวตั้ง และไม่พลิกคว่ำ	
3	เมื่อต้องการใช้งาน ให้ถอดฝาซีลบนวาล์วถังแก๊สออก	
4	ขันสกรูข้อต่อกระบอกสูบของตัวปรับแรงดันเข้ากับเกลียววาล์วถังแก๊ส การเชื่อมต่อกระบอกสูบจะต้องหมุนตามเข็มนาฬิกา อย่าใช้เครื่องมือขันสกรูที่วงล้อมือ! (*Never use a tool to screw on the hand wheel!)*	
5	จัดตำแหน่งตัวปรับแรงดันเพื่อให้มิเตอร์วัดการไหลอยู่ในแนวตั้ง อย่าใช้เครื่องมือขันสกรูที่วงล้อมือ! เชื่อมต่อตัวปรับแรงดัน	
6	แนะนำให้ใช้อัตราการไหล 0.5 - 1.5 ลิตร/นาที สำหรับจมูกอิเล็กทรอนิกส์	

หลักการทำงานของเครื่องคั่วกาแฟ (Coffee Roaster)

ภาพที่ 151 แสดงเครื่องคั่วกาแฟพร้อมระบบควบคุมแบบดิจิทัล

ตารางที่ 32 แสดงรายละเอียดของเครื่องคั่วกาแฟ

พารามิเตอร์	
กำลังไฟ:	220V / 50 Hz / 1600W
อุณหภูมิ:	100-250C
น้ำหนัก:	8 กิโลกรัม
ขนาด:	431 มม. X 298 มม. X 225 มม.
วัสดุตัวเครื่อง:	พลาสติกทนไฟ
วัสดุถังคั่ว:	สแตนเลสเคลือบสารกันติด
ปริมาณเมล็ดกาแฟ:	300 กรัม (20-40 นาที, 250°C)



ภาพที่ 152 แสดงหน้าจอและปุ่มการทำงานของเครื่องคั่วกาแฟ (Lasantec)

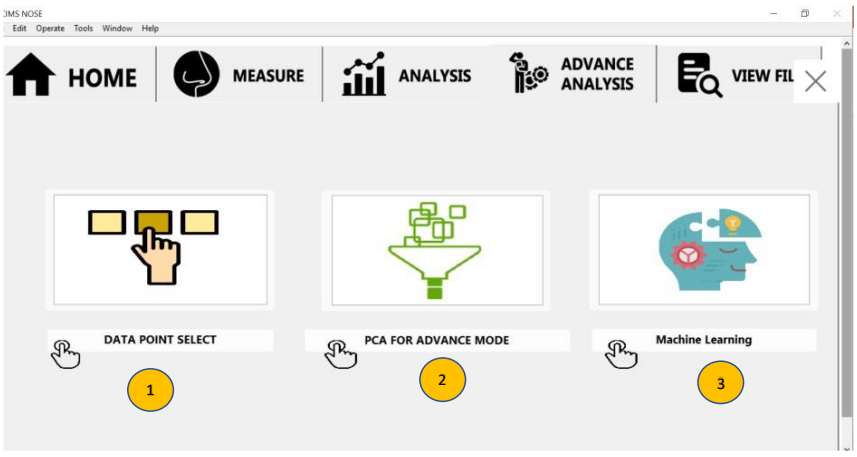
<u>วิธีการใช้งานเครื่องคั่วกาแฟ Lasantec:</u>

1. เสียบปลั๊กเข้ากับเต้าเสียบ
2. กดปุ่ม (3) เพื่อเริ่มการทำงาน ปุ่ม (+) และ (-) จะเปลี่ยนอุณหภูมิ
   กดปุ่ม (3) อีกครั้งแล้วเปลี่ยนเวลา (+) และ (-) โดยหน้าจอ (2) จะแสดงข้อมูลที่จำเป็น
3. ใส่เมล็ดกาแฟในปริมาณที่ต้องการ
4. หลังจากเวลาที่ตั้งไว้ในขั้นตอนที่ 3 สิ้นสุดลง จะได้ยินสัญญาณเตือน หลังจากนั้นต้องกดปุ่ม (1) เพื่อหยุดและกด (1) อีกครั้งเพื่อปล่อยเมล็ดกาแฟออก (ถังคั่วจะเราหมุนไปในทิศทางตรงข้ามและเมล็ดจะไหลออกมา)

4.2.5.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับตรวจวัดกลิ่นกาแฟ

โปรแกรม CIMS NOSE ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานกับเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะ ตัวโปรแกรมถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถดูผลการตรวจวิเคราะห์แบบ Real-Time ได้ในรูปแบบของกราฟ สามารถบันทึกข้อมูลการตรวจวัดในรูปแบบของ Text ไฟล์ได้เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมอื่น ๆ เช่น Microsoft Excel เป็นต้น นอกจากนี้ตัวโปรแกรม E-Nose Machine เองยังมีฟังก์ชันในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง PCA (Principal Component Analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ของกลิ่นตัวอย่างที่เราสนใจว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย และยังสามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละชนิดได้อีกด้วย

<u>การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโหมดขั้นสูง (Advanced Analysis mode)</u>



ในโหมด Advance analysis จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลโดยโหมดขั้นสูงจากผลการทดลองที่ได้ โดยสามารถทำได้ 3 รูปแบบคือ

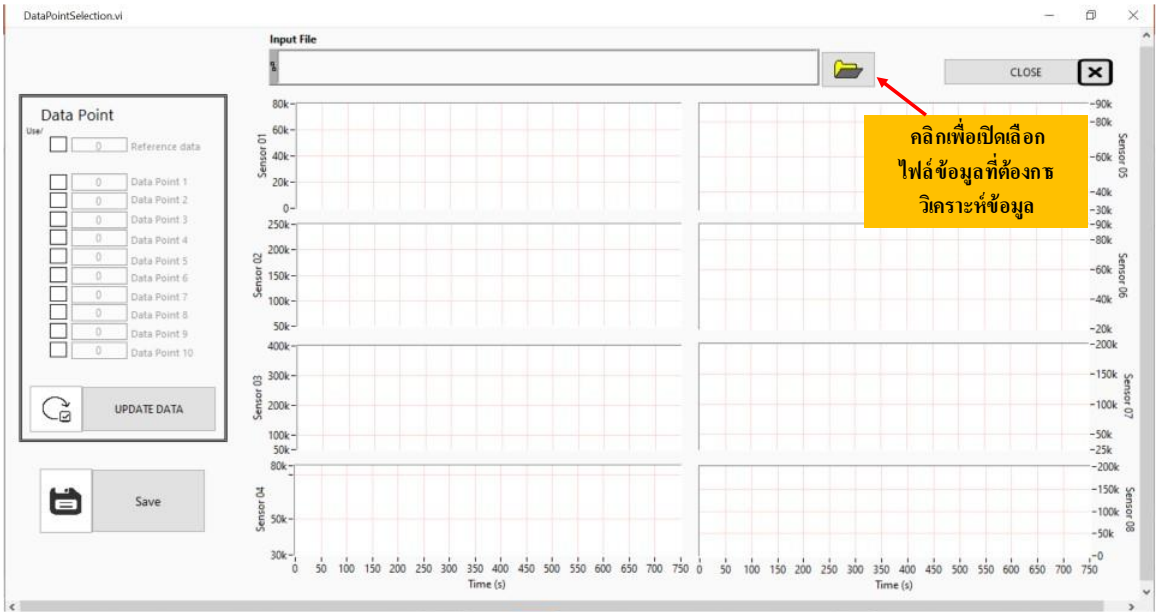
1. Data Point Select เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่สามารถ เลือกจุดหรือเลือกข้อมูลจากกราฟที่เราต้องการจะวิเคราะห์ได้แบบเฉพาะเจาะจง

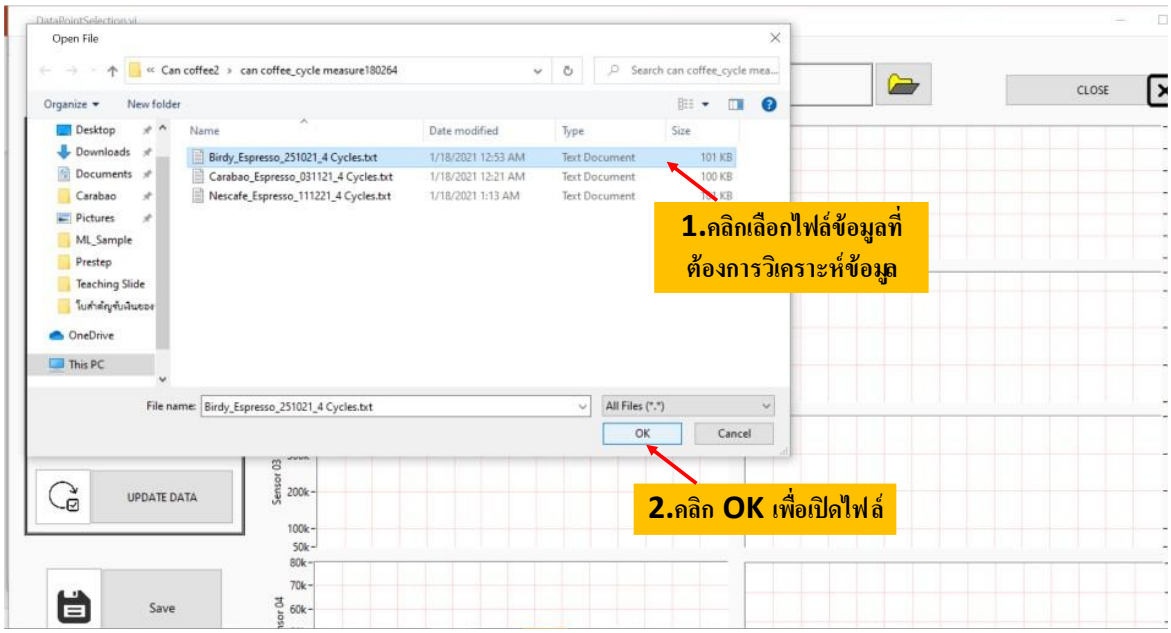
2. PCA For Advance Mode

3. Machine Learning เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลจากฐานข้อมูล (Data base) ที่มี โดยอาศัยจากการสร้างฐานข้อมูล และนำไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบ

<u>การใช้งาน “เลือกจุดข้อมูล” (Data Point Select)</u>

1. คลิกเลือกการวิเคราะห์ข้อมูล Advanced Analysis จากนั้นคลิกที่ Data Point Select
2. จากนั้นจะได้หน้าต่างที่แสดงค่าที่ได้จากการวัดโดยมีขั้นตอนดังนี้



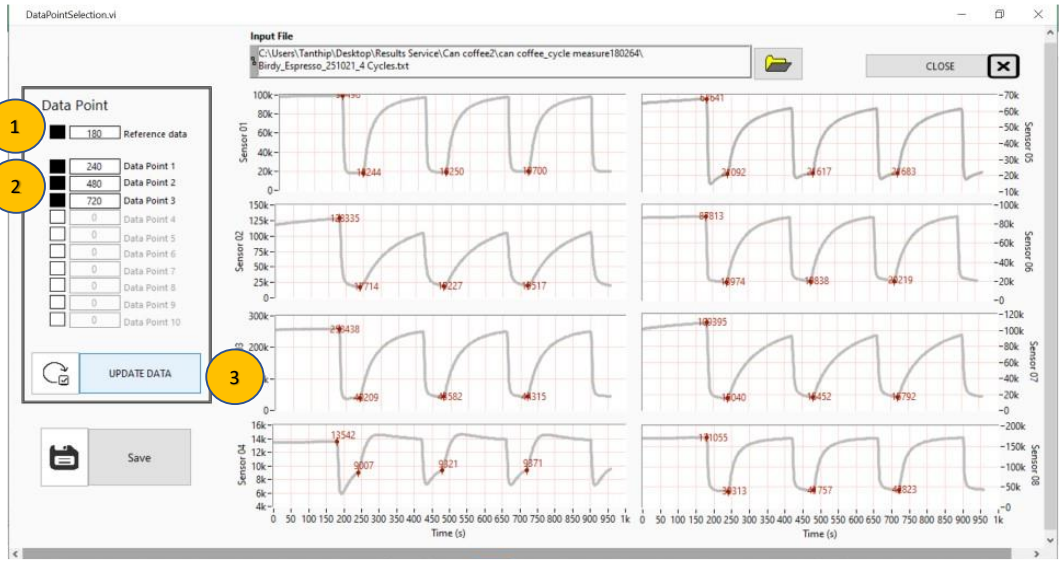


3. เมื่อไฟล์ข้อมูลปรากฏ ข้อมูลที่จะต้องกำหนดมีดังต่อไปนี้

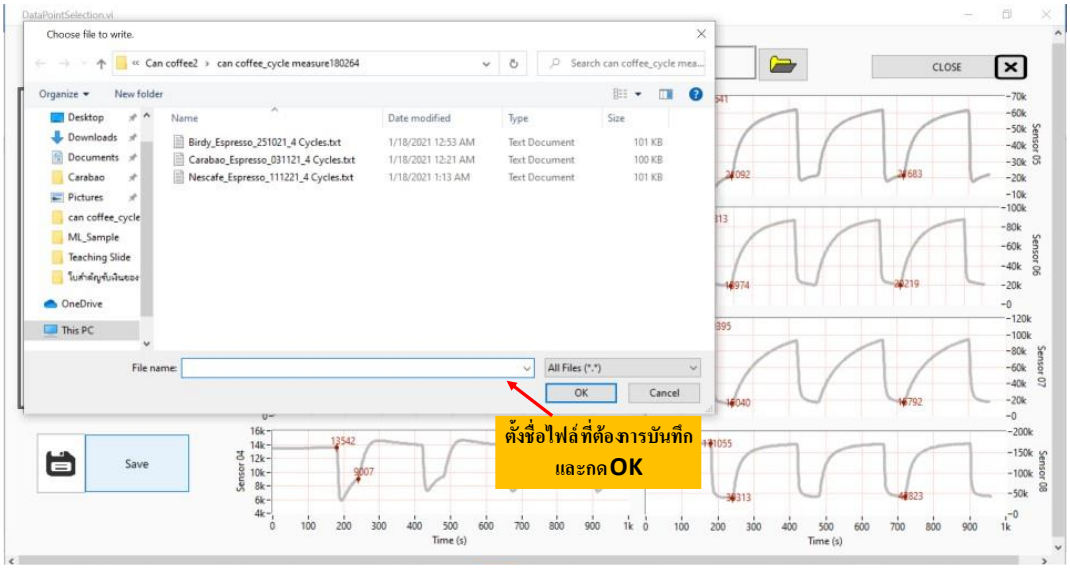
หมายเลข 1 Reference data คลิกเพื่อตั้งค่า เลือกจุดของเวลาที่เราต้องการให้เป็น Reference

หมายเลข 2 Data point คลิกเพื่อตั้งค่า เลือกจุดของเวลาที่เราต้องการวิเคราะห์ข้อมูล จากเวลาของ Sample time (เวลา ณ จุดที่เครื่องดมกลิ่นตัวอย่าง) ซึ่ง Data point สามารถเลือกกี่จุดก็ได้ตามที่ต้องการ แต่โดยปกติทั่วไป จะเลือก 1 จุด/1รอบของการดมตัวอย่าง

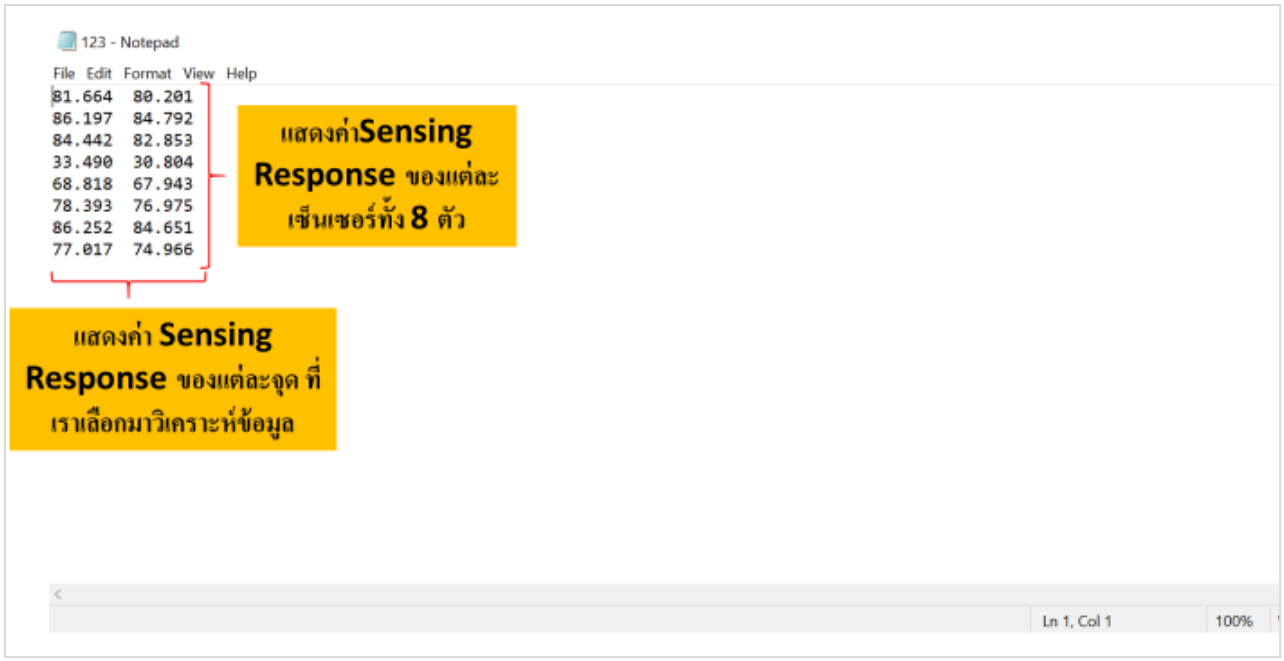
หมายเลข 3 คลิก Update data เพื่อยืนยันการเลือกจุดข้อมูล เมื่อคลิกปุ่มนี้ หน้าจอจะแสดงจุดของข้อมูลที่เราต้องการวิเคราะห์บนกราฟ



4. กด SAVE เพื่อบันทึกข้อมูล โดยตั้งชื่อไฟล์และคลิกปุ่ม OK

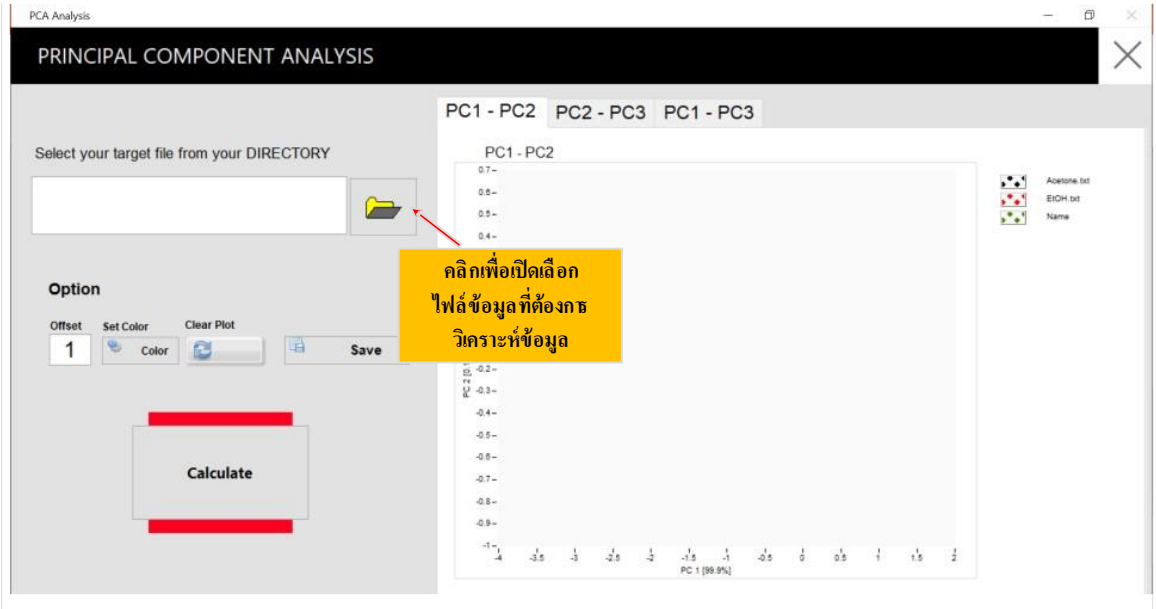


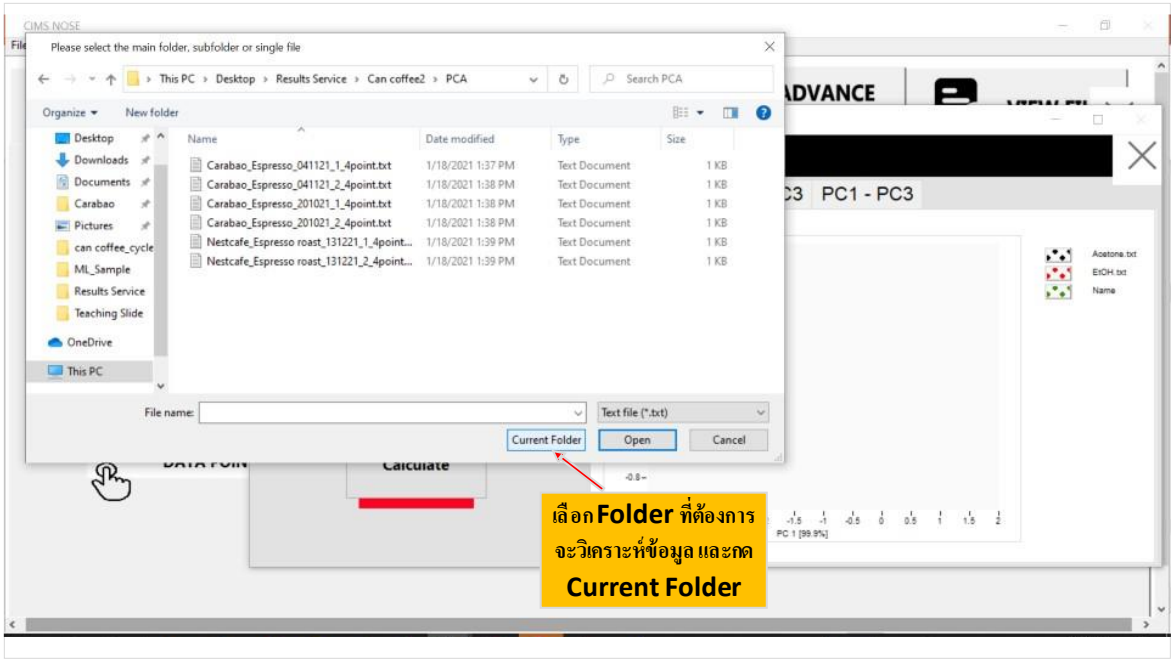
5. ไฟล์ข้อมูลที่กดบันทึก เมื่อเปิดไฟล์ขึ้นมา จะแสดงข้อมูลค่าการตอบสนองของแต่ละจุดที่เราต้องการจะวิเคราะห์ ดังภาพ



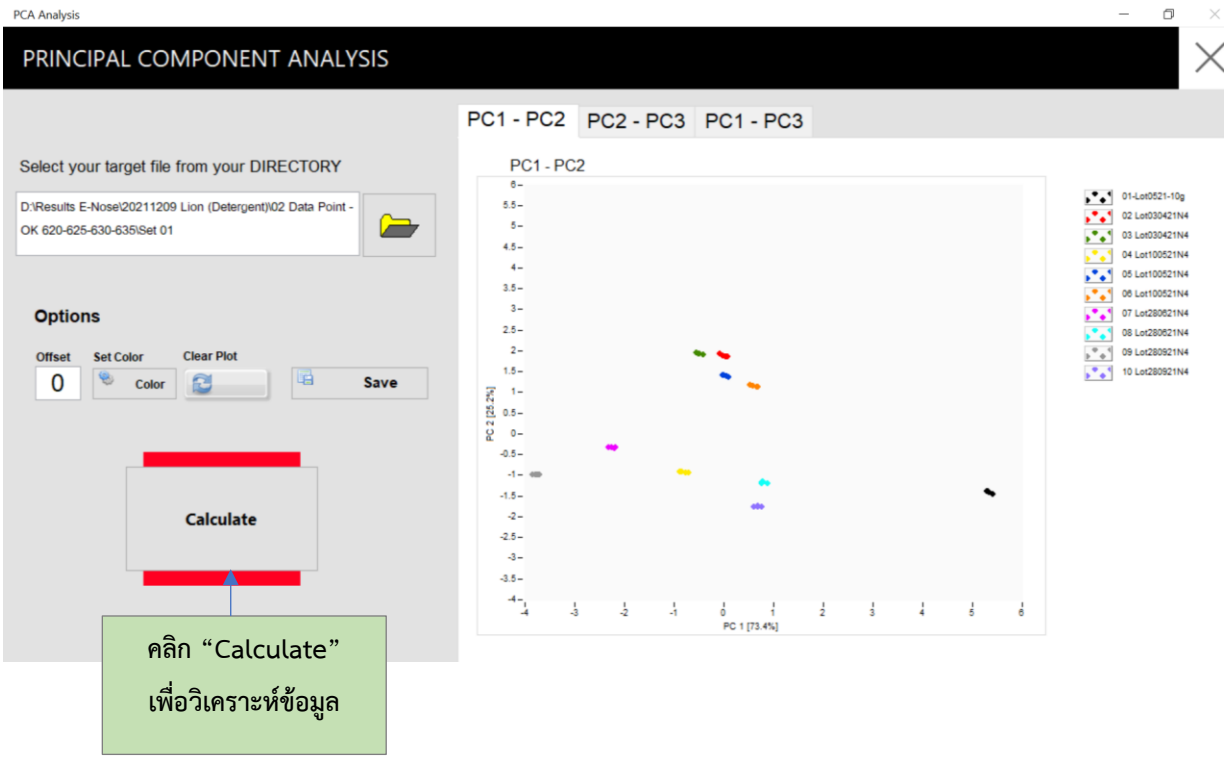
การใช้งาน PCA For Advanced Mode

1. คลิกเลือกการวิเคราะห์ข้อมูล Advanced Analysis จากนั้นคลิกที่ PCA Advanced
2. จากนั้นจะได้หน้าต่างที่สามารถคลิกเพื่อเลือก Folder ของข้อมูลที่จะต้องการวิเคราะห์ ดังภาพ





3. เมื่อเลือกไฟล์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จากนั้นคลิก <u>Calculate</u> จะปรากฏแผนภาพผลการวิเคราะห์ที่กราฟทางด้านขวามือ ดังรูป

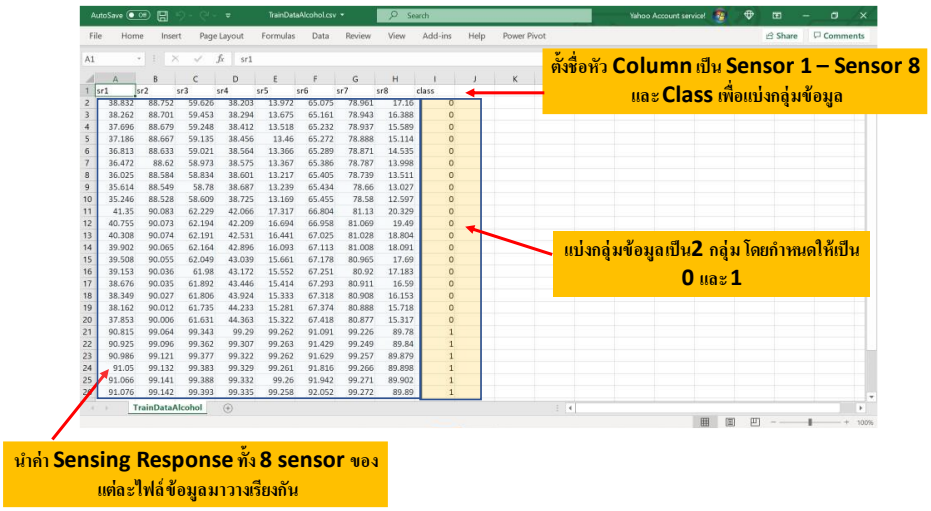


การใช้งาน Machine Learning

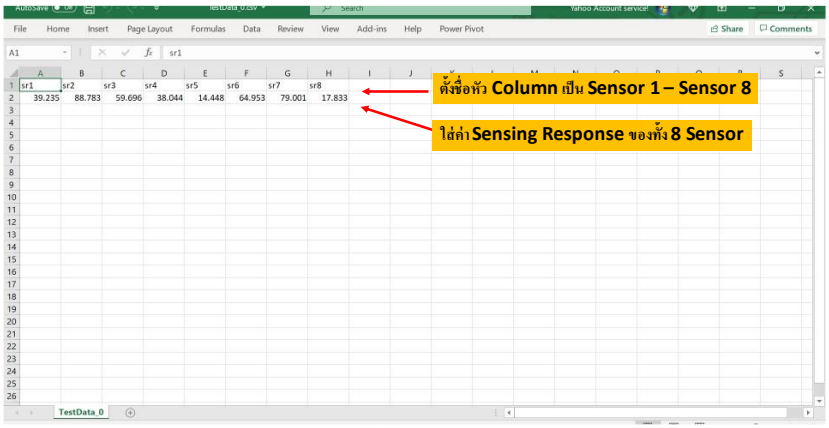
สำหรับการใช้งาน Machine Learning เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลกับฐานข้อมูล เป็นการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เราไม่ทราบค่ามาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มี โดยนำข้อมูลของตัวอย่างมาทำข้อมูลเป็นฐานข้อมูล แล้วนำไฟล์ที่ต้องการเปรียบเทียบมาวิเคราะห์ ซึ่งฐานข้อมูลที่สามารถสร้างได้นั้น จะสามารถกำหนดได้เพียง 2 กลุ่ม หรือสามารถให้คำตอบได้เพียง Yes หรือ No ซึ่งขั้นตอนในการเตรียมข้อมูลและการวิเคราะห์ มีดังนี้

1. การเตรียมไฟล์ข้อมูล สำหรับสร้าง Data Base

ในการเตรียมไฟล์ข้อมูลสำหรับทำ Data base นั้น จะใช้โปรแกรม Microsoft Excel ในการสร้างข้อมูล โดยการเตรียมข้อมูลจะใช้ข้อมูล Sensing Response ของแต่ละไฟล์ ดังนี้

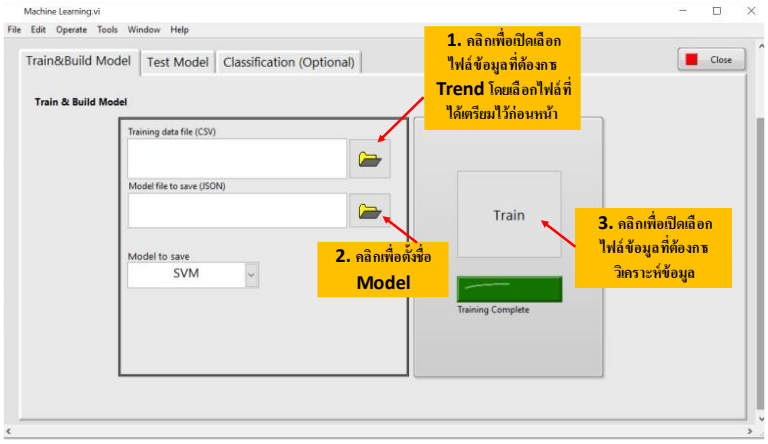


2. การเตรียมไฟล์ข้อมูลตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์

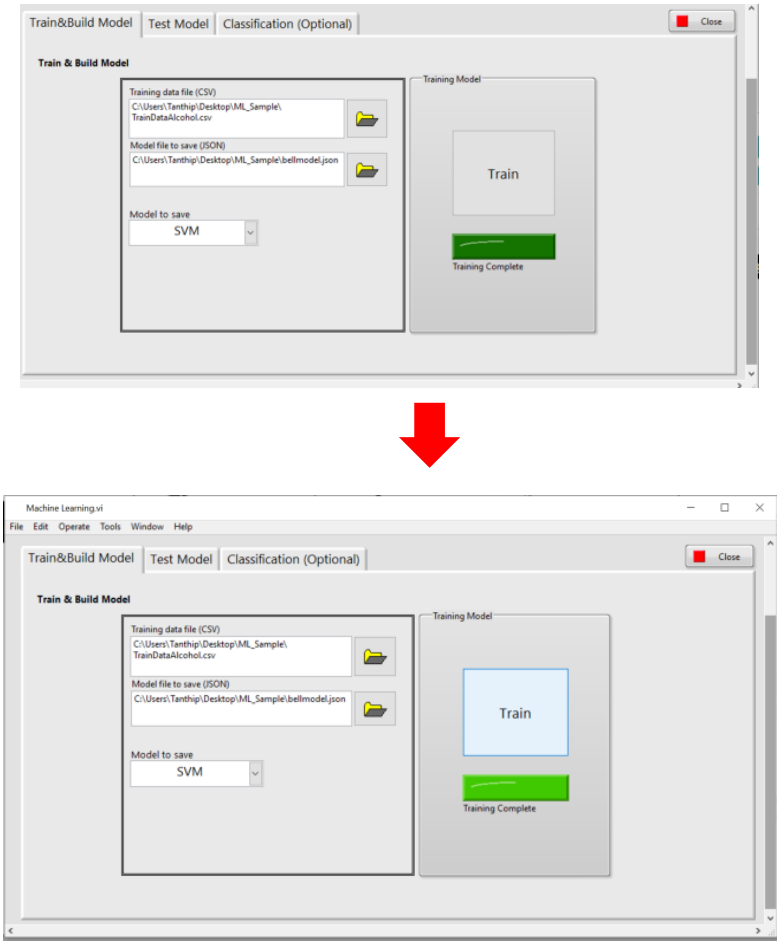


3. การสร้าง Model เพื่อที่จะใช้ในการเปรียบเทียบข้อมูล

3.1 เมื่อคลิกที่ Train&Build Model จะปรากฏหน้าจอให้คลิกเลือกข้อมูลดังภาพ



3.2 เมื่อคลิก Train ตัวปุ่มสีเขียว จะมีการเปลี่ยนสีดังภาพ ซึ่งหมายความว่าการสร้างไฟล์ Model ตามชื่อที่เราได้กำหนดไว้ได้สร้างเสร็จสมบูรณ์ โดยไฟล์ Model จะอยู่ใน Folder ที่เราเลือกไว้ และตัวไฟล์ Model ที่สร้างขึ้นจะมีนามสกุลไฟล์ เป็น **.JSON**

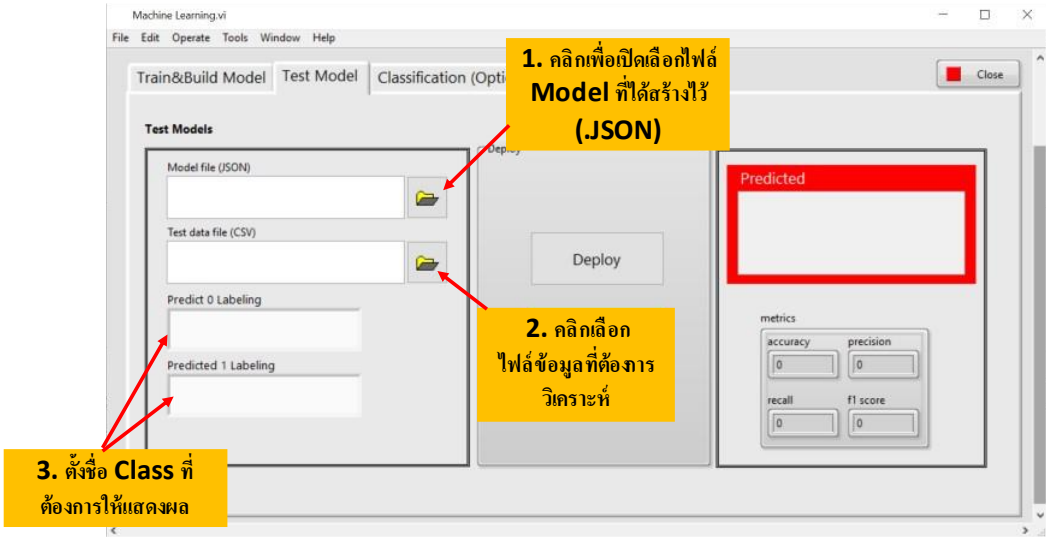


4. การวิเคราะห์ไฟล์ เพื่อเปรียบเทียบข้อมูล

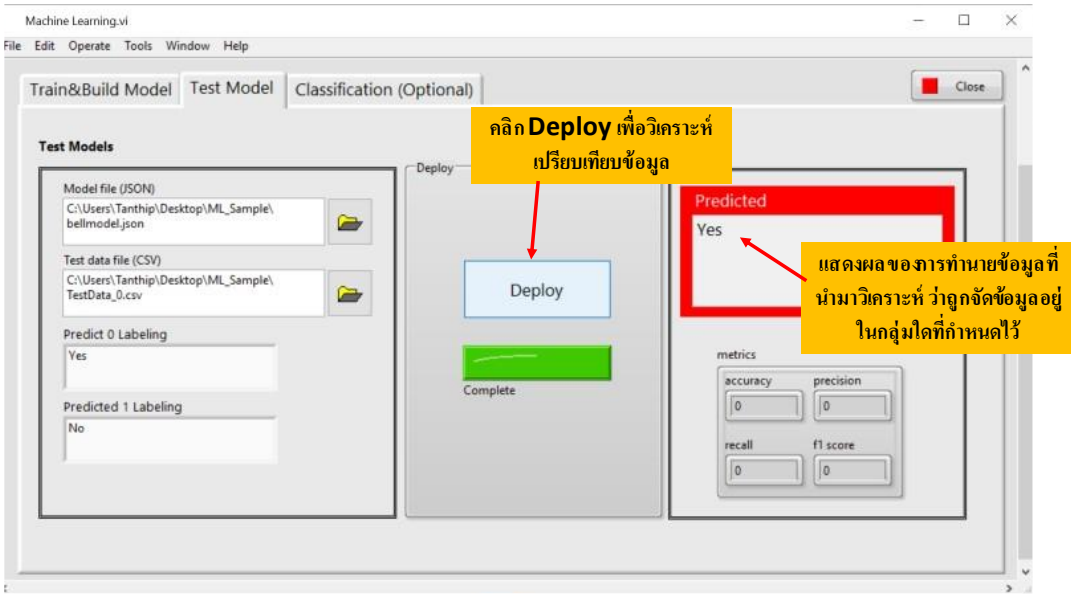
4.1 คลิกเลือกไฟล์ Model ที่ได้สร้างไว้ก่อนหน้านี้

4.2 เลือกไฟล์ที่ต้องการจะเปรียบเทียบข้อมูล

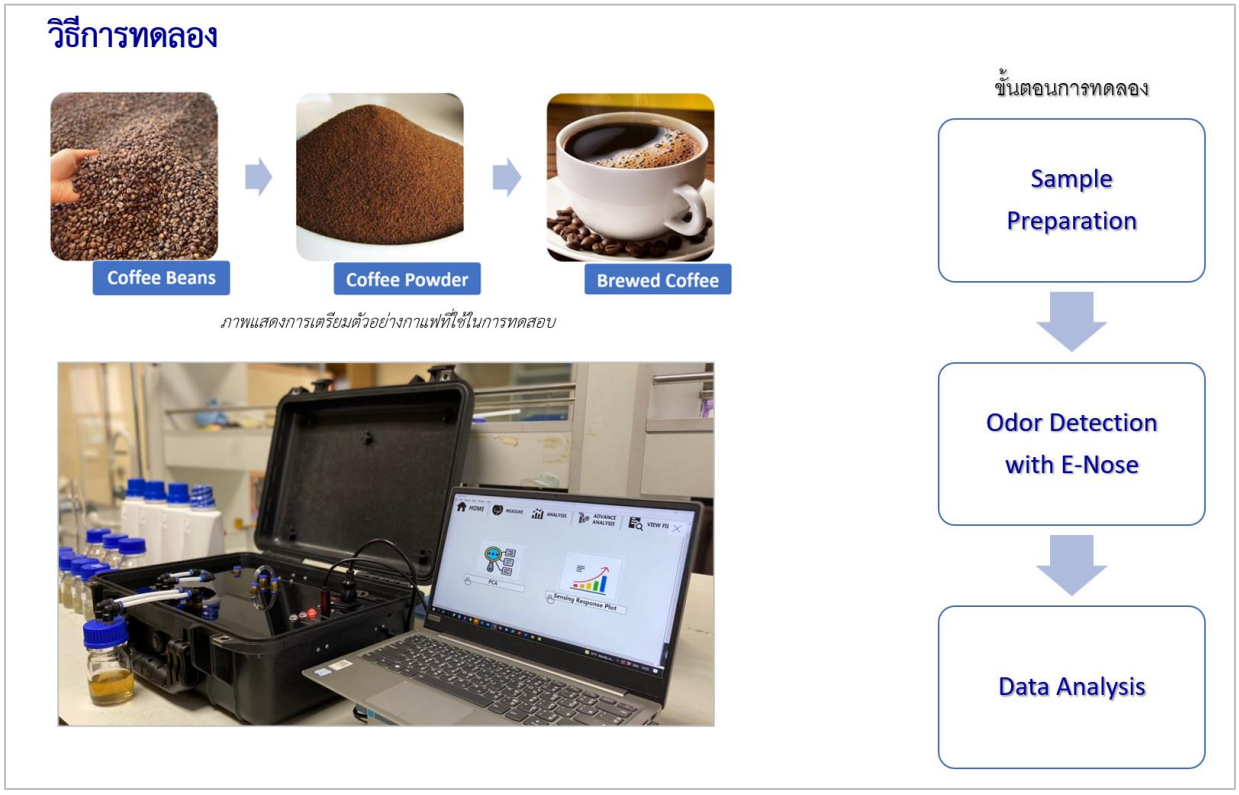
4.3 ตั้งชื่อ Class ที่เราต้องการให้แสดงผล



4.4 คลิก Deploy เครื่องจะประมวลผล และทำนายว่าไฟล์ข้อมูลตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ ได้ถูกจัดกลุ่มอยู่ในข้อมูลใด ดังภาพ



4.2.5.3 ผลการตรวจวัดกลิ่นกาแฟขั้นต้น



ภาพที่ 153 แสดงแผนการทดลองการทดสอบกลิ่น

<u>ขั้นตอนการเตรียมอุปกรณ์และสารตัวอย่าง</u>

(1) อุปกรณ์และเครื่องมือ

- เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ พร้อมระบบอากาศบริสุทธิ์
- อุปกรณ์เครื่องแก้ว ได้แก่ บีกเกอร์ กระบอกตวง เทอร์โมมิเตอร์ ขวดใส่สาร (Vial) กรวยกรอง ฯลฯ
- กระบอกฉีดยา ขนาด 5 mL
- เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- เครื่องวัดค่ากรดด่าง (pH meter)
- อ่างน้ำความถี่สูง (Ultrasonic Bath) พร้อมระบบให้ความร้อน
- เครื่องคั่วกาแฟ (Lasantec)
- เครื่องบดกาแฟ (Lasantec)
- เครื่องชงกาแฟ (Duchess CM5350)

(2) ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

กาแฟเมล็ดพันธุ์อะราบิกา จากแหล่งเพาะปลูกต่างๆ ได้แก่ โครงการหลวงแม่หลอด (อำเภอแม่แตง จังหวัดชียงใหม่), กลุ่มวิสาหกิจชุมชนดอยแม่กำปอง (อำเภอแม่ออน จังหวัดเชียงใหม่) ที่เก็บเกี่ยวในปี พ.ศ. 2563 นำมาใช้ในการทดสอบกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้คณะวิจัยยังได้จัดหาเมล็ดพันธุ์อะราบิกาจากต่างประเทศมาทำการทดสอบในโครงการนี้ อาทิเช่น ประเทศกัวเตมาลา ประเทศโคลัมเบีย เพื่อศึกษาอัตลักษณ์ของกาแฟสายพันธุ์อะราบิกา ที่ทำการเพาะปลูกในแต่ละประเทศ

ภาพที่ 154 แสดงกาแฟเมล็ดพันธุ์อะราบิกา จากพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย

ภาพที่ 155 แสดงกาแฟเมล็ดพันธุ์อะราบิกา จากต่างประเทศ

(3) การเตรียมตัวอย่าง

การคั่วกาแฟ

การบดกาแฟ

การชงกาแฟ

<u>ตัวอย่างเมล็ดกาแฟคั่วบด</u>

ชั่งเมล็ดกาแฟสารปริมาณ 100 กรัม และเทลงในเครื่องคั่วกาแฟ ดังแสดงในรูป โดยใช้เวลาในการคั่ว 30-120 นาที ที่อุณหภูมิการคั่ว 200 องศาเซลเซียส

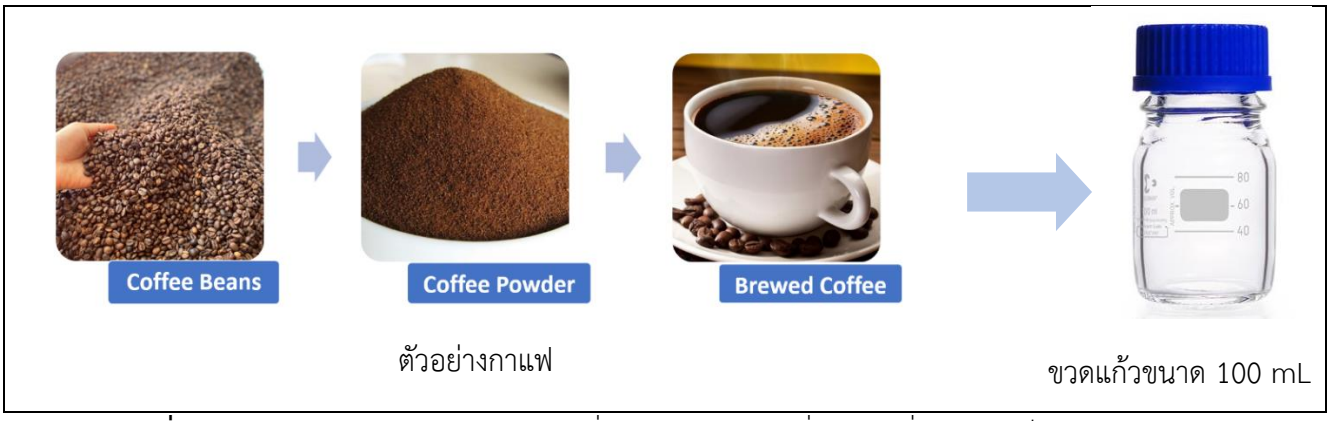
<u>ตัวอย่างกาแฟบด</u>

นำเมล็ดกาแฟที่ผ่านกระบวนการคั่วแล้ว 100 กรัม มาบดด้วยเครื่องบดกาแฟแบบละเอียด

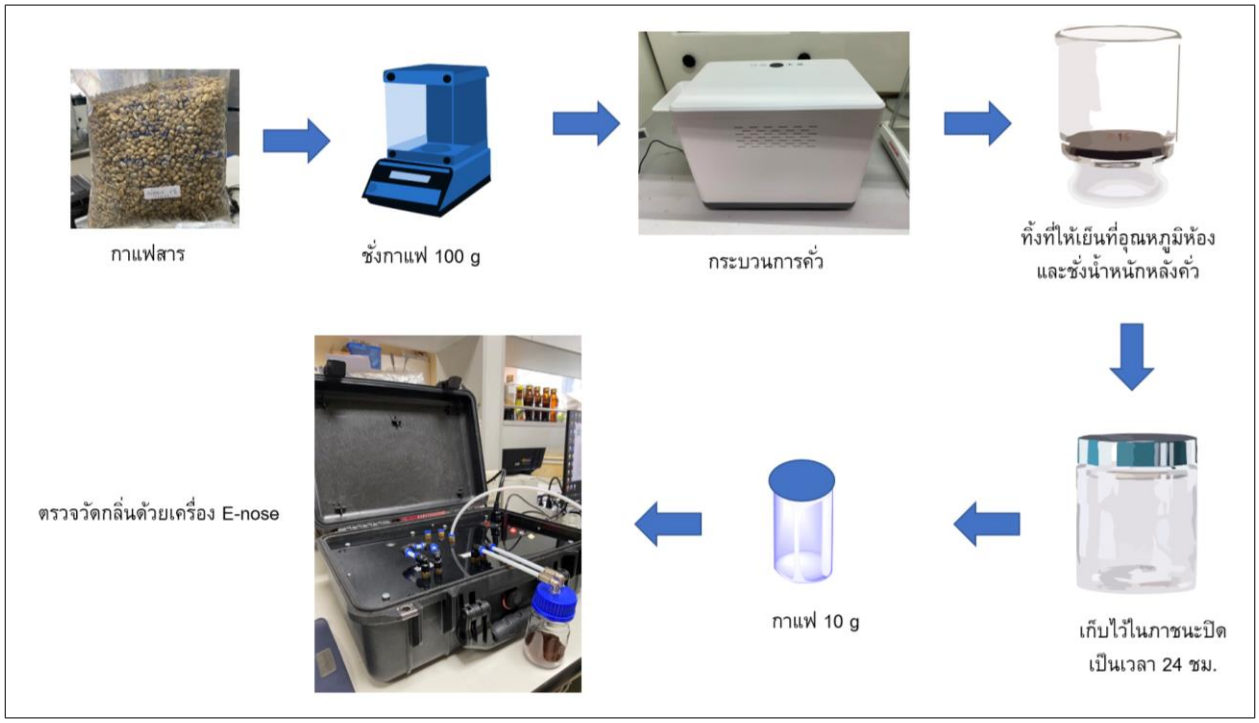
(4) วิธีการทดสอบกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

เตรียมตัวอย่างเมล็ดกาแฟคั่วบดปริมาณ 10 กรัม และ/หรือกาแฟชง ปริมาตร 10 mL เทลงในขวดแก้ว ขนาด 100 mL และรีบปิดฝาขวดทันที เพื่อป้องกันการระเหยของกลิ่น หลังจากนั้นนำตัวอย่างมาทดสอบกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

ทำการทดลองวัดกลิ่นของกาแฟ โดยทำการวัดกลิ่นของตัวอย่างเป็นเวลา 3 นาที เป็นสัญญาณกลิ่นตัวอย่าง (Sample) และวัดอากาศที่ไม่มีกลิ่นที่บรรจุภายในถัง Air Zero Grade เป็นเวลา 7 นาที เป็นสัญญาณ Reference โดยใช้ Flow rate ของอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบด้วยอัตรา 1 ลิตรต่อนาที และทำการทดสอบซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง (n=3)



ภาพที่ 156 แสดงการเตรียมตัวอย่างกาแฟเพื่อทำการทดสอบกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์



ภาพที่ 157 แสดงการเตรียมตัวอย่างกาแฟและตรวจวัดกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

ตารางที่ 33 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดกลิ่นของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

สภาวะการวิเคราะห์	คำอธิบาย	
Sample Amount	ปริมาณตัวอย่าง	10 กรัม
Temperature	อุณหภูมิของตัวอย่าง	อุณหภูมิห้อง
Reference time	ระยะเวลาวัดกลิ่นอากาศบริสุทธิ์	7 นาที
Sample time	ระยะเวลาวัดกลิ่นตัวอย่าง	3 นาที
Flow rate	อัตราการไหลที่ใช้ในการเป่าอากาศบริสุทธิ์ผ่านระบบ E-nose	1 ลิตร/นาที

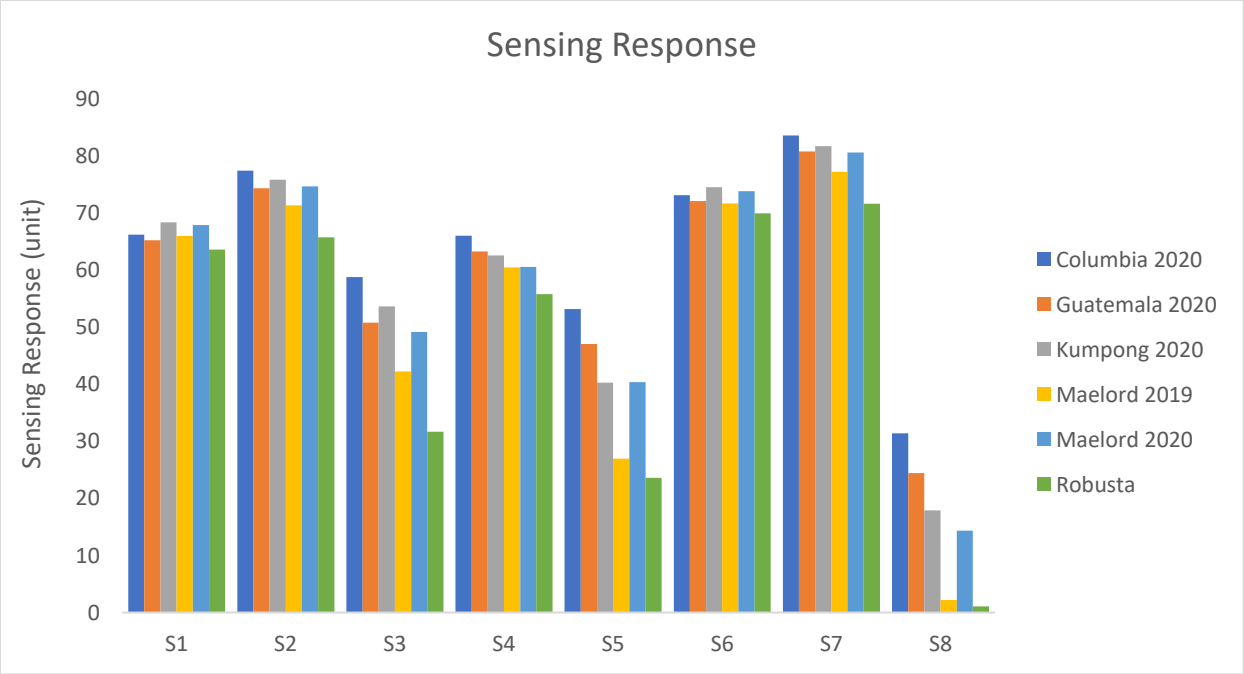
ขั้นการทดลอง

(1) ผลการวิเคราะห์กลิ่นของเมล็ดกาแฟสาร (Coffee Beans)

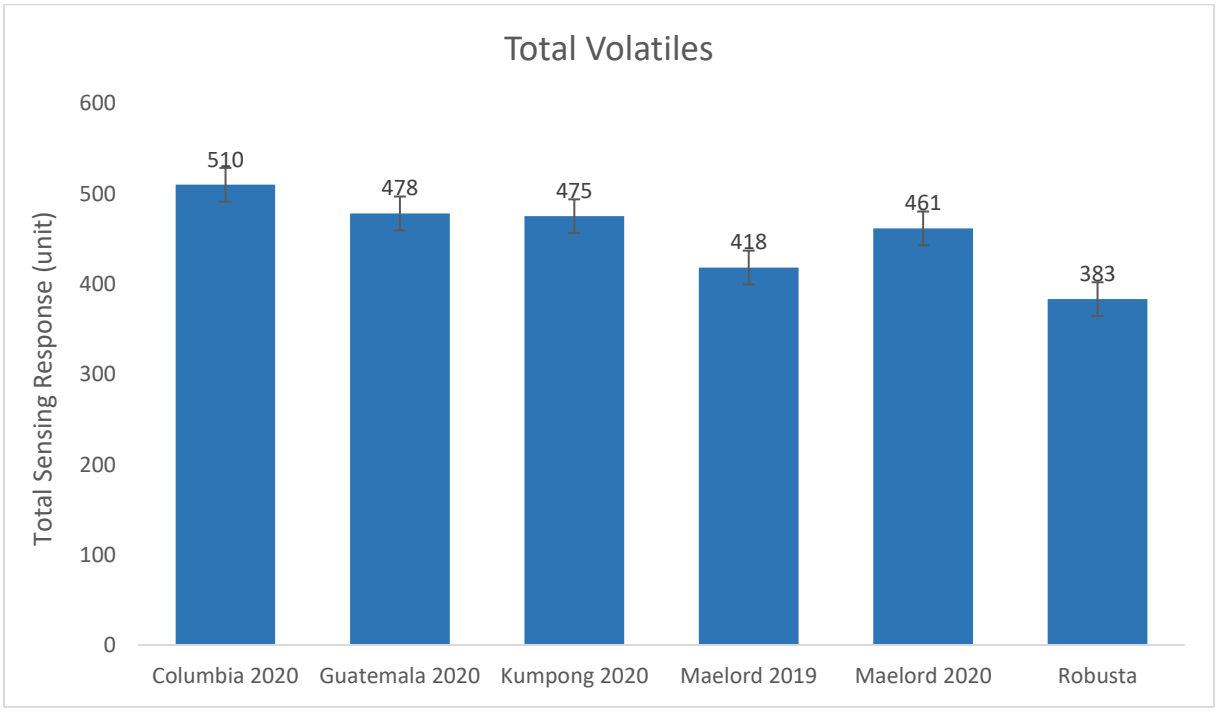
เมล็ดกาแฟสารจากแหล่งเพาะปลูกทั้ง 3 แหล่ง ในประเทศไทย และ 2 แหล่งจากต่างประเทศ ได้ถูกนำมาทดสอบกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ และเปรียบเทียบทั้งในเชิงปริมาณ (quantitative) และเชิงคุณภาพ (qualitative) โดยระดับความเข้มข้นของกลิ่นกาแฟ สามารถพิจารณาได้จากอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างกาแฟ จากรูปด้านล่างจะเห็นได้ว่าค่าอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละตัวนั้นแตกต่างกัน นั่นหมายความว่า เมล็ดกาแฟแต่ละชนิดมีสารระเหยแต่ละกลุ่มในปริมาณที่ต่างกัน

ตารางที่ 34 แสดงชนิดกาแฟและปริมารที่ในการทดสอบ

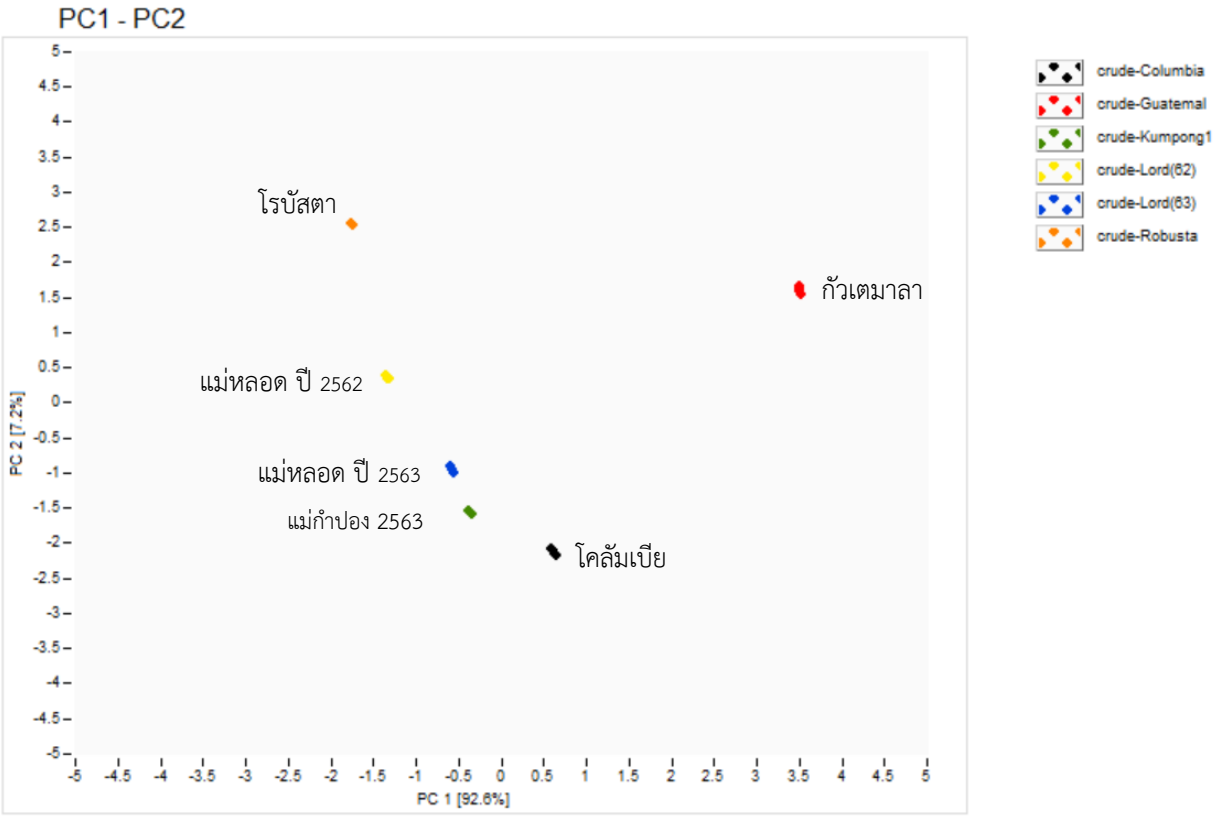
ที่	ชื่อตัวอย่าง	ปริมาณตัวอย่าง (กรัม)	ระดับความสูงจากน้ำทะเล (เมตร)
1	สารกาแฟ (ยังไม่คั่ว) ประเทศโคลัมเบีย	10	1,300
2	สารกาแฟ (ยังไม่คั่ว) ประเทศกัวเตมาลา	10	1,200
3	สารกาแฟ (ยังไม่คั่ว) แม่กำปอง ปี 2563	10	1,232
4	สารกาแฟ (ยังไม่คั่ว) โครงการหลวงแม่หลอด ปี 2562	10	692
5	สารกาแฟ (ยังไม่คั่ว) โครงการหลวงแม่หลอด ปี 2563	10	692
6	สารกาแฟ (ยังไม่คั่ว) โรบัสตา (จ. กาญจนบุรี)	10	500-600



ภาพที่ 158 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟสาร (Coffee Beans)



ภาพที่ 159 แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของเมล็ดกาแฟสาร (Coffee Beans)



ภาพที่ 160 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟสาร (Coffee Beans)

ทำการวิเคราะห์ผลการวัดกลิ่นจากเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะข้อมูลการตอบสนองต่อกลิ่น ซึ่งวิธีนี้เป็นการนำข้อมูลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อกลิ่นของแต่ละตัวอย่างมาคำนวณและพล็อตออกมาเป็นกราฟแบบ 2 มิติ ทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูลกลิ่นระหว่าง Component 1 และ Component 2 (PC1 vs PC2) ซึ่งการวิเคราะห์ชุดข้อมูลด้วยวิธีดังกล่าวสามารถจำแนกลักษณะกลิ่นของแต่ละตัวอย่างได้ โดยแต่ละจุดที่เกิดขึ้นในกราฟของแต่ละสี คือจำนวนข้อมูลของการวัดซ้ำ (Cycle) และข้อมูลจากตัวอย่างเดียวกันจะอยู่ในวงกลมสีเดียวกัน หากวงกลมของแต่ละสีมีการตัดกันหรือใกล้เคียงกัน หมายความว่าชุดข้อมูลนั้น ๆ จะมีความคล้ายคลึงกัน

จากกราฟแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นเมล็ดกาแฟสารที่ยังไม่ผ่านกระบวนการคั่ว พบว่าเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างกาแฟออกจากกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งหมายถึง ลักษณะของกลิ่นที่แตกต่างกัน จากกราฟ พบว่า

- กาแฟสารจากโครงการหลวงแม่หลอด และดอยแม่กำปอง ที่เก็บเกี่ยวผลผลิตในปี 2563 มีลักษณะของกลิ่นที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด

- กาแฟสารจากโครงการหลวงแม่หลอด ที่เก็บผลผลิตในปีต่างกันนั้นมีลักษณะกลิ่นที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด
- กาแฟสารจากประเทศกัวเตมาลา ซึ่งปลูกในระดับความสูงจากน้ำทะเล 1,200 เมตร มีลักษณะกลิ่นแตกต่างจากเมล็ดกาแฟอะราบิกาจากแหล่งกำเนิดอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด

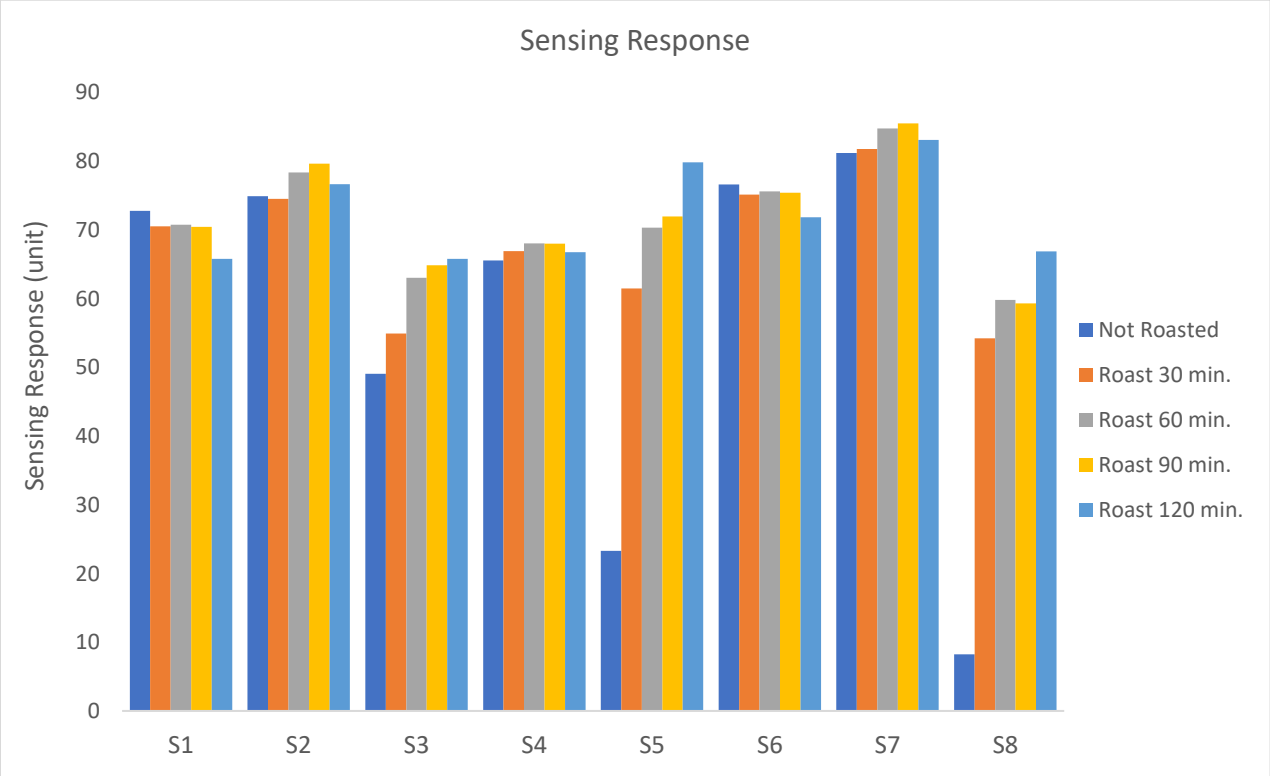
(2) ผลการวิเคราะห์กลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบด (Roasted Coffee Beans)

ในการทดลองนี้ เมล็ดกาแฟสารจากดอยแม่กำปอง จังหวัดเชียงใหม่ ประเทศไทย ได้ถูกนำมาคั่วด้วยเครื่องคั่วแบบดิจิทัลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซสเซียส ที่เวลาการคั่วแตกต่างกัน และทดสอบกลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

ภาพที่ 161 แสดงผลการคั่วกาแฟที่อุณหภูมิ 200°C

ตารางที่ 35 แสดงชนิดสารตัวอย่าง น้ำหนัก และสภาวะการคั่วกาแฟที่อุณหภูมิ 200°C

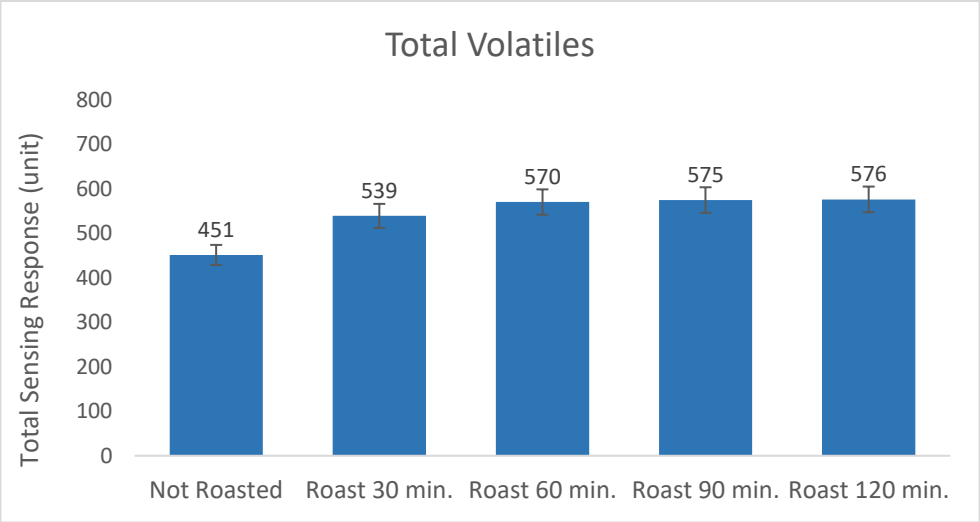
ตัวอย่าง	น้ำหนักก่อนคั่ว (กรัม)	กระบวนการการคั่ว		น้ำหนักหลังคั่ว (กรัม)	น้ำหนักที่หายไป (กรัม)	ร้อยละน้ำหนักที่หายไป
		อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)			
แม่หลอด-ก่อนคั่ว	100.0	-	-	100.0	0.0	0
แม่หลอด-30	100.0	200	30	83.6	16.4	16
แม่หลอด-60	100.0	200	60	80.2	19.8	20
แม่หลอด-90	100.0	200	90	79.1	20.9	21
แม่หลอด-120	100.0	200	120	77.4	22.6	23



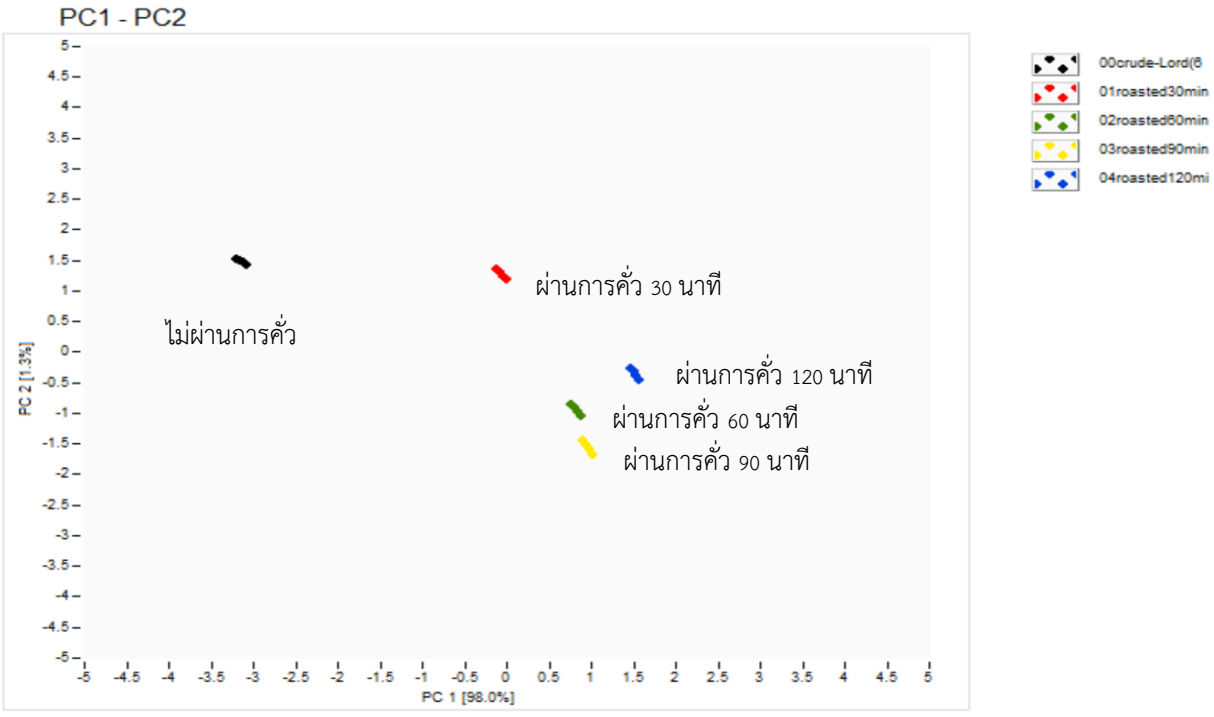
ภาพที่ 162 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟคั่วบด (Roasted Beans)

ภาพแสดงผลอัตราการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์ทั้ง 8 เซนเซอร์ต่อกลิ่นของตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่าง โดยการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์นั้นบ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ไอระเหยจากตัวอย่างที่ทำอันตรกิริยากับแก๊ส

เซนเซอร์ จากกราฟ จะพบว่าการตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละตัวกับตัวอย่างทั้ง 5 ตัวอย่างนั้น มีค่าแตกต่างกัน โดย Sensor 7 (S7) มีอัตราการตอบสนองต่อเซนเซอร์สูงที่สุด



ภาพที่ 163 แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ทั้ง 8 หัวต่อกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบด (Roasted Coffee)



ภาพที่ 164 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟคั่วที่อุณหภูมิ 200°C (Roasted Coffee Beans)

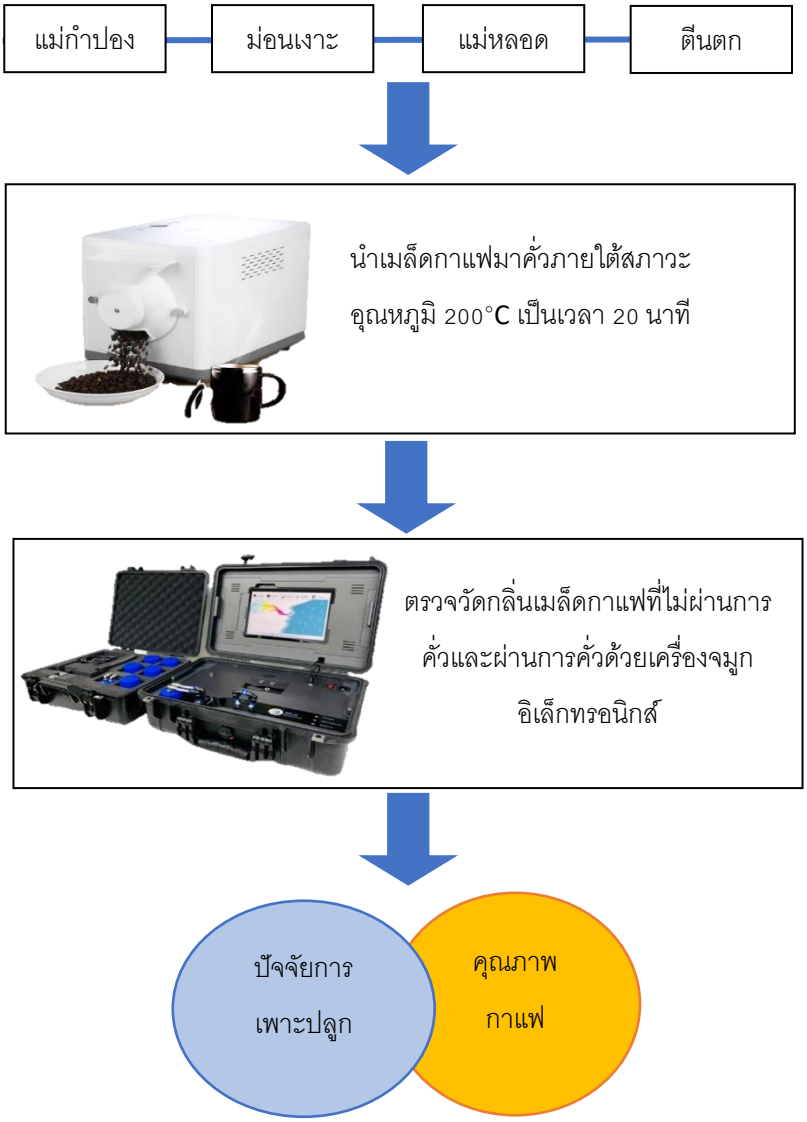
ทำการวิเคราะห์ผลการวัดกลิ่นจากเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) เพื่อเปรียบเทียบลักษณะข้อมูลการตอบสนองต่อกลิ่น ซึ่งวิธีนี้เป็นการนำข้อมูลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อกลิ่นของแต่ละตัวอย่างมาคำนวณและพล็อตออกมาเป็นกราฟแบบ 2 มิติ ทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของข้อมูลกลิ่นระหว่าง Component 1 และ Component 2 (PC1 vs PC2) ซึ่งการวิเคราะห์ชุดข้อมูลด้วยวิธีดังกล่าวสามารถจำแนกลักษณะกลิ่นของแต่ละตัวอย่างได้ โดยแต่ละจุดที่เกิดขึ้นในกราฟของแต่ละสี คือจำนวนข้อมูลของการวัดซ้ำ (Cycle) และข้อมูลจากตัวอย่างเดียวกันจะอยู่ในวงกลมสีเดียวกัน หากวงกลมของแต่ละสีมีการตัดกันหรือใกล้เคียงกัน หมายความว่าชุดข้อมูลนั้น ๆ จะมีความคล้ายคลึงกัน

จากกราฟแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นเมล็ดกาแฟสารที่ผ่านกระบวนการคั่วอุณหภูมิ 200°C พบว่าเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างกาแฟออกจากกันได้เป็นอย่างดี ซึ่งหมายถึงลักษณะของกลิ่นที่แตกต่างกัน จากกราฟ พบว่า เมล็ดกาแฟที่ผ่านการคั่วมีลักษณะที่แตกต่างจากเมล็ดกาแฟที่ยังไม่คั่วอย่างเห็นได้ชัด ลักษณะกลิ่นของการแฟที่คั่วเวลา 60-120 นาที มีลักษณะใกล้เคียงกัน

4.2.6 ผลการศึกษาคุณภาพกลิ่นกาแฟจากความหลากหลายแหล่งการเพาะปลูก

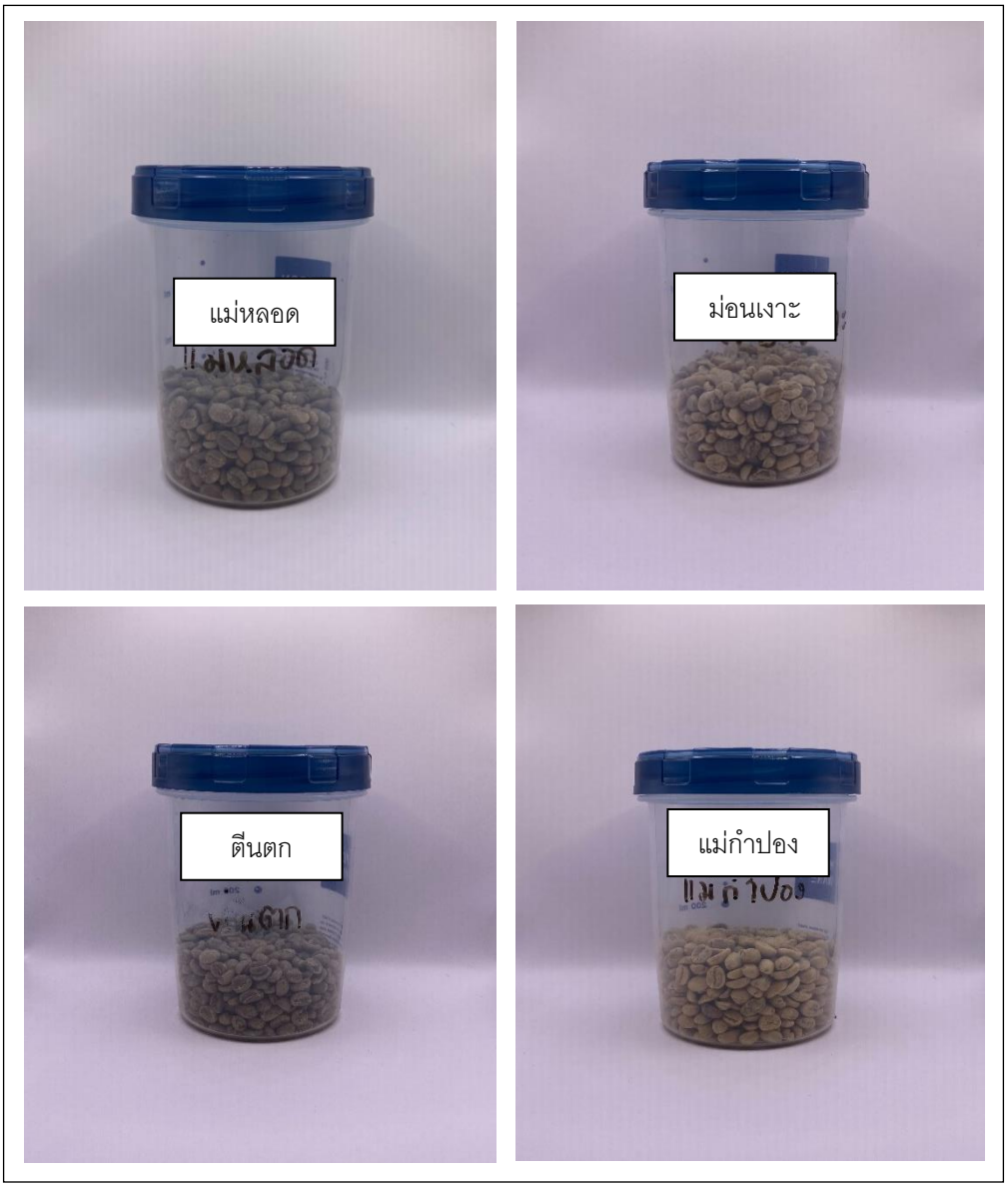
จากการเก็บข้อมูลจากการติดตั้งสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในพื้นที่โครงการหลวงแม่หลอด โครงการหลวงม่อนเงาะ โครงการหลวงตีนตก และหมู่บ้านแม่กำปอง ประกอบกับข้อมูลจากการศึกษาด้านปลายน้ำของเมล็ดกาแฟโดยเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้การศึกษาในลำดับถัดมาคือการศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากปัจจัยการเพาะปลูกในแต่ละแห่งกับผลของการคั่วเมล็ดกาแฟ จะส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ดกาแฟที่เกิดขึ้นในกระบวนการคั่วได้อย่างไร สามารถศึกษาและทดสอบได้ด้วยการพัฒนาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมจากการศึกษาข้างต้นและการพัฒนาโปรแกรมซอฟแวร์ของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์เพื่อตรวจสอบหาความเชื่อโยงระหว่างต้นน้ำและปลายน้ำของกระบวนการผลิตเมล็ดกาแฟ

แผนการทดสอบหาความสัมพันธ์ของคุณภาพกลิ่นกาแฟกับปัจจัยในการเพาะปลูก



ตารางที่ 36 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดกลิ่นของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

สภาวะการวิเคราะห์	**คำอธิบาย**	
Sample Amount	ปริมาณตัวอย่าง	10 กรัม
Temperature	อุณหภูมิของตัวอย่าง	อุณหภูมิห้อง
Reference time	ระยะเวลาวัดกลิ่นอากาศบริสุทธิ์	7 นาที
Sample time	ระยะเวลาวัดกลิ่นตัวอย่าง	3 นาที
Flow rate	อัตราการไหลที่ใช้ในการเป่าอากาศบริสุทธิ์ผ่านระบบ E-nose	1 ลิตร/นาที



ภาพที่ 165 แสดงเมล็ดกาแฟดิบจากโครงการหลวงแม่หลอด โครงการหลวงม่อนเงาะ โครงการหลวงตีนตก และหมู่บ้านแม่กำปอง

ภาพที่ 166 แสดงเมล็ดกาแฟคั่วจากโครงการหลวงแม่หลอด โครงการหลวงม่อนเงาะ โครงการหลวงตีนตก และหมู่บ้านแม่กำปอง

นำตัวอย่างเมล็ดกาแฟจากทั้ง 4 สถานีได้แก่ สถานีโครงการหลวงแม่หลอด (แม่หลอด, Mae-lord), สถานีบ้านแม่กำปอง (Mae-kumpong), สถานีโครงการหลวงตีนตก (ตีนตก, Teentok) และโครงการหลวงม่อนเงาะ (ม่อนเงาะ, Montngo) มาตรวจวัดกลิ่นด้วยเทคโนโลยีเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ โดยศึกษาความเข้มของระดับกลิ่นเมล็ดกาแฟซึ่งก็คืออัตรารวมการตอบสนองของเซนเซอร์ (Total Sensing Response) และวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis :PCA) เพื่อใช้ในการจดจำรูปแบบของกลิ่นและจำแนกกลิ่นว่าเมล็ดกาแฟตัวอย่างจากทั้ง 4 สถานีมีเอกลักษณ์กลิ่นเหมือนแตกต่างกันอย่างไรเมื่อผ่านกระบวนการคั่ว

เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์จะตอบสนองต่อกลิ่น และแปลผลของกลิ่นนั้นออกมาเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ได้ 3 วิธีดังนี้

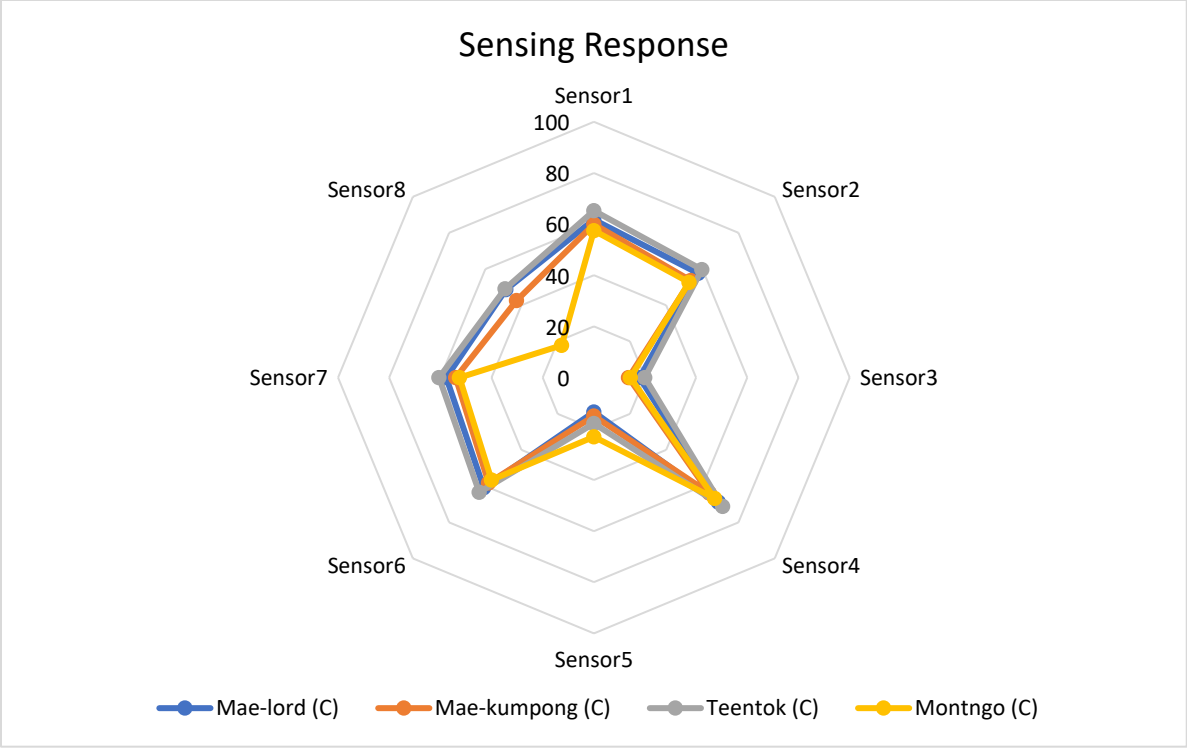
(1) อัตราการตอบสนองของแก๊สเซนเซอร์รายหัวต่อกลิ่นของสถานที่นั้น ๆ (Sensor Response)

(2) การวิเคราะห์ความแตกต่างของคุณลักษณะของกลิ่นแต่ละสถานที่ด้วยวิธี Principal Component Analysis (PCA)

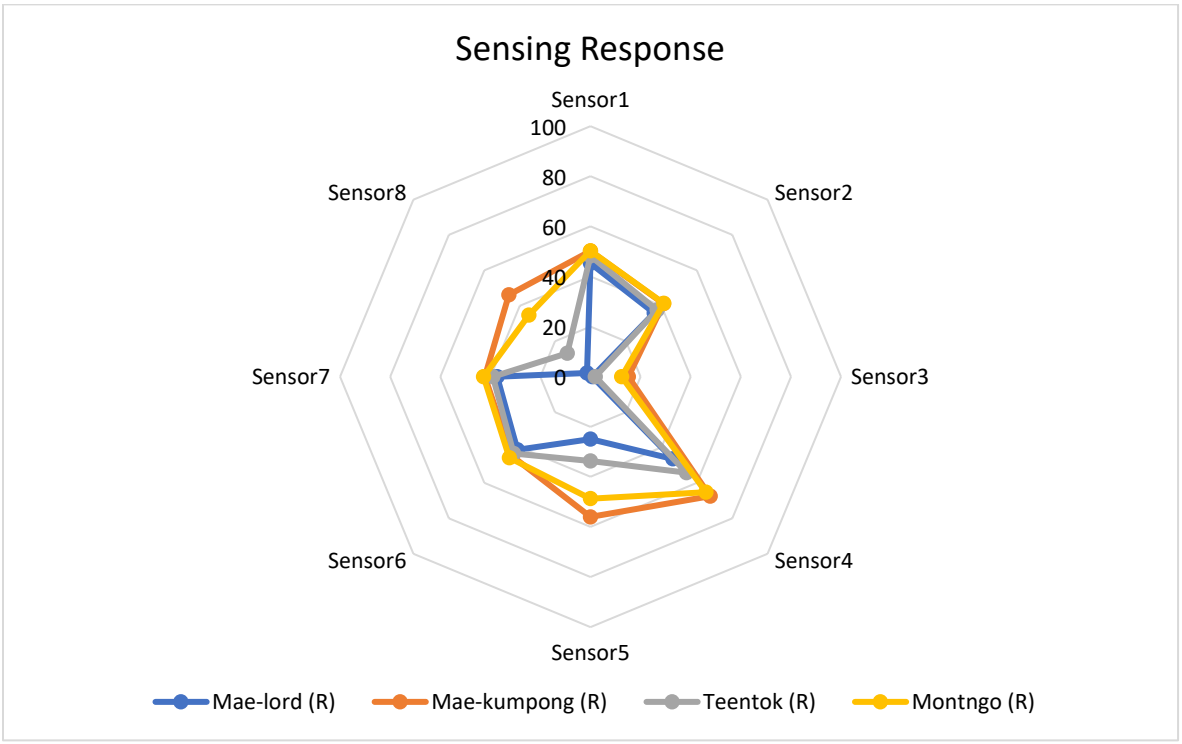
(3) การวิเคราะห์ความเหมือนของคุณลักษณะกลิ่นแต่ละตัวอย่างด้วยวิธี Hierarchical Cluster Analysis (HCA)

ตารางที่ 37 แสดงผลการทดสอบระดับความเข้มของกลิ่นเมล็ดกาแฟด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

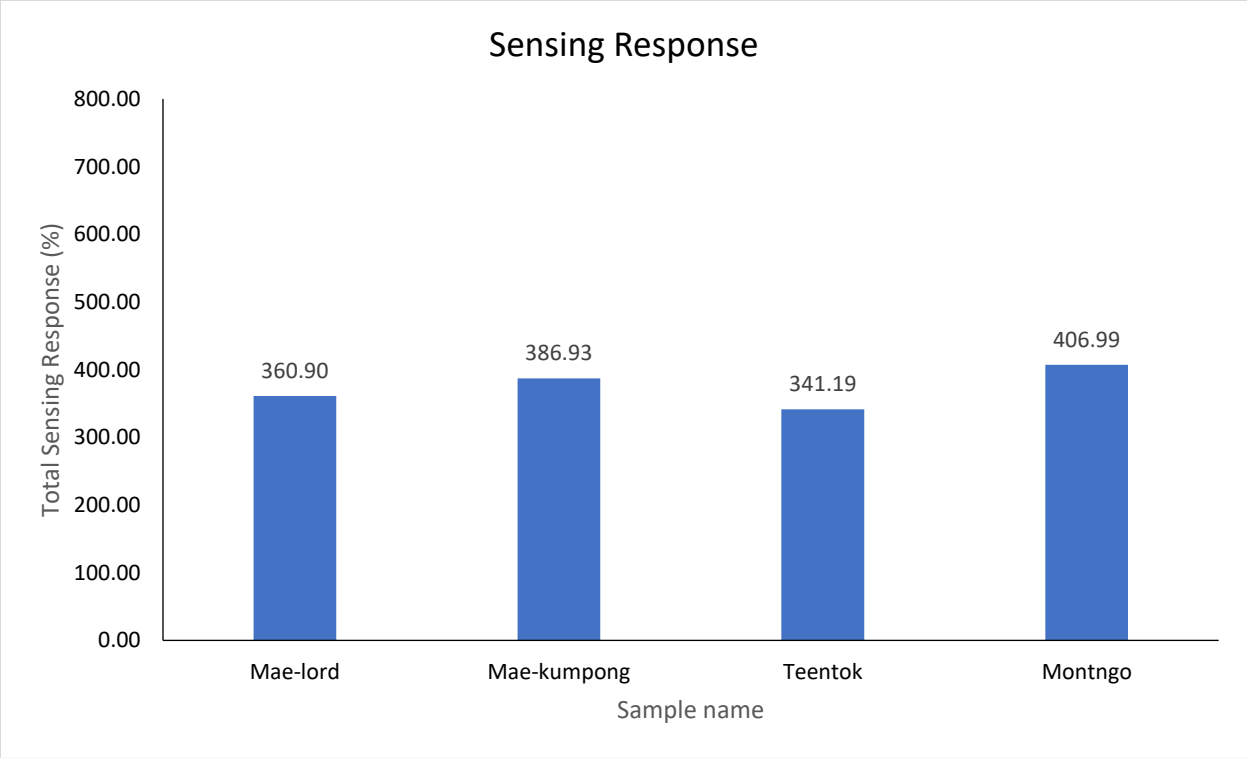
ตัวอย่างเมล็ดกาแฟ	สถานี	ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)	ระดับความเข้มกลิ่น (หน่วย)	
			ก่อนคั่ว	หลังคั่ว
แม่หลอด (Mae-lord)	โครงการหลวงแม่หลอด	680	360.90	362.84
แม่กำปอง (Mae-kumpong)	บ้านแม่กำปอง	1,100	386.93	233.93
ตีนตก (Teentok)	โครงการหลวงตีนตก	770	341.19	341.21
ม่อนเงาะ (Montngo)	โครงการหลวงม่อนเงาะ	1,240	406.99	271.11



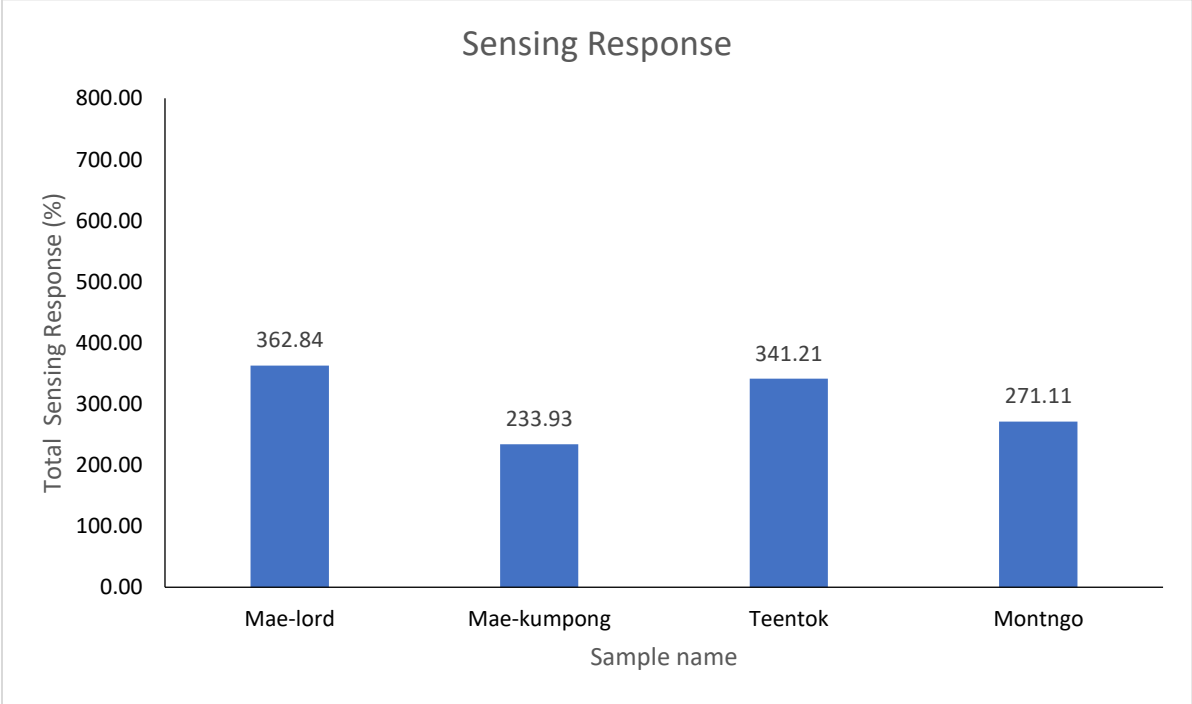
ภาพที่ 167 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟดิบ



ภาพที่ 168 แสดงอัตราการตอบสนองของก๊าซเซนเซอร์แต่ละหัวต่อกลิ่นของตัวอย่างเมล็ดกาแฟคั่ว



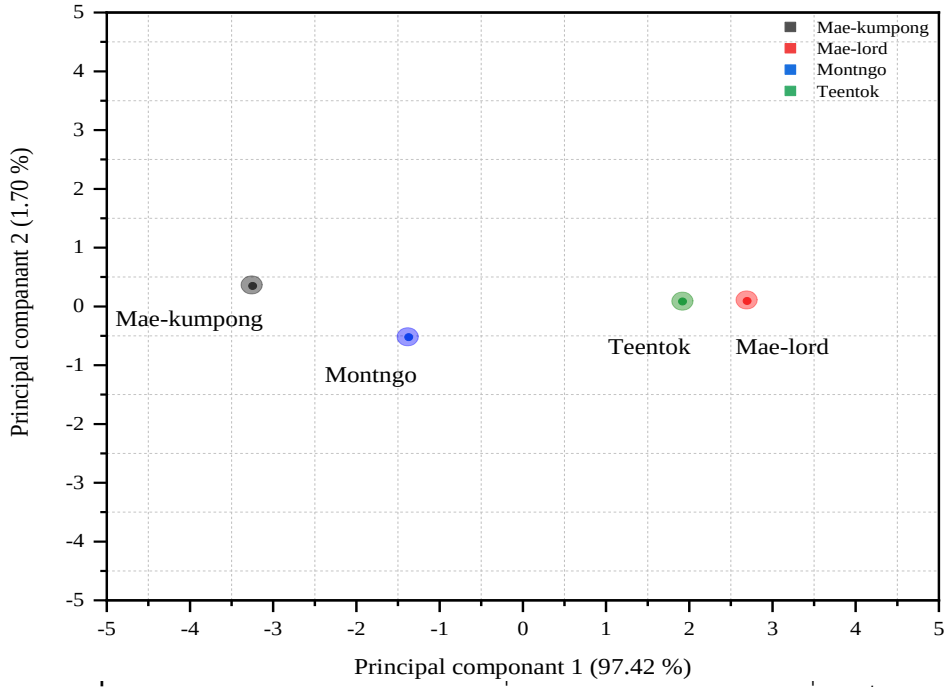
ภาพที่ 169 แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ต่อกลิ่นเมล็ดกาแฟดิบ



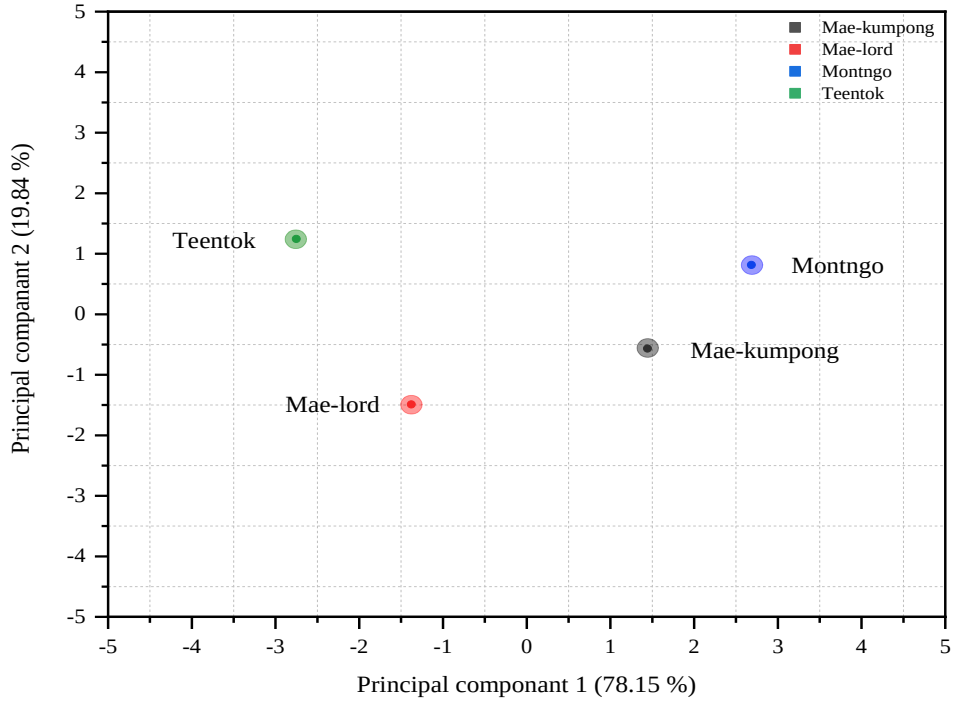
ภาพที่ 170 แสดงอัตราการตอบสนองรวมของก๊าซเซนเซอร์ต่อกลิ่นเมล็ดกาแฟคั่ว

ผลการศึกษาการเปลี่ยนเทียบกลิ่นระหว่างเมล็ดกาแฟที่ยังไม่ผ่านการคั่วและผ่านการคั่วแล้วจากตัวอย่างทั้ง 4 สถานี พบว่า เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถจำแนกกลิ่นความแตกต่างระหว่างกาแฟที่ผ่านและไม่ผ่านการคั่วได้อย่างชัดเจน เนื่องจากสารอินทรีย์ระเหยจากเมล็ดกาแฟดิบ (crude/ green coffee bean) กับเมล็ดกาแฟที่ผ่านการคั่ว (roasted coffee bean) จะมีเอกลักษณ์กลิ่นที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เป็นผลอันเนื่องมา maillard reaction เป็นปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารจำพวกเอมีนและน้ำตาลภายในเมล็ดกาแฟเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนสูงขึ้น ซึ่งก็คือกระบวนการทางเคมีที่เกิดขึ้นกับเมล็ดกาแฟในระหว่างคั่ว

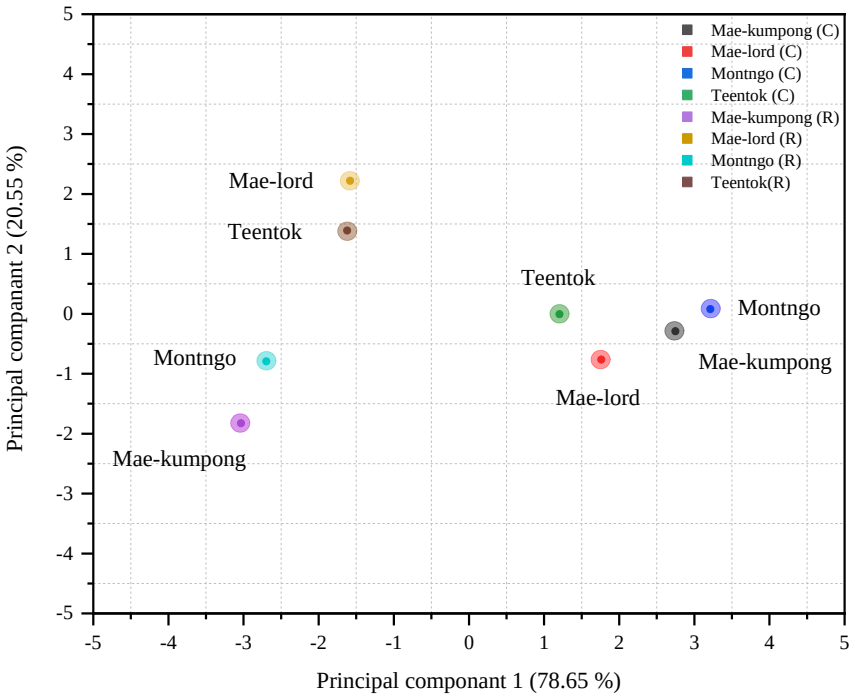
เมื่อพิจารณาลักษณะกลิ่นแต่ละตัวอย่างเมล็ดกาแฟจะพบว่า ตัวอย่างเมล็ดกาแฟจากแม่กำปองมีแนวโน้มกลิ่นคล้ายกับเมล็ดกาแฟจากม่อนเงาะ ขณะที่เมล็ดกาแฟจากแม่หลอดแสดงลักษณะกลิ่นคล้ายคลึงกับโครงการหลวงตีนตก ลักษณะกลิ่นที่กล่าวนี้ปรากฏทั้งในกระบวนการที่ยังไม่ผ่านการคั่ว และผ่านการคั่วแล้วดังแสดงในแผนภาพ PCA อีกทั้งผลจากการวิเคราะห์ความเหมือนของคุณลักษณะกลิ่นแต่ละตัวอย่างด้วยวิธี Hierarchical Cluster Analysis (HCA) เพื่อศึกษาความคล้ายคลึงกันของลักษณะกลิ่นที่ทำการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ จึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลการตอบสนองของเซนเซอร์ต่อกลิ่นของตัวอย่างด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบ Cluster Analysis ซึ่งจะสามารถบอกความคล้ายคลึงกันของลักษณะกลิ่นของแต่ละสถานที่ออกมาเป็นกราฟคล้ายกิ่งไม้ โดยกลิ่นที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันจะมีค่า Similarity ที่สูง ส่วนกลิ่นที่มีลักษณะแตกต่างกันก็จะมีค่า Similarity ที่ต่ำกว่า ซึ่งให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับ PCA ที่ว่าสามารถแบ่งแยกคุณลักษณะกลิ่นออกเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกประกอบด้วยเมล็ดกาแฟจากแม่หลอดและตีนตกที่มีกลิ่นคล้ายกัน สำหรับกลุ่มที่สองประกอบด้วยแม่กำปองและม่อนเงาะ โดยตัวอย่างกลิ่นทั้งสองกลุ่มมีลักษณะแตกต่างกันอย่างชัดเจนดังแสดงในแผนภาพ HCA สามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างเมล็ดกาแฟที่อยู่ในกลุ่มวงกลมเดียวกันจะให้ลักษณะของกลิ่นที่คล้ายคลึงกันแม้ผ่านกระบวนการคั่วแล้ว ชี้ให้เห็นว่ามีขั้นตอนอื่นที่เป็นปัจจัยหลักส่งผลให้เมล็ดกาแฟมีกลิ่นคล้ายกันแม้ควบคุมกระบวนการคั่วให้เหมือนกัน



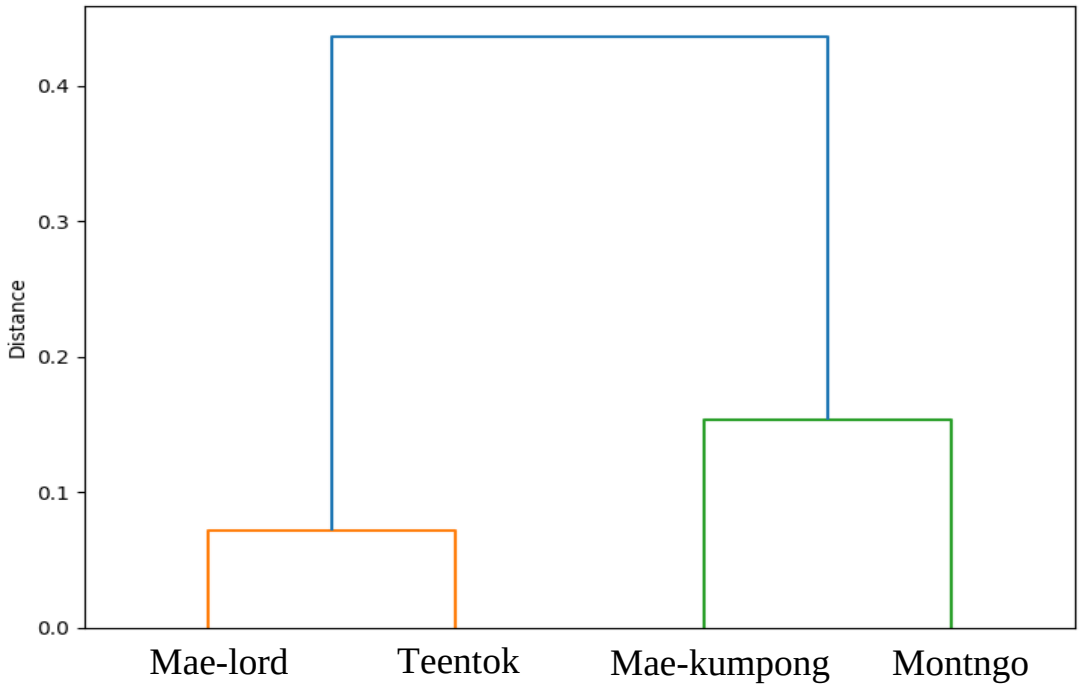
ภาพที่ 171 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟดิบ



ภาพที่ 172 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟคั่ว



ภาพที่ 173 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟดิบเปรียบเทียบกับคั่ว



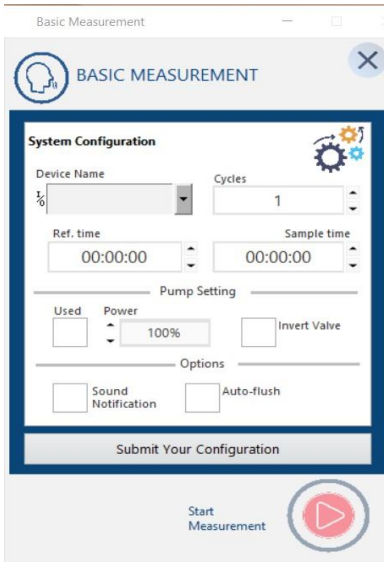
ภาพที่ 174 แสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี HCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟ

4.2.7 ผลการพัฒนาซอฟต์แวร์รูปแบบปรับปรุงใหม่

โปรแกรม Odora ถูกพัฒนาต่อยอดมาจากโปรแกรม CIMS NOSE ที่ได้กล่าวไว้ในเนื้อหาข้างต้น การัฒนาซอฟแวร์เพื่อปรับปรุงให้เหมาะสมและรูปลักษณ์ที่ทันสมัยเหมาะกับการใช้งานกับเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์มากขึ้น โดยมีการพัฒนารูปแบบการใช้งานที่หลากหลาย เบื้องต้นได้ออกแบบให้ซอฟแวร์ง่ายต่อการใช้งานโดยมี 2 โปรแกรมการใช้งาน ในส่วนแรกใช้สำหรับการตรวจวัดกลิ่นโดยเฉพาะ ในขณะที่โปรแกรมอีกส่วนใช้สำหรับการวิเคราะห์ผลโดยเฉพาะ การพัฒนาปรับปรุงนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ขณะทำการทดลอง โดยผู้ใช้งานสามารถวิเคราะห์ผลข้อมูลที่ได้ตรวจวัดแล้วขณะที่ทำงานตรวจวัดในปัจจุบันได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดเบื้องต้นที่พบในโปรแกรม CIMS NOSE และผลการใช้งานโปรแกรม Odora บ่งชี้ว่าสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ อีกทั้งเพิ่มศักยภาพในการวิเราะห์ข้อมูลกลิ่นจากตัวอย่างเมล็ดกาแฟ โดยโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์มีรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลที่ถูกพัฒนาเพิ่มเติม

<u>การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโหมดตรวจวัดกลิ่น (Odora Measurement)</u>

3. คลิกเลือกการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์
4. เลือกโหมด Basic Measurement
5. เลือกเติมข้อมูลที่ใช้ในการตรวจวัดกลิ่น ได้แก่ Device name, Cycles, Ref. time, Sample time, Used Pump, Invert Valve, Sound Notification และ Auto-flush จากนั้น กด Submit your configuration และ Submit Measurement ตามลำดับ



การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโหมดตรวจวิเคราะห์กลิ่น (Odora Analytics)

ในโหมด Analytics จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลโดยโหมดขั้นสูงจากผลการทดลองที่ได้ โดยสามารถทำได้ 6 รูปแบบคือ

1. View Graph เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลจากการเปลี่ยนแปลงของเซนเซอร์ต่อการตรวจวัดตัวอย่างนั้นๆ
2. Sensing Response เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มของกลิ่นตัวอย่าง
3. Principal Component Analysis (PCA) เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลลักษณะของกลิ่นเปรียบเทียบกัน โดยแสดงผลในรูปแบบแผนภาพกลิ่น
4. Smell Comparison เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบความแตกต่างของกลิ่นโดยระบุเป็นร้อยละความแตกต่าง สอดคล้องกับการแสดงผลใน Principal Component Analysis

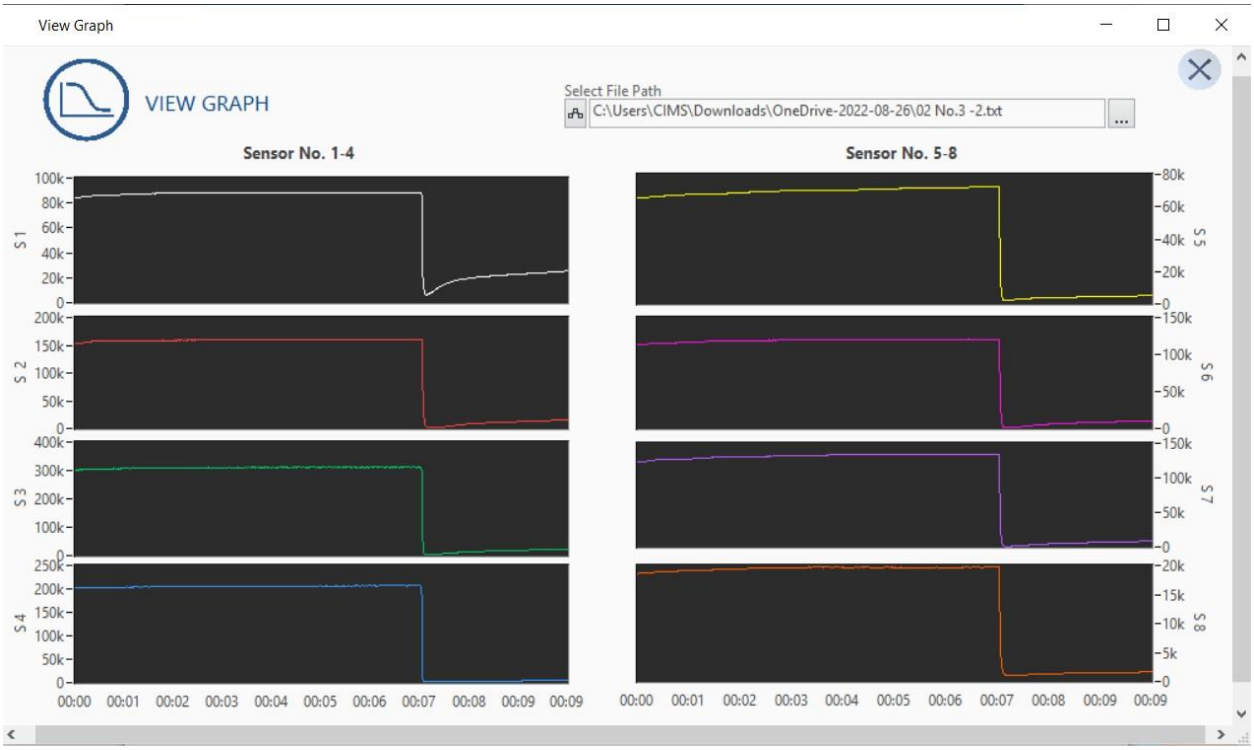
5. Machine Learning เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลจากฐานข้อมูล (Data base) ที่มีโดยอาศัยจากการสร้างฐานข้อมูล และนำไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์มาเปรียบเทียบ

6. Hierarchical Clustering Analysis (HCA) เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลแสดงความเหมือนของกลิ่นโดยการจับกลุ่มคล้ายกิ่งไม้

โดยจะแสดงตัวอย่างรูปแบบการวิเคราะห์ที่นำมาปรับใช้กับการตรวจวัดกลิ่นกาแฟ ได้แก่ View Graph, Sensing Response, Principal Component Analysis และ Hierarchical Clustering Analysis ดังนี้

<u>การใช้งาน View Graph</u>

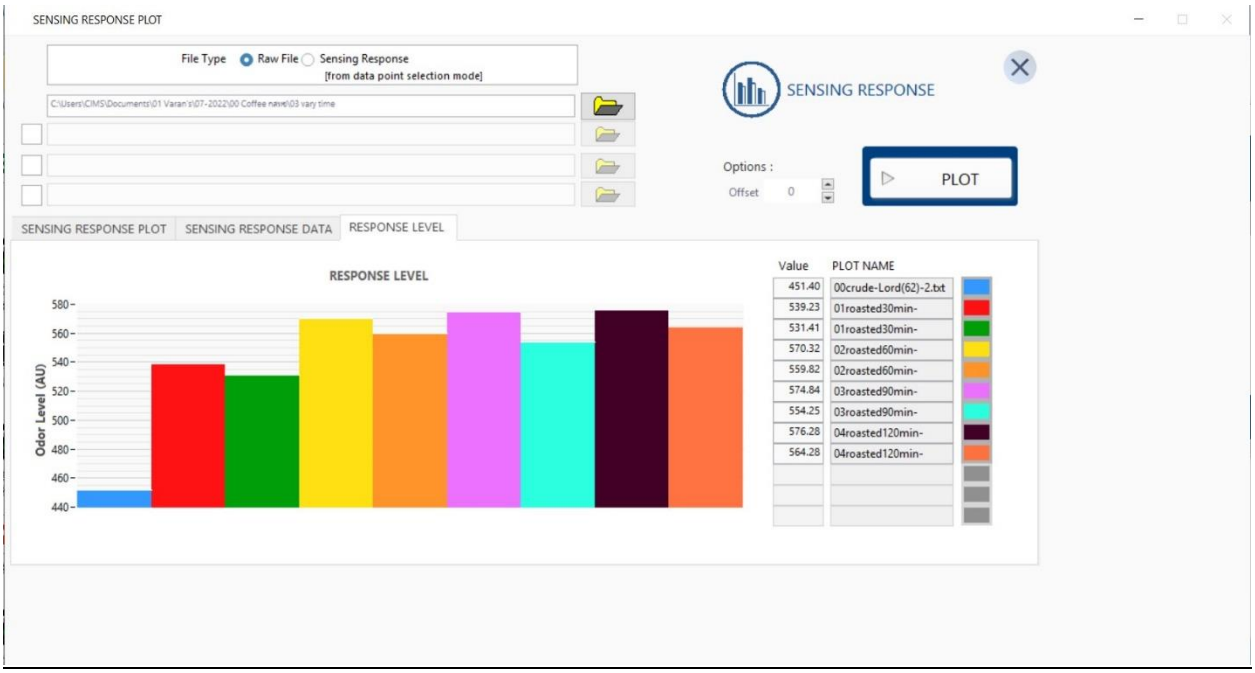
1. คลิกเลือกการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์
2. จากนั้นจะได้หน้าต่างที่แสดงค่าการเปลี่ยนแปลงเซนเซอร์ของข้อมูลนั้น

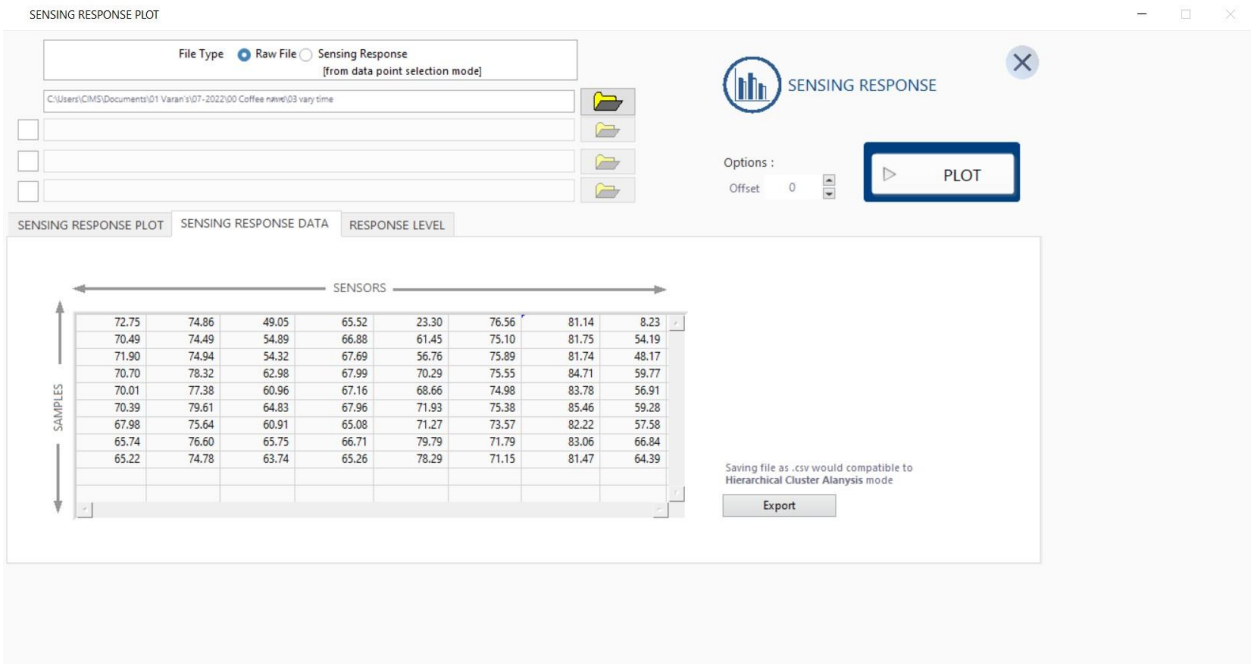


การใช้งาน Sensing Response

1. คลิกเลือกการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์

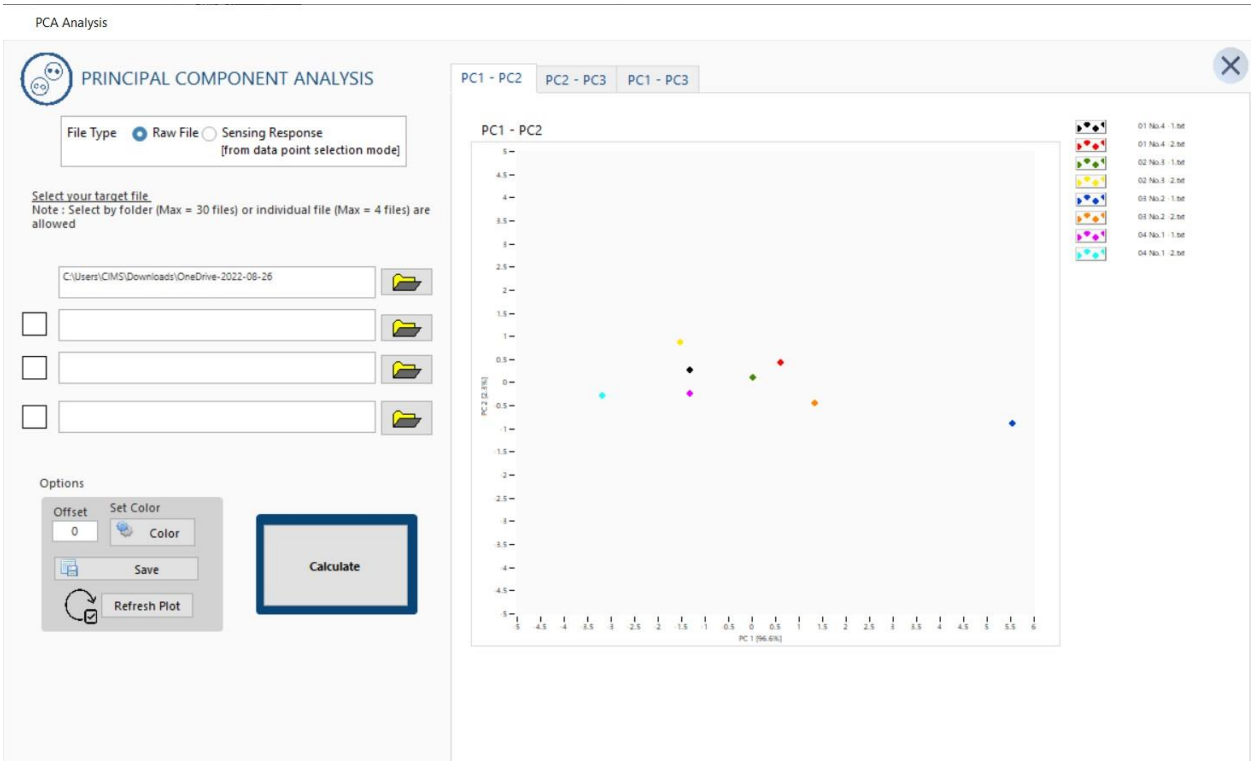
2. เลือกการแสดงข้อมูลความเข้มข้นกลิ่นต่อเซนเซอร์รายหัว คลิ๊ก “**Sensing Response Plot**” หรือเลือกการแสดงข้อมูลความเข้มข้นกลิ่นเพื่อนำไปวิเคราะห์ คลิ๊ก “**Sensing Response Data**” และเลือกการแสดงข้อมูลภาพรวมความเข้มข้นกลิ่นแต่ละตัวอย่าง คลิ๊ก “**Response Level**”





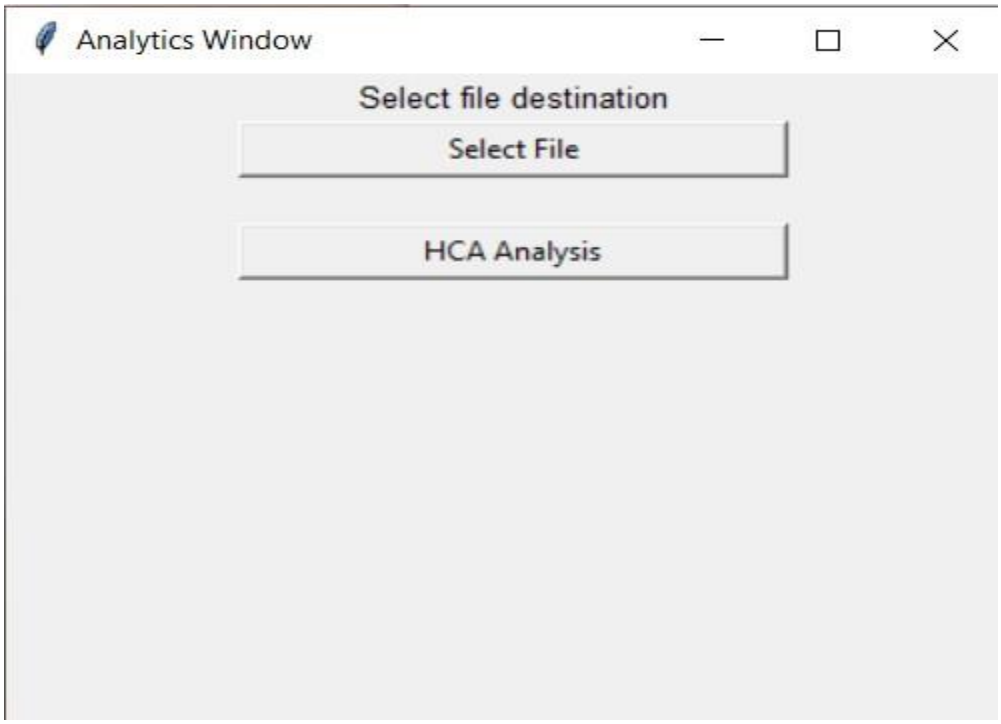
การใช้งาน Principal Component Analysis (PCA)

1. คลิกเลือกการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์
2. จากนั้นเลือกกด Calculate เพื่อแสดงผลแผนภาพกลิ่นทางด้านซ้าย



การใช้งาน Hierarchical Clustering Analysis (HCA)

1. คลิกเลือกการวิเคราะห์ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์โดยกด Select File จากนั้นเลือกไฟล์ excel
2. กดปุ่ม HCA Analysis เพื่อแสดงผลข้อมูล


Analytics Window
Select file destination
Select File
HCA Analysis

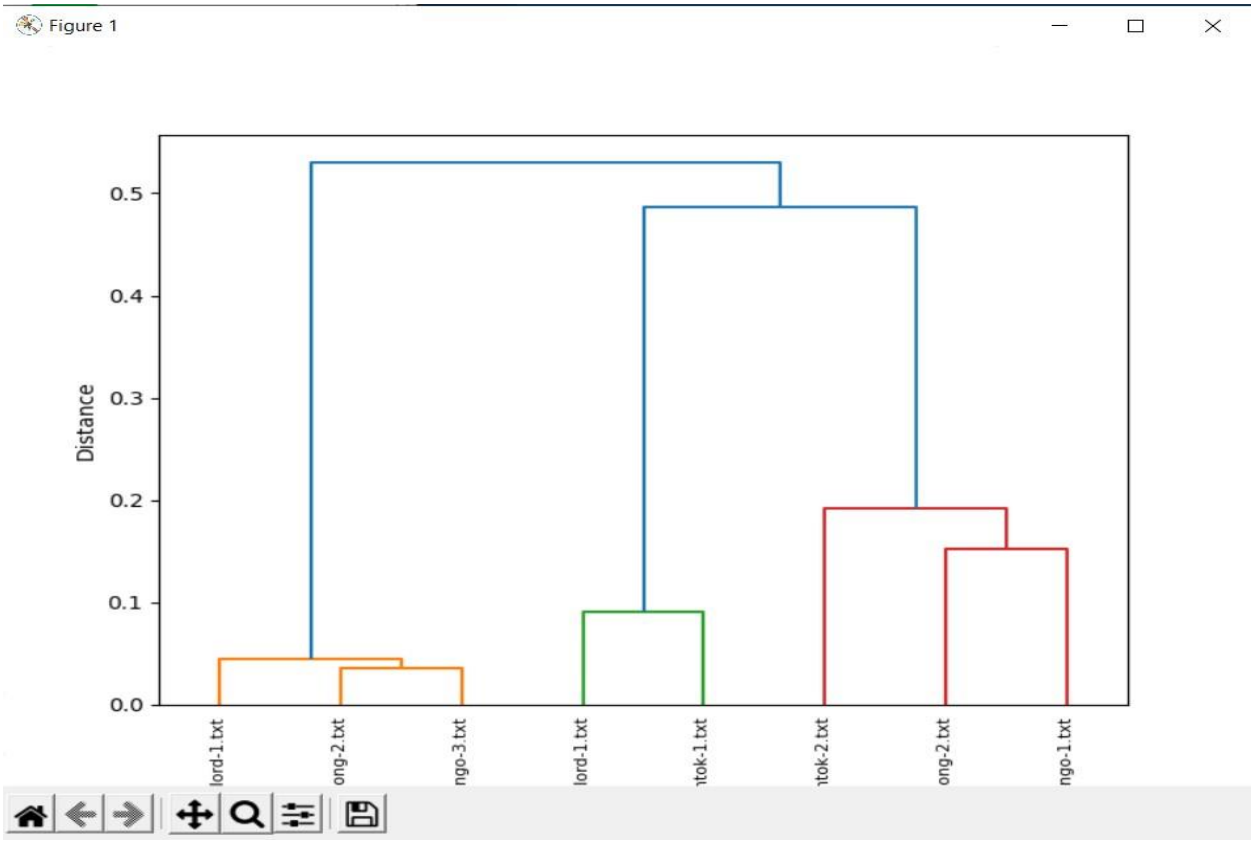
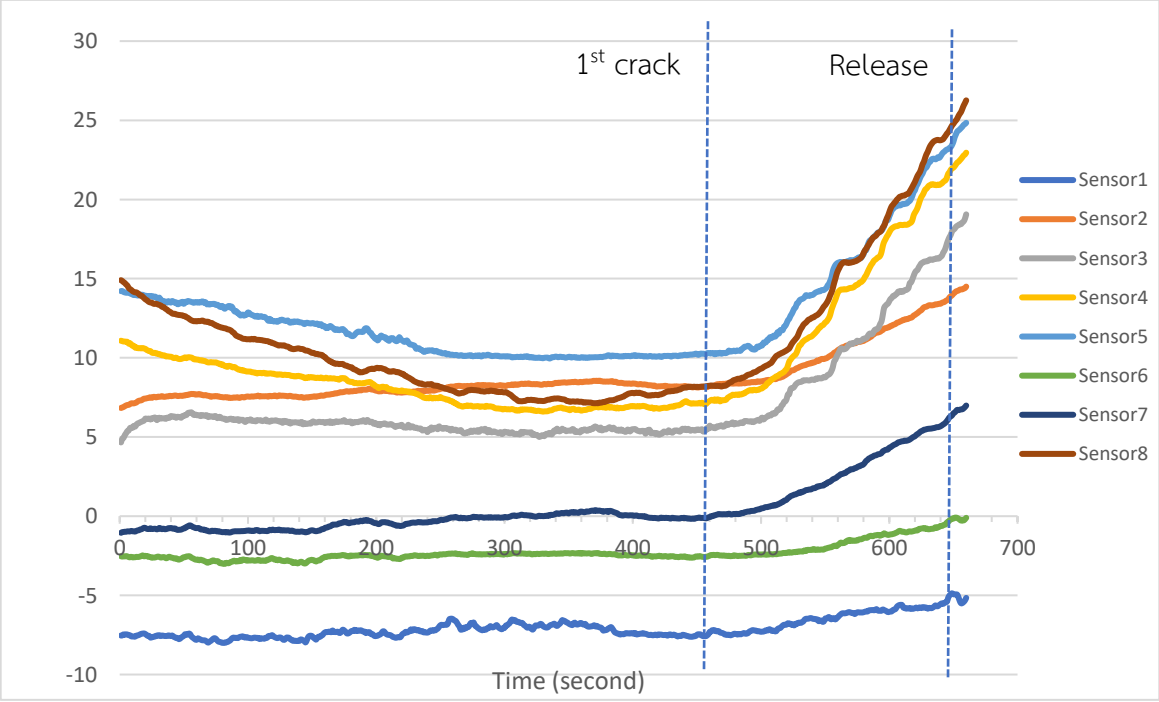


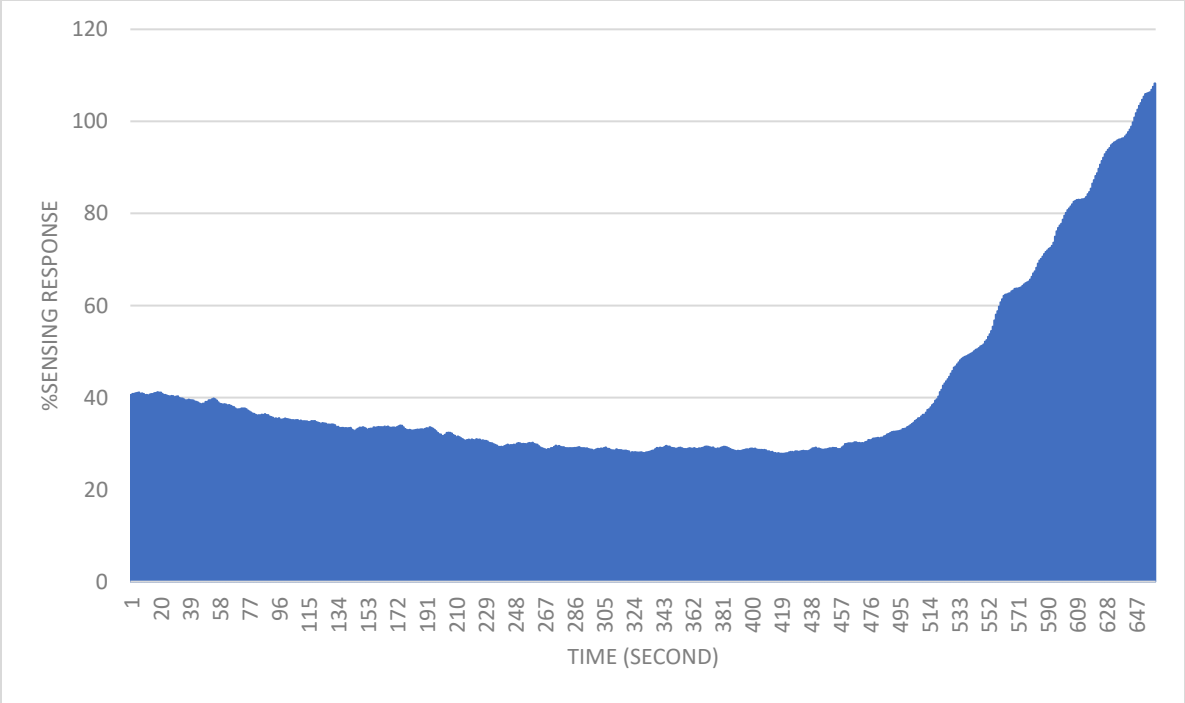
Figure 1
Distance
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
lord-1.txt
ong-2.txt
ngo-3.txt
lord-1.txt
ntok-1.txt
ntok-2.txt
ong-2.txt
ngo-1.txt

4.2.8 ผลการพัฒนาการตรวจวัดกลิ่นกาแฟขณะคั่วด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

จากการพัฒนาปรับปรุงซอฟแวร์เพื่อปรับใช้กับการตรวจวัดกาแฟภายหลังการคั่ว และสามารถนำมาเพิ่มศักยภาพในการตรวจวัดกลิ่นกาแฟภายในเวลาเดียวกับการคั่ว โดยทดลองนำกาแฟโคลัมเบียปริมาณ 600 กรัม คั่วภายใต้สภาวะการคั่วคือ 10 นาที และต่อท่เชื่อมระหว่างเครื่องจมูกอิเล้กทรอนิกส์และห้องคั่วของเครื่องคั่วกาแฟ เพื่อศึกษากลิ่นกาแฟที่เกิดขึ้นขณะคั่วด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ พบว่ามีการตอบสนองของเซนเซอร์รายหัวทั้ง 8 เซนเซอร์ดังภาพ การเปลี่ยนแปลงของลักษณะสัญญาณของเซนเซอร์เริ่มเปลี่ยนไปอย่างชัดเจนในช่วงเวลาประมาณ 7 นาทีเป็นต้นไป ซึ่งสอดคล้องกับการเกิด การแตกครั้งแรกของเมล็ดกาแฟ (first crack) ซึ่งจะเป็นเสียงคล้ายการแตกของวัตถุดังขึ้นเมื่อคั่วกาแฟถึงอุณหภูมิช่วง 160-170 องศาเซลเซียส ภายหลังการเกิดการแตกของเมล็ดกาแฟ พบว่า ระดับความเข้มข้นของกลิ่นเมล็ดกาแฟภายในห้องคั่วกาแฟเปลี่ยนแปลงเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ไปจนถึงระยะเวลา 10 นาที ที่แสดงถึงการคั่วเมล้ดกาแฟโคลัมเบียสำเร็จ

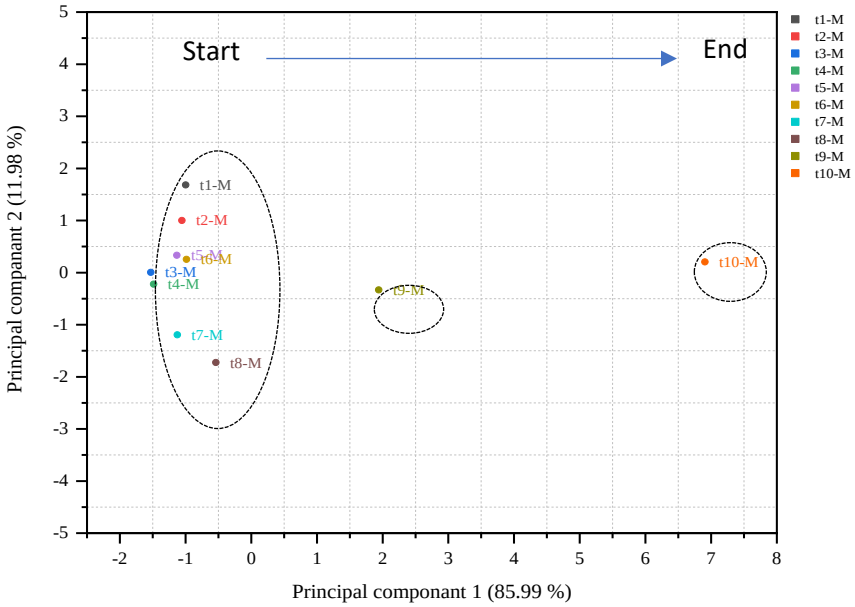


ภาพที่ 175 แสดงอัตราการตอบสนองของเซนเซอร์รายหัวทั้ง 8 เซนเซอร์

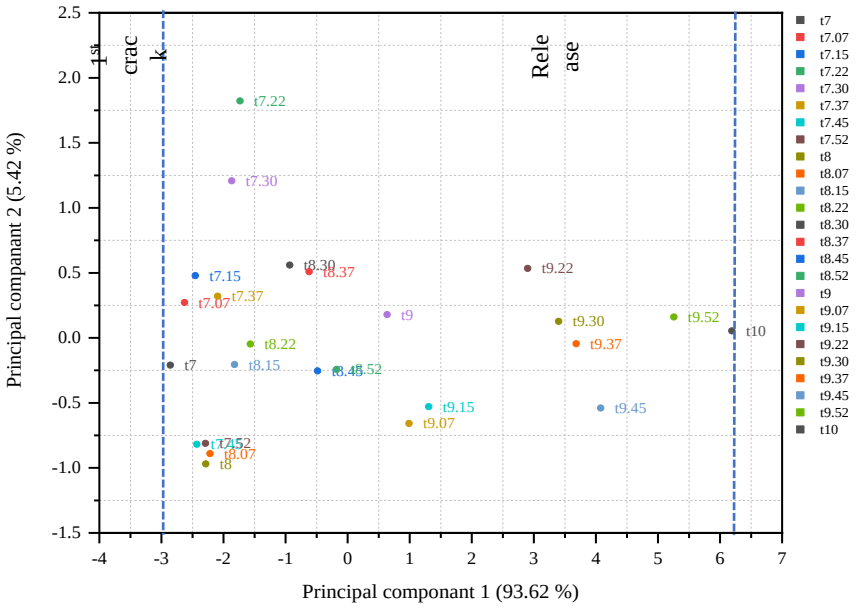


ภาพที่ 176 แสดงระดับความเข้มข้นรวมของเมล็ดกาแฟโคลัมเบียตั้งแต่เริ่มต้นและสิ้นสุดการคั่ว

เมื่อพิจารณาอัตราการตอบสนองเซนเซอร์ทั้ง 8 และผลจากอัตรารวบการตอบสนองของเซนเซอร์ที่แสดงผลในลักษณะความเข้มข้นของกลิ่นชี้ให้เห็นว่า ภายหลังการเกิดการแตกของเมล็ดกาแฟเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเมล็ดกาแฟนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในเมล็ดกาแฟเกิดเป็นปฏิกิริยาเคมีต่างๆที่เกิดเมื่อนำเมล็ดกาแฟมาผ่านกระบวนการคั่ว ซึ่งลักษณะข้อมูลกลิ่นที่เกิดขึ้นสามารถถูกตรวจจับได้ด้วยเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์ และจากแผนภาพ PCA พบว่า ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการคั่วกาแฟโคลัมเบียให้ลักษณะข้อมูลกลิ่นคล้ายคลึงกันก่อนจะเกิดกระบวนการแตกของเมล็ดกาแฟ โดยกลิ่นของเมล็ดกาแฟขณะคั่วในช่วงเวลาดังกล่าวมีกลิ่นคล้ายฟางข้าวและสีของเมล็ดเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเหลืองเมื่อเวลาผ่านไป 4 นาที และเมื่อเกิดเสียงแตกของเมล็ดที่ประมาณนาทีที่ 7 เป็นต้นไป แผนภาพข้อมูลกลิ่นแสดงถึงความเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของกลิ่นเมล็ดกาแฟ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบเบื้องต้นนี้สามารถนำมาประยุกต์เป็นแนวทางในการตรวจวิเคราะห์กลิ่นขณะคั่วกาแฟ และเป็นแนวทางใช้ประโยชน์ในการนำเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์มาปรับใช้ภาคอุตสาหกรรมการผลิตกาแฟที่กำลังเพิ่มมากขึ้นในยุคปัจจุบัน โดยมีแนวทางเบื้องต้นในการศึกษาสภาวะการคั่วกาแฟชนิดต่างๆ และเก็บข้อมูลการคั่วเมล็ดกาแฟชนิดต่างๆมาวิเคราะห์เพื่อเก็บเป็นฐานข้อมูลกลิ่นกาแฟต่อไป



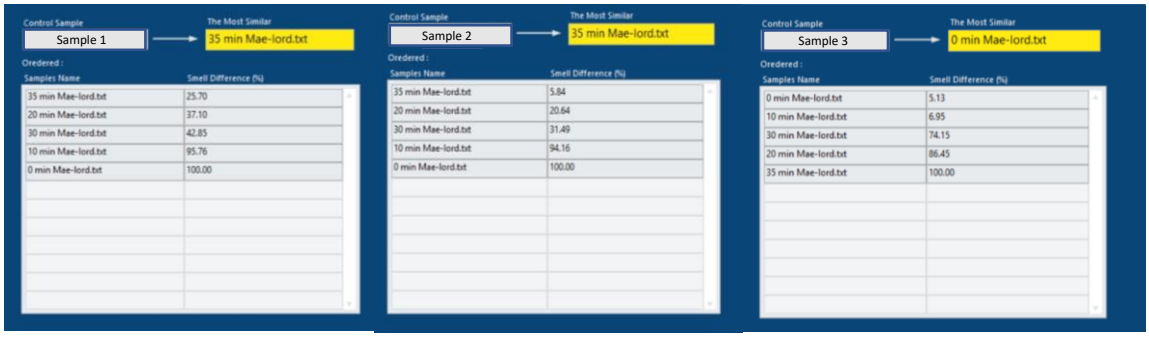
ภาพที่ 177 แสดงข้อมูลแผนภาพกลิ่นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการคั่วกาแฟด้วย PCA



ภาพที่ 178 แสดงข้อมูลแผนภาพกลิ่นตั้งแต่เริ่มต้นการแตกของเมล็ดกาแฟจนถึงสิ้นสุดการคั่วกาแฟด้วย PCA

4.2.9 ผลการพัฒนาซอฟต์แวร์รูปแบบปรับปรุงใหม่

<u>การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโหมดตรวจวิเคราะห์กลิ่น (Odora Analytics)</u>



การวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Smell Comparison เป็นวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบความแตกต่างของกลิ่นโดยระบุเป็นร้อยละความแตกต่าง (%) สอดคล้องกับการแสดงผลใน PCA สามารถนำมาปรับใช้เป็นแนวทางนำไปสู่การทำข้อมูล map ลักษณะกลิ่นกาแฟ เริ่มจากการนำข้อมูลการคั่วกาแฟที่ระยะเวลาคั่วแตกต่าง

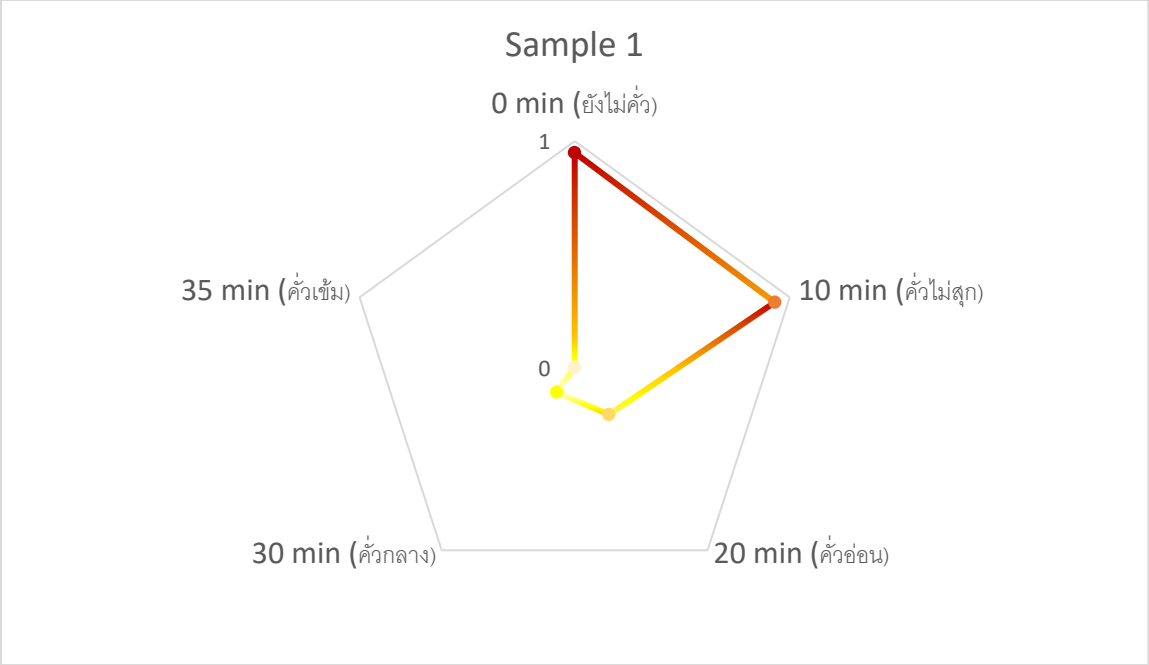
กัน สามารถบ่งบอกถึงระดับการคั่วกาแฟ (คั่วอ่อน กลาง และเข้ม) มาเก็บบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

จากนั้นนำข้อมูลการคั่วกาแฟชนิดเดียวกันแต่เจาะจงไม่ระบุระยะเวลาการคั่วเพื่อนำมาเป็นข้อมูลเปรียบเทียบลักษณะกลิ่นกับเมล็ดกาแฟที่ผ่านการคั่วที่ระยะเวลาแตกต่างกัน พบว่าโปรแกรม smell comparison สามารถให้ข้อมูลความเหมือน (คำนวณจากร้อยละความแตกต่าง) ข้อมูลกลิ่นที่บันทึกด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์นำมาสร้างแผนภาพระดับการคั่วกลิ่น ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 36

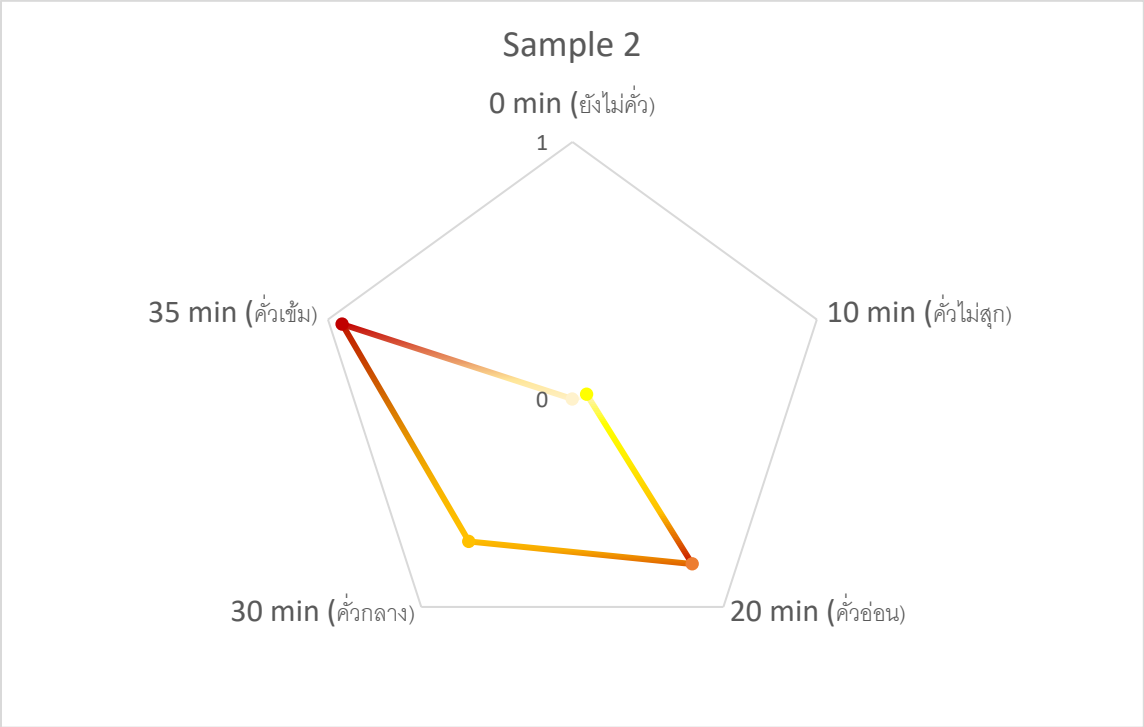
แผนภาพ (map) ข้อมูลกลิ่นสามารถบอกระดับความเหมือนของกลิ่นของกาแฟตัวอย่าง ว่ากลิ่นของเมล็ดกาแฟนั้นคล้ายกับกลิ่นของการคั่วที่ระดับใด โดยไล่จากระดับความเข้มของสี จากแผนภาพที่ 177 แสดงข้อมูลระดับกลิ่นของกาแฟตัวอย่างที่ 1 (sample 1) ให้ลักษณะกลิ่นใกล้เคียงกับกลิ่นกาแฟยังไม่คั่วมากที่สุดจะมีสัญลักษณ์เส้นสีแดงเข้ม และแสดงถึงความเหมือนกับกลิ่นคั่วกาแฟที่ระดับอื่นๆ ลดลงไปจะแสดงสีส้ม สีเหลืองอ่อนตามลำดับ ดังนั้นตัวอย่างกาแฟที่ 1 เป็นกาแฟที่ยังไม่ผ่านการคั่วที่สมบูรณ์หรืออยู่ในระดับการคั่วที่ยังพัฒนาไปไม่ถึงการเป็นกาแฟคั่วอ่อนพิจารณาจากแผนภาพข้อมูลกลิ่นที่วิเคราะห์จาก smell comparison ขณะที่ตัวอย่างกาแฟที่ 2 และ 3 ให้ผลลัพธ์ว่าระดับการคั่วของกลิ่นกาแฟตัวอย่างสอดคล้องที่กาแฟคั่วเข้ม (35 min) มากที่สุด แสดงถึงการพัฒนาการคั่วของตัวอย่างกาแฟที่ 2 และ 3 พัฒนาไปถึงการคั่วที่พอเหมาะในการนำเมล็ดกาแฟไปบดและชงเป็นเครื่องดื่มต่อไป สามารถสรุปได้ว่าการพัฒนาโปรแกรมการวิเคราะห์เพื่อต่อยอดการปรับใช้เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์กับกาแฟ สามารถเป็นแนวทางการสร้างมาตรฐานตัวชี้วัดระดับการคั่วต่อไปได้

ตารางที่ 38 แสดงการเปรียบเทียบกลิ่นกาแฟตัวอย่างกับกลิ่นกาแฟที่ผ่านการคั่วที่ระยะเวลาแตกต่างกัน

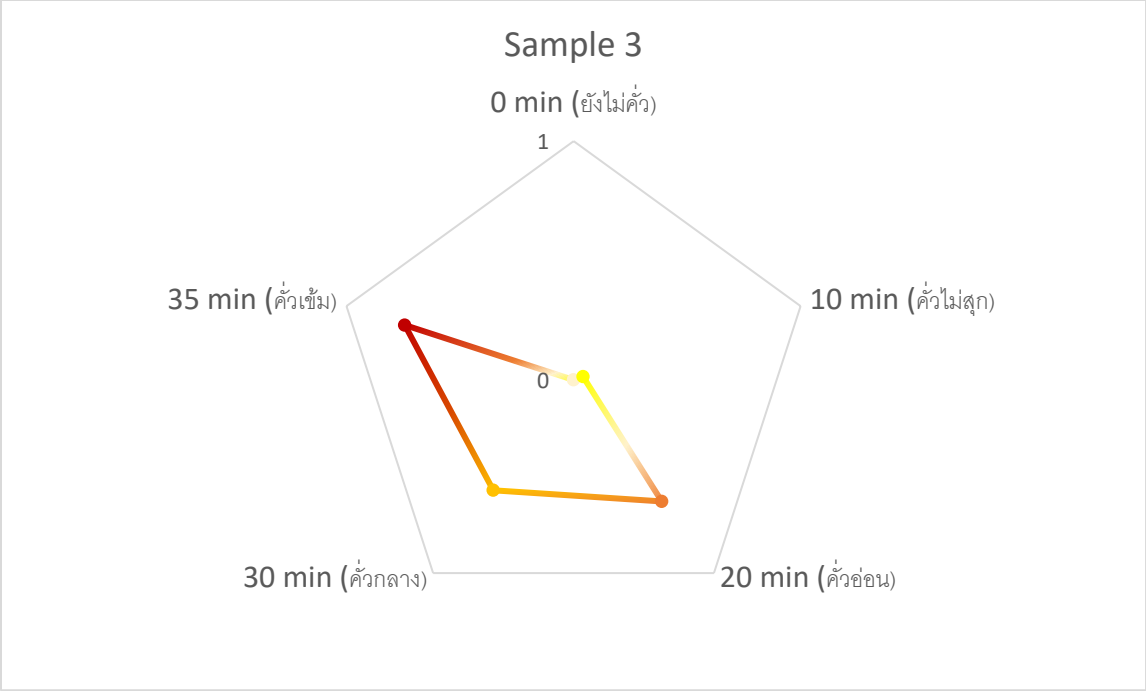
ระยะเวลาการคั่ว	**ระดับการคั่วเมล็ดกาแฟ**	Sample 1	Sample 2	Sample 3
		ความเหมือน (%)	**ความเหมือน (%)**	**ความเหมือน (%)**
0 min	ยังไม่(ผ่านการ)คั่ว	0	0	95
10 min	คั่วไม่สุก	4	6	93
20 min	คั่วอ่อน	63	79	26
30 min	คั่วกลาง	57	69	14
35 min	คั่วเข้ม	74	94	0



ภาพที่ 179 แสดงแผนภาพข้อมูลระดับกลิ่นของกาแฟตัวอย่างที่ 1 (sample 1)



ภาพที่ 180 แสดงแผนภาพข้อมูลระดับกลิ่นของกาแฟตัวอย่างที่ 2 (sample 2)



ภาพที่ 181 แสดงแผนภาพข้อมูลระดับกลิ่นของกาแฟตัวอย่างที่ 3 (sample 3)

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

จากผลการดำเนินการการสร้างและพัฒนาเทคโนโลยีไอโอที เซนเซอร์และดิจิทัลแบบต่างๆเพื่อการเพาะปลูกกาแฟและประยุกต์ใช้ในงานตรวจวัดคุณภาพจากกาแฟ สามารถบ่งชี้ข้อสรุปได้ดังนี้

1. สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซนเซอร์ พัฒนาเป็นสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอทีติดตั้งบนพื้นดินตามตำแหน่งต่างๆ ในไร่กาแฟ ได้แก่ สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด (Mae-lord) สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน บ้านพ่อหลวง ธีรเมศร์ (Mae-kampong) สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน โครงการหลวงตีนตก (Teentok) และสถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง โครงการหลวงม่อนเงาะ (Monngo) ณ จังหวัดเชียงใหม่ได้สำเร็จ

2. การดำเนินการติดตั้งสถานีทั้ง 4 สถานี เพื่อเก็บข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสภาพอากาศ เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นพื้นที่เพาะปลูกย่อย พันธุ์ที่ใช้เพาะปลูก วิธีการดูแลที่แตกต่าง จะให้ผลผลิตที่แตกต่างกันส่งผลต่อสภาพอากาศที่เหมาะสำหรับการปลูกกาแฟในธรรมชาติอันได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิของดิน ความชื้นในดิน ปริมาณฝนสะสม ข้อมูลทิศทางกระแสลมและความเร็วลม ปริมาณพลังงานที่พืชได้รับในแต่ละพื้นที่ จากการหาความสัมพันธ์ของปัจจัยแต่ละชนิดจากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยการหาค่า Pearson Correlation โดยความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของพื้นที่ปลูกกาแฟมาก ปริมาณแสงที่กาแฟได้รับและปริมาณความชื้นในดินยิ่งมีค่ามากตามไปด้วย แต่ทว่าเมื่อความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของพื้นที่ปลูกกาแฟมาก อุณหภูมิในอากาศ และอุณหภูมิในดินมีแนวโน้มที่จะลดลง สำหรับปริมาณฝนและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมีความสัมพันธ์น้อยเมื่อเทียบกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของพื้นที่ปลูกกาแฟตามจุดต่างๆ จากผลการวิเคราะห์บ่งชี้ว่าปัจจัยสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันมีผลต่อคุณภาพของกาแฟ และรสชาติของกาแฟ โดยสถานีเทคโนโลยีไอโอทีสามารถตรวจวัดและประเมินสภาพอากาศและช่วยวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อยกระดับอุตสาหกรรมในการปลูกกาแฟปลูกกาแฟแบบเกษตรแม่นยำ (Pre-harvest) ได้สำเร็จ

3. ดำเนินการพัฒนาเทคโนโลยีเซนเซอร์และดิจิทัลได้แก่ เซนเซอร์ดมกลิ่นกาแฟ (Aroma Sensors) การทำข้อมูลกลิ่นกาแฟ (Digitization of Coffee Aroma) โดยพัฒนาเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถในมาประยุกต์ในดมกลิ่นกาแฟภายหลังการคั่ว โดยศึกษาข้อมูลและสภาวะการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการใช้ดมกลิ่นของกาแฟที่ยังไม่ผ่านการคั่ว (green bean coffee) และกาแฟที่ผ่านการคั่วแล้ว (roasted bean coffee) ทั้งใน

รูปแบบเมล็ดและแบบผง ต่อเนื่องจนถึงดมกลิ่นเครื่องดื่มกาแฟ (brew coffee) รวมถึงความแตกต่างของแหล่งที่มา หรือความแตกต่างระหว่างของกลิ่นกาแฟคนละสายพันธ์ กาแฟที่มาจากแหล่งเพาะปลูกต่างประเทศ จมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถในมาประยุกต์ใช้แยกแยะระดับความแตกต่างของกาแฟแต่ละรูปแบบได้จริง

4. จากการศึกษาคุณภาพกลิ่นกาแฟแต่ละชนิดบ่งชี้ว่ามีความแตกต่างกันตั้งแต่ที่มาของแหล่งเพาะปลูกและเก็บเกี่ยว อีกทั้งกระบวนการที่สำคัญส่งผลต่อคุณภาพกาแฟมากที่สุดคือกระบวนการคั่วกาแฟ เพราะผลจากการวิเคราะห์คุณภาพกลิ่นกาแฟชี้ให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกลิ่นกาแฟกับแหล่งที่มาของกาแฟว่าเบื้องต้นลักษณะของกลิ่นกาแฟที่มาจากแหล่งเพาะปลูกที่มีความสูงใกล้กันอย่างกาแฟจากบ้านแม่กำปอง (1,100 เมตร) กับโครงการหลวง (1,240 เมตร) มีลักษณะกลิ่นคล้ายกัน ในขณะที่กาแฟจากโครงการหลวงตีนตก (770 เมตร) และโครงการหลวงแม่หลอด (680 เมตร) ที่มีความสูงในพื้นที่การเพาะปลูกใกล้เคียงกันแสดงลักษณะกลิ่นใกล้เคียงกัน ดังแสดงผลในแผนภาพข้อมูลกลิ่นกาแฟจากการวิเคราะห์ด้วยจมูกอิเล็กทรอนิกส์ และสามารถยกระดับการวิเคราะห์โดยพัฒนาปรับปรุงซอฟแวร์และฮาร์ดแวร์อย่างจมูกอิเล็กทรอนิกส์วิเคราะห์กลิ่นกาแฟขณะเกิดการคั่วเพื่อเป็นแนวทางการวิเคราะห์คุณภาพกาแฟพร้อมไปกับกระบวนการคั่ว เพื่อในอนาคตส่งมอบเทคโนโลยี Pre-harvest และ Post-harvest แบบพร้อมใช้งาน ไปช่วยเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟ และ ผู้ประกอบการผู้ผลิตกาแฟต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. T. Pobkrut, and T. Kerdcharoen, “Soil sensing survey robots based on electronic nose,” in Control, Automation and Systems, Seoul, 2014, pp. 1604-1609.

2. N. Watthanawisuth, A. Tuantranont, T. Kerdcharoen, “Microclimate real-time monitoring based on ZigBee sensor network,” in IEEE Sensors, 2009, pp. 1814-1818

3. M. A. Fourati, W. Chebbi, and A. Kamoun, “Development of a web-based weather station for irrigation sheduling,” in Proceedings of the 3rd IEEE Colloquium in Information Science and Technology (CIST 2014), pp. 37-42, October 2014.

4. N. Tongrod, A. Tuantranont, and T. Kerdcharoen, “Adoption of precision agriculture in vineyard,” in Proceedings of the 6 th Annual IEEE International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and formation Technology (IEEE ECTI-CON 2009), May 2009.

ภาคผนวก 1

ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายต่อ กสทช. และหน่วยงานภาครัฐและเอกชน

ภาคผนวก 1 - ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายต่อ กสทช. และหน่วยงานภาครัฐและเอกชน

ผลสำเร็จของโครงการนี้ได้นำเทคโนโลยีดิจิทัลเข้ามาสู่วงการกาแฟไทย และได้ช่วยยกระดับวงการกาแฟไทยดังต่อไปนี้

(1) Digitalization of crop-field environment เป็นการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ในการเพาะปลูกกาแฟ (pre-harvest) ได้แก่ เซนเซอร์ตรวจวัดสภาพแวดล้อมในไร่นา เช่น เซนเซอร์ตรวจวัดดิน เซนเซอร์ตรวจวัดพืช เซนเซอร์ตรวจวัดสภาพอากาศ เป็นต้น รวมไปถึงเทคโนโลยีไอโอทีและคลาวด์ ทำให้เกษตรกรผู้เพาะปลูกสามารถเข้าถึงข้อมูลการเพาะปลูก และดูแลรักษาไร่ได้อย่างแม่นยำขึ้น

(2) Digitalization of smell เป็นการนำเทคโนโลยีดิจิทัลมาประยุกต์ใช้ในการแปรรูปกาแฟ (post-harvest) ได้แก่ เซนเซอร์ดมกลิ่น จมูกอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะช่วยในการควบคุมคุณภาพการคั่ว ความเข้าใจในอัตลักษณ์ของกาแฟแต่ละท้องถิ่น รวมไปถึงการวิจัยและพัฒนากลิ่นของกาแฟ ซึ่งจะช่วยเพิ่มมูลค่าของกาแฟได้

โดยจากผลการศึกษาของโครงการนี้ คณะวิจัยมีข้อเสนอแนะต่อ กสทช. และหน่วยงานภาครัฐและเอกชน ดังต่อไปนี้

(1) ภาวะโลกร้อนที่รุนแรงมากขึ้นเรื่อยๆ ได้เริ่มทำให้สภาพความเหมาะสมในการเพาะปลูกกาแฟเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งก็จะทำให้พื้นที่บางแห่งมีความเหมาะสมในการปลูกกาแฟน้อยลงไปเรื่อยๆ คุณภาพของกาแฟก็จะค่อยๆ ต่ำลงไป ในขณะที่บางพื้นที่ก็อาจจะมีความเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งทำให้เราต้องมีการเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก กลิ่นและรสชาติของกาแฟในระยะยาว เพื่อนำมาช่วยในการกำหนดทิศทางนโยบายการส่งเสริมการปลูกกาแฟในอนาคต โดยเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในโครงการนี้ สามารถนำมาใช้เก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมของพื้นที่เพาะปลูกที่แตกต่างกันในภาคเหนือ กลิ่นและรสชาติของกาแฟ รวมไปถึงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างและจำเพาะของพื้นที่ ที่มีผลต่ออัตลักษณ์กาแฟ

(2) ปัจจุบัน ประเทศไทยมีความต้องการบริโภคกาแฟมากกว่า 9 หมื่นตันต่อปี แต่สามารถผลิตได้เองเพียง 2-3 หมื่นตันเท่านั้น ที่เหลือต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ทั้งนี้ประเทศเพื่อนบ้านของไทยคือเวียดนามสามารถส่งออกเมล็ดกาแฟได้ปีละกว่า 1.6 ล้านตัน มากเป็นอันดับ 2 ของโลก หากแต่กาแฟส่วนใหญ่ที่เวียดนามปลูก 97% เป็นกาแฟโรบัสต้า จึงทำให้ประเทศไทยไม่ได้เสียเปรียบเวียดนามมากนักในเรื่องของกาแฟเกรดพรีเมียม เนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพในการปลูกกาแฟเกรดพรีเมียม โดยเฉพาะพันธุ์อราบิก้า ซึ่งมีพื้นที่เพาะปลูกในภาคเหนือ โดย จ.เชียงใหม่ มีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 20,000 ไร่ และ จ.เชียงรายมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 33,000 ไร่ ถึงแม้จะมีผลผลิตเพียงระดับ 8 พันตันต่อปี แต่มูลค่ากาแฟค่อนข้างสูงโดยเฉพาะตลาดส่งออกไปยังสหภาพยุโรปที่ค่อนข้างนิยมกาแฟอราบิก้าของภาคเหนือ โอกาสของอุตสาหกรรมกาแฟไทยจึงอยู่ที่ การพยายามรักษาคุณภาพของกาแฟ และ เพิ่มปริมาณผลผลิตในพื้นที่ให้ได้

(3) ถึงแม้ประเทศไทยจะผลิตกาแฟได้น้อยกว่านำเข้า หากแต่การนำเข้ากาแฟของไทยได้ถูกเพิ่มมูลค่าด้วยการแปรรูปและการสร้างแบรนด์เพื่อนำมาใช้บริโภคในประเทศแถมยังส่งออกไปยังต่างประเทศอีกด้วย ด้วยความหอมของกาแฟอราบิก้าภาคเหนือที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัว จึงถูกนำมาผสมกับกาแฟที่ผลิตจากแหล่งอื่นรวมทั้งกาแฟต่างประเทศ ทั้งนี้ ผู้บริโภคชาวไทยมีแนวโน้มแปรเปลี่ยนจากการบริโภคกาแฟสำเร็จรูป ไปสู่กาแฟพิเศษ หรือ Specialty Coffee มากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งกาแฟชนิดนี้ตอบสนองต่อประสบการณ์การดื่มที่เน้นรสชาติของกาแฟ ได้รับรู้เรื่องราวที่ไปที่มาของแหล่งเพาะปลูก กระบวนการแปรรูปกาแฟ โดยผู้บริโภคกาแฟในกลุ่มนี้มีอัตราการเติบโตปีละ 3-5% โดยการเกิดขึ้นของอุตสาหกรรมกาแฟพิเศษ ทำให้เกิดสินค้าและบริการรวมถึงกิจกรรมใหม่ๆ เกิดขึ้นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นร้านกาแฟเฉพาะทาง อุปกรณ์และเครื่องทำกาแฟ งานประกวดกาแฟพิเศษ งานแสดงสินค้า trade shows ทางด้านกาแฟพิเศษ ดังนั้น หากภาครัฐส่งเสริมการเพาะปลูกกาแฟอราบิก้าภาคเหนือของไทย ไม่เพียงแต่เกษตรกรผู้เพาะปลูกต้นน้ำจะได้ประโยชน์เท่านั้น แต่อุตสาหกรรมแปรรูปที่เป็นกลางน้ำ และอุตสาหกรรมร้านกาแฟที่เป็นปลายน้ำจะเกิดมูลค่าอีกมากมาย

(4) เนื่องจากต้นทุนการผลิตกาแฟอราบิก้าของไทยค่อนข้างสูง แต่ด้วยเพราะกาแฟไทยก็มีคุณภาพสูงเช่นเดียวกัน ทำให้ยังมีความสามารถในการแข่งขันได้ โดยยังเป็นที่ต้องการของร้านกาแฟที่เน้นคุณภาพ ดังนั้นจึงควรมีการส่งเสริมตั้งแต่ระดับต้นน้ำ (pre-harvest) ได้แก่การนำเทคโนโลยีสมาร์ทฟาร์มเข้าไปดูแลช่วยเหลือในเรื่องการเพาะปลูก การแสวงหาพื้นที่ใหม่ที่มีความเหมาะสมในการเพาะปลูกเพื่อรองรับ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ในอนาคต ไปจนถึงระดับกลางน้ำ (post-harvest) ที่ควรจะมีการพัฒนาโรงคั่วกาแฟให้ได้มาตรฐาน มีกระบวนการคั่วที่สามารถรักษาคุณภาพ กลิ่นและรสชาติให้มีความเสมอต้นเสมอปลาย โดยผลงานจากโครงการวิจัยนี้สามารถที่จะสเกลอัพโดยการทำให้ต้นทุนของเทคโนโลยีเซนเซอร์ไอโอทีสำหรับตรวจสภาพแวดล้อมในพื้นที่เพาะปลูกให้มีราคาถูกลง ให้เกษตรกรสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง รวมทั้งเทคโนโลยีตรวจวัดกลิ่นแบบดิจิทัล ต้องทำให้มีขนาดเล็กลง มีราคาที่ถูกลง เพื่อให้ผู้ประกอบการโรงคั่วกาแฟสามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวางขึ้น

(5) ข้อดีของการเพาะปลูกกาแฟอราบิก้าก็คือ สามารถปลูกไปพร้อมๆ กับพื้นที่ป่าได้ ซึ่งจะเป็นการช่วยอนุรักษ์ป่า ซึ่งหากภาครัฐส่งเสริมให้เกษตรกรเปลี่ยนจากการปลูกข้าวโพดมาปลูกกาแฟแทน นอกจากจะช่วยเพิ่มผลผลิตกาแฟอราบิก้าที่มีราคาสูงแล้ว ยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ป่าไปในตัวอีกด้วย การปลูกกาแฟในร่มเงาของป่าถึงแม้จะให้ผลผลิตไม่สูงเท่ากับการปลูกแบบกลางแจ้ง แต่ต้นกาแฟจะมีสุขภาพดี อายุยืน ให้ผลผลิตได้ยาวนานและสม่ำเสมอ การปลูกกาแฟผสมกับป่านั้นจะใช้ปุ๋ยน้อยกว่าการปลูกแบบกลางแจ้ง เนื่องจากในป่าธรรมชาติมีอินทรียวัตถุสูงอยู่แล้ว มีใบไม้ทับถมในเนื้อดิน อีกทั้งยังมีความชุ่มชื้นสูง ซึ่งก็จะทำให้คุณภาพเมล็ดกาแฟสูง มีกลิ่นและรสชาติที่ดี เกษตรกรมักจะเรียกการปลูกกาแฟแบบนี้ว่า “ปล่อยให้เทวดาเลี้ยง” เนื่องจากการดูแลรักษาจะน้อยกว่าการปลูกแบบพืชเชิงเดี่ยวกลางแจ้ง

ภาคผนวก 2

รายงานผลการดำเนินงานฉบับย่อสำหรับลงตีพิมพ์ ในวารสารสำนักงาน กสทช.

กสทช.

โครงการ ต้นแบบไร่กาแฟอัจฉริยะด้วยเทคโนโลยี ไอโอที เซนเซอร์ และปัญญาประดิษฐ์ เพื่อยกระดับอุตสาหกรรมไทย

Development of Smart Coffee Farm Using IoT, Sensor and Artificial Intelligence Technology for Upgrading Thai Coffee Industry

สารบัญ

- กรอบแนวคิดงานวิจัย
- ข้อมูลพื้นฐานและหลักการของเซนเซอร์
- ผลการดำเนินงานของเซนเซอร์
- ทฤษฎีและหลักการของเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์
- ผลการดำเนินงานของเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์

พัฒนาอุตสาหกรรมกาแฟ
ไทยตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำ

Pre-Harvest Technology:
ทำให้เกิดไร่กาแฟอัจฉริยะ

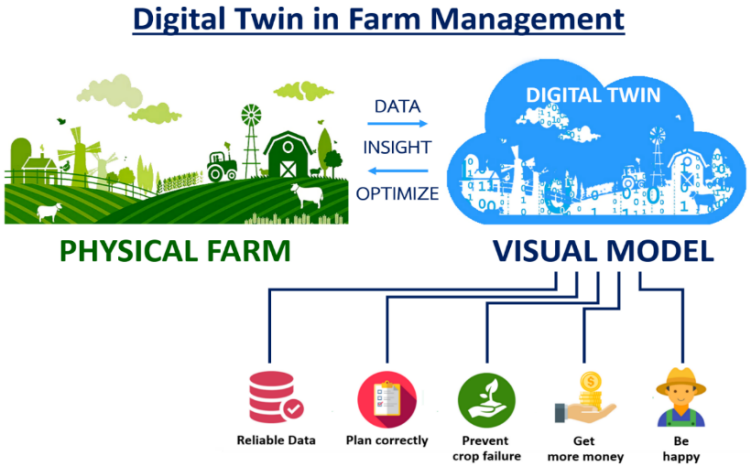
Post-Harvest Technology:
ปรับปรุงคุณภาพกาแฟหลังเก็บเกี่ยวให้ดีขึ้น

สร้างสถานีแบบไอโอที ติดตั้งในไร่กาแฟตรวจวัดพารามิเตอร์เพื่อควบคุมสภาพแวดล้อมในการเพาะปลูก

นำเทคโนโลยีเซนเซอร์ (E-Nose) ตรวจวัดกลิ่นของกาแฟ เพื่อช่วยพัฒนาขั้นตอนกระบวนการผลิต

นำเทคโนโลยีมาช่วยยกระดับการทำงานในกระบวนการผลิตกาแฟให้ได้คุณภาพ

กรอบแนวคิดงานวิจัย

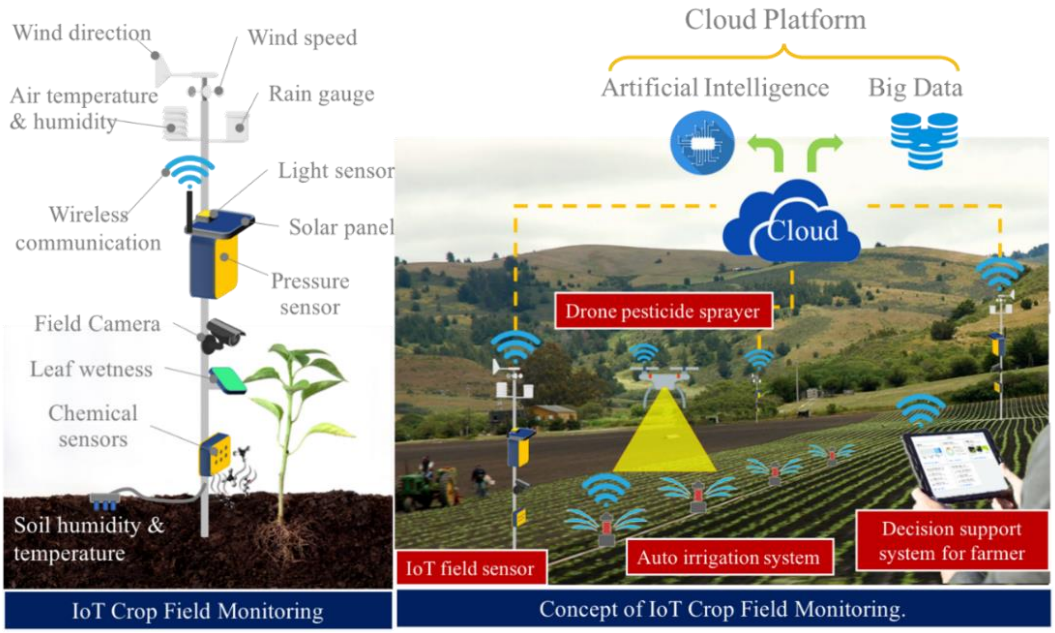


โครงการนี้ นำเทคโนโลยีในระดับไร่นา (Pre-harvest) มาใช้เพื่อช่วยทำให้เกิดไร่กาแฟอัจฉริยะ และนำเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยว (Post-harvest) มาช่วยปรับปรุงคุณภาพของกาแฟให้ดีขึ้น มีความเป็นพรีเมียมมากขึ้น โดยจะนำเทคโนโลยีเซนเซอร์ตรวจวัดกลิ่นของกาแฟ เพื่อมาช่วยพัฒนาขั้นตอนกระบวนการผลิต เช่น การคั่ว การบด หรือการแปรรูป รวมไปถึงการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่มีกลิ่นเฉพาะตัว ของผู้ประกอบการ จากการที่คณะวิจัยมีเทคโนโลยีด้านการเกษตร (AgTech) ที่ค่อนข้างพร้อมใช้ และได้รับการทดสอบ (Field Validation) กับผู้ประกอบการเกษตร-อาหาร มาค่อนข้างหลากหลาย ทำให้เชื่อว่า จะสามารถนำเทคโนโลยีที่มีอยู่นี้มาช่วยเหลือเกษตรกรและผู้ประกอบการในอุตสาหกรรมกาแฟของไทยได้

Pre-Harvest Technology:
เทคโนโลยีนี้จะมาช่วยเกษตรกรและผู้ประกอบการในช่วงการดูแลการเพาะปลูก ซึ่งเกษตรกรและผู้ประกอบการไร่กาแฟต้องการต่อสู้กับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไป การลดต้นทุนด้านปุ๋ย น้ำ และ แรงงาน การต่อสู้กับโรคและแมลง

Post-Harvest Technology:
เทคโนโลยีนี้จะมาช่วยผู้ประกอบการในช่วงหลังการเก็บเกี่ยวกาแฟไปแล้ว ตั้งแต่เรื่องของการคั่วกาแฟ บรรจุภัณฑ์ รสชาติ ความมีเอกลักษณ์ของกาแฟ ซึ่งผู้ประกอบการไทยมีโจทย์เกี่ยวกับการทำอย่างไรจะทำให้กาแฟไทยแตกต่างจากกาแฟอื่น ๆ การไปสู่เกรดพรีเมียมเพื่อหนีการแข่งขันโดยตรงกับกาแฟราคาถูกจากประเทศเพื่อนบ้าน

สถาปัตยกรรมของระบบไร่กาแฟอัจฉริยะ



ภาพแสดงสถานีเซนเซอร์ไอโอทีที่มีการพัฒนาขึ้นเพื่อติดตั้งในไร่กาแฟ

การสร้างสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟมีการออกแบบสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมโดยผู้พัฒนามีจุดประสงค์ที่จะพัฒนาระบบเทคโนโลยีเซนเซอร์ไอโอทีที่สามารถตรวจวัด และแสดงผลข้อมูลให้กับเกษตกรได้ในแบบเรียลไทม์ ผ่านทางเว็บไซต์หรือแอพพลิเคชันบนสมาร์ทโฟน โดยสถานีจะต้องสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ได้เอง ได้โดยไม่ต้องพึ่งพาการใช้ไฟฟ้า มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม และสามารถทำงานได้ในทุกสภาพพื้นที่ สามารถติดตั้งและเคลื่อนย้ายได้สะดวก เกษตรกรสามารถดูแลและบำรุงรักษาได้ง่าย และมีอุปกรณ์สำรองสำหรับเปลี่ยนในกรณีที่มีการเสียหายในระยะยาวได้ โดยในส่วนของสถานีเซนเซอร์ตรวจวัด จะประกอบไปด้วยเซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ สำหรับใช้ในการเก็บข้อมูลสภาพภูมิอากาศดังตารางต่อไปนี้

ตารางแสดงข้อมูลเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งในสถานีเซนเซอร์ตรวจวัดสภาพภูมิอากาศอัจฉริยะ

ลำดับ	เซนเซอร์	ประโยชน์ที่เกษตรกรได้รับ
1	เซนเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์	สภาพความชื้นในอากาศ ทำให้เฝ้าระวังเรื่องโรคได้ การติดตั้งสถานีเซนเซอร์ตามจุดต่างๆ ในไร่นา จะทำให้เห็นความแตกต่างของพื้นที่ เพื่อการเฝ้าระวังพื้นที่เป็นโซนได้
2	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิอากาศ	ความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างกลางวันกับกลางคืน ทำให้ทราบความเครียดของพืช การติดตั้งสถานีเซนเซอร์ในพื้นที่ย่อยๆ ทำให้ทราบว่า พื้นที่แต่ละจุดมีความแตกต่างด้าน microclimate อย่างไร เพื่อตัดสินใจดูแลให้แตกต่างกัน
3	เซนเซอร์วัดปริมาณน้ำฝนและอัตราน้ำฝน	สภาพของน้ำในฟาร์มเกษตร การเปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนที่ได้รับในแต่ละปี นำมาสู่การวางแผนจัดการน้ำ นอกจากนี้ ข้อมูลทำนายว่าฝนจะตกหรือไม่ในกี่ชั่วโมงข้างหน้า จะช่วยทำให้สามารถประหยัดน้ำได้ ไม่ต้องรดน้ำ หากทราบว่าจะมีฝนตก รวมถึงการจัดการกิจกรรมต่างๆ ที่ไม่ควรทำ
4	เซนเซอร์วัดความเร็วและทิศทางลม	ในการเพาะปลูกพืชหลายชนิด ข้อมูลนี้มีความสำคัญมาก เช่น การจัดการความชื้นในไร่องุ่น การวางผังการเพาะปลูกตามทิศทางของลม การทำนายการแพร่ระบาดของแมลง
5	เซนเซอร์วัดพลังงานแสงตกกระทบในไร่	พลังงานที่ตกกระทบต้นพืช สามารถนำมาทำนายผลผลิตได้ เช่น การสุกขององุ่น การสุกของข้าวที่ไวต่อแสง เป็นต้น รวมไปถึงการทำนายอัตราการคายน้ำ และการบริหารจัดการการใช้น้ำในฟาร์ม
6	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิในดิน	มีประโยชน์ในการวิเคราะห์อัตราการระเหยของน้ำจากพื้นดินและความเครียดของรากพืช
7	เซนเซอร์วัดความชื้นในดิน	เพื่อบริหารจัดการในการให้น้ำ ควรจะรดน้ำหรือยัง หรือควรจะรอไปก่อนหากมีการทำนายว่าฝนจะตกในไม่ช้า ซึ่งเกษตรกรได้รับประโยชน์จากเซนเซอร์ส่วนนี้ค่อนข้างมากในการประหยัดน้ำและไฟ (ค่าสูบน้ำ)
8	เซนเซอร์ตรวจความกดอากาศ	มีประโยชน์ต่อเกษตรกรในการใช้ทำนายสภาพอากาศท้องถิ่นในเรื่องของโอกาสที่ฝนจะตก หรือ เกิดพายุฝนฟ้าคะนอง

ผลการดำเนินงานของเซนเซอร์

ผลการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูกจริง

สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด

พิกัด 19.101663, 98.770938

สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน บ้านพ่อหลวง ธีรเมศร์

พิกัด 18.866133, 99.355172

สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน โครงการหลวงตีนตก

พิกัด 18.867171, 99.322342

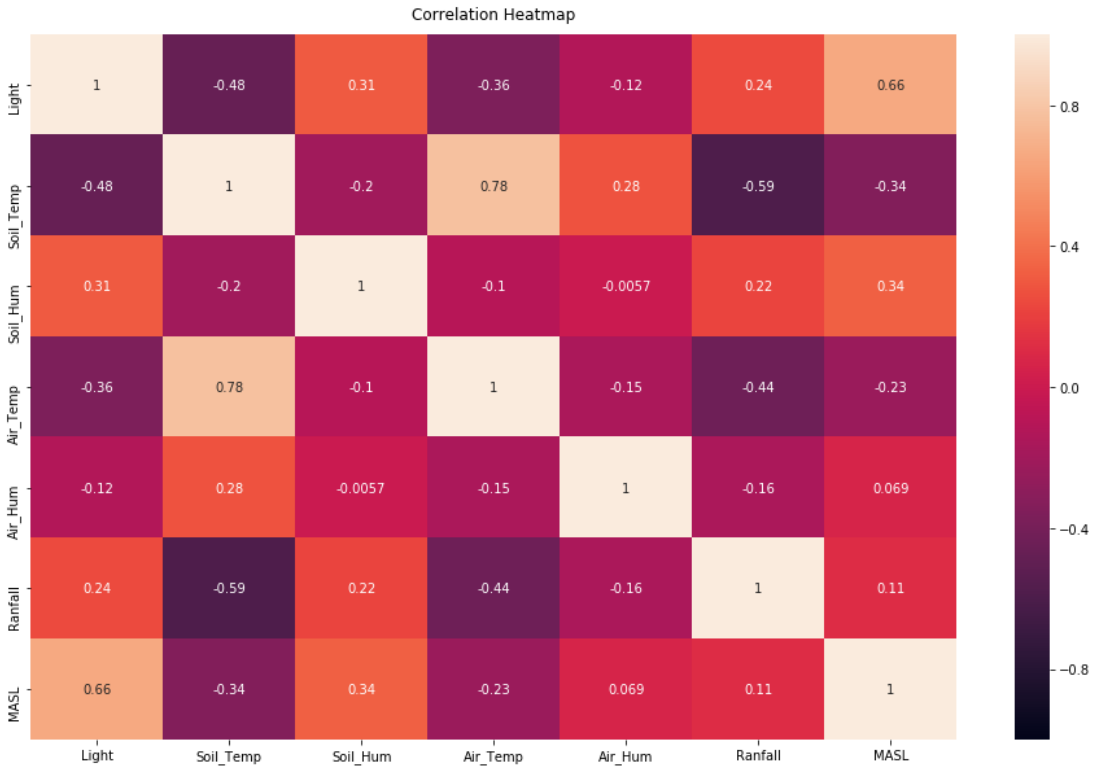
สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง โครงการหลวงม่อนเงาะ

พิกัด 19.170970, 98.777720

ผลการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูลปัจจัยเพาะปลูกและสภาพแวดล้อมในแปลงปลูก

ค่า Pearson Correlation เป็นวิธีทางสถิติที่นิยมนำมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูลมากที่สุดวิธีหนึ่ง เนื่องจากเป็นวิธีที่เข้าใจง่ายและสามารถคำนวนได้ไม่ยาก โดยค่า Pearson Correlation จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 ซึ่งหากมีค่าใกล้ -1.0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในเชิงตรงกันข้าม หากมีค่าใกล้ +1.0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันอย่างมากในทิศทางเดียวกัน และหากมีค่าเป็น 0 นั้นหมายความว่า ตัวแปรทั้งสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยการหาค่า Pearson Correlation พบว่าข้อมูลสภาพแวดล้อมของพื้นที่ต่างๆ มีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปต่อไปนี้นี้



ภาพแสดง Correlation Heatmap ของตัวแปรสภาพแวดล้อมต่างๆ

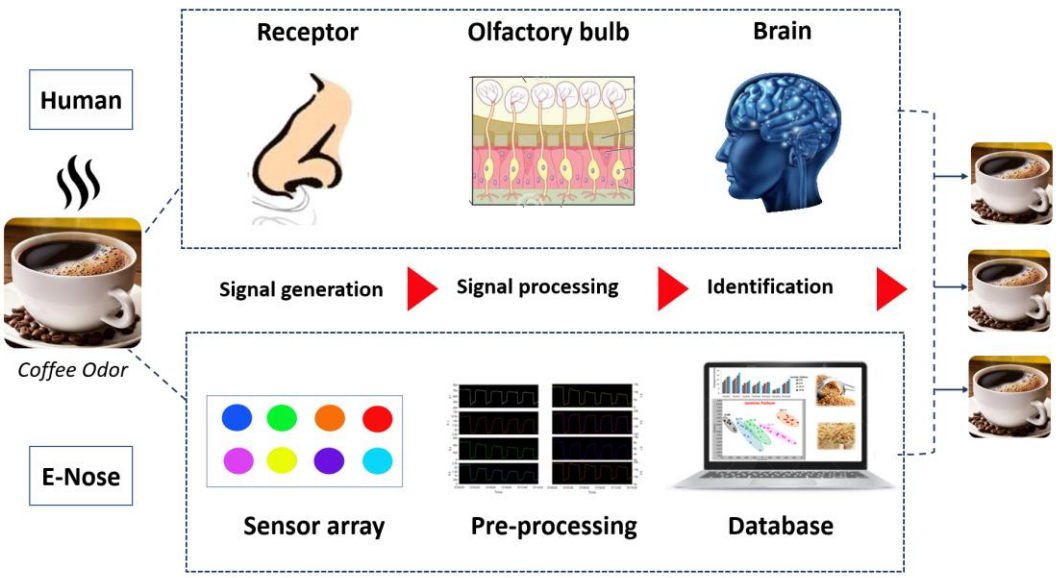
จากรูปแผนภูมิความร้อนแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรสภาพแวดล้อมต่างๆเทียบกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล สามารถสรุปได้ดังนี้

- ปริมาณแสง ปริมาณความชื้นในดิน ที่ต้นกาแฟได้รับมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล กล่าวคือ ยิ่งความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของพื้นที่ปลูกกาแฟมาก ปริมาณแสงที่กาแฟได้รับ และปริมาณความชื้นในดินยิ่งมีค่ามากตามไปด้วย

- อุณหภูมิในอากาศ และอุณหภูมิในดิน มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล กล่าวคือ ยิ่งความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของพื้นที่ปลูกกาแฟมาก อุณหภูมิในอากาศ และอุณหภูมิในดินมีแนวโน้มที่จะลดลง
- ปริมาณฝน และ ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ มีความสัมพันธ์น้อยเมื่อเทียบกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของพื้นที่ปลูกกาแฟตามจุดต่างๆ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรสภาพแวดล้อมต่างๆเทียบกับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลทำให้พบว่า ปัจจัยสภาพแวดล้อมที่อาจจะมีผลต่อคุณภาพของกาแฟที่ระดับความสูงเหนือน้ำทะเลแตกต่างกันอาจจะมาจาก ปริมาณแสง ปริมาณความชื้นในดิน อุณหภูมิของอากาศ และอุณหภูมิในดิน ซึ่งสามารถนำไปศึกษาต่อเพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆเหล่านี้เทียบกับคุณภาพ และรสชาติของกาแฟต่อไป

ทฤษฎีและหลักการของเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์



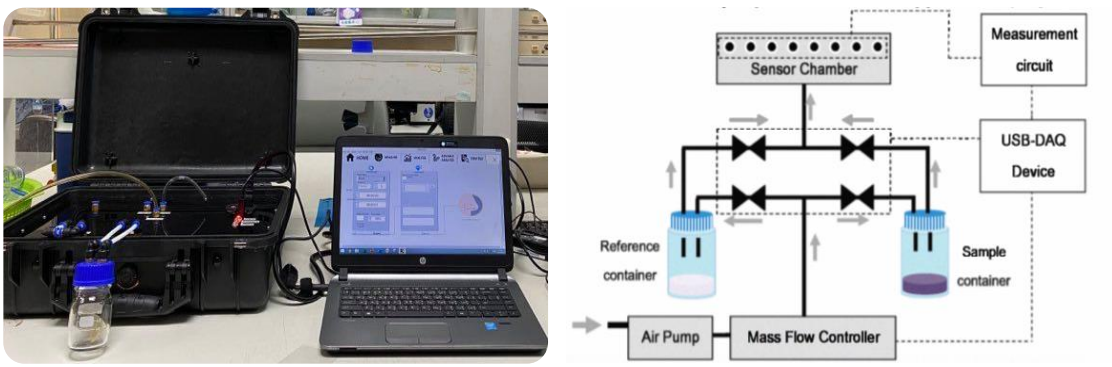
ภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ เทียบกับกลไกการรับกลิ่นของมนุษย์

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดกลิ่นที่เลียนแบบการดมกลิ่นของจมูกมนุษย์โดยจะเปลี่ยนข้อมูลกลิ่นให้เป็นข้อมูลดิจิทัล (Digitization of Smell) ทำให้เราสามารถวิเคราะห์ ประเมินคุณลักษณะของกลิ่น รวมถึงจำแนกแยกแยะกลิ่นได้ จมูกอิเล็กทรอนิกส์อาศัยหลักการทำงานของเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซหรือโมเลกุลกลิ่นหลายเซนเซอร์ร่วมกันในรูปแบบของอะเรย์ (Sensor Array) โดยการประมวลผลสัญญาณ จดจำรูปแบบ วิเคราะห์และจำแนกกลิ่นด้วยหลักการของปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) โดยเซนเซอร์อะเรย์ เปรียบเสมือน

Olfactory Receptors ของจมูกมนุษย์ในการจับกับโมเลกุลกลิ่น เซนเซอร์จะมีความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไปเมื่อทำอันตรกริยากับไอระเหยโมเลกุลกลิ่น โดยเซนเซอร์แต่ละตัวจะมีความไวต่อสารเคมีระเหยแต่ละชนิดแตกต่างกัน สัญญาณจากเซนเซอร์จะถูกนำมารวบรวมและแปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นดิจิทัล จากนั้นจะส่งสัญญาณดิจิทัลผ่านยังหน่วยประมวลผลเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ และใช้หลักการทางสถิติ หรือหลักการฟิสิกส์ ซึ่งได้แก่ วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principle Component Analysis :PCA) เพื่อใช้ในการจดจำรูปแบบของกลิ่นและจำแนกกลิ่น รวมถึงการวิเคราะห์ระดับความเข้มของกลิ่น

จมูกอิเล็กทรอนิกส์มีลักษณะที่เลียนแบบระบบรับรู้กลิ่นของมนุษย์ดังนี้

1. **ส่วนรับกลิ่น** ประกอบไปด้วยเซนเซอร์รับกลิ่นจำนวนมาก ตั้งแต่ 4 ตัวไปจนถึงนับพันตัว และระบบนำกลิ่นเข้ามา (มอเตอร์ดูดอากาศ ท่อรวบรวมกลิ่น)
2. **ส่วนรวบรวมสัญญาณ** ซึ่งจะทำการแปรสัญญาณจากเซนเซอร์ (Transducing) และจัดการสัญญาณ (Signal Conditioning) เช่น ลดสัญญาณรบกวน จากนั้นจะแปลงสัญญาณจากอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D Converter)
3. **ส่วนประมวลผล** ซึ่งจะนำสัญญาณที่ได้รับมาเปรียบเทียบเชิงสถิติกับฐานข้อมูลที่มีอยู่เดิม และอาจจะใช้วิธีการระบบประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) เพื่อทำการแยกแยะกลิ่น รวมไปถึงการเรียนรู้และจดจำรูปแบบของกลิ่น



ภาพแสดงองค์ประกอบของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Nose)

เมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานของจมูกมนุษย์ เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานได้เที่ยงตรงโดยไม่แปรผันไปตามอารมณ์และสภาพแวดล้อมเหมือนกันมนุษย์ เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถแสดงผลในรูปแบบของแผนที่กลิ่น (Aromagram) ที่สามารถเข้าใจได้ง่าย หรือแสดงผลในรูปของกราฟที่บอกความเข้มข้นของกลิ่นชนิดต่างๆ ที่เป็นเป้าหมายในการตรวจวัด ทำให้ผู้ใช้งานและผู้เกี่ยวข้องยอมรับผลการตรวจวัดแบบฉันทามติ ทั้งนี้จมูกอิเล็กทรอนิกส์มีความไวในการตรวจวัด (1-5 นาที) อีกทั้งอุปกรณ์สามารถพัฒนาขึ้นมาในรูปแบบที่พกพาหรือเคลื่อนย้ายได้ ทำให้เหมาะกับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมอาหารและเครื่องดื่ม ด้านการเกษตร และสิ่งแวดล้อม ฯลฯ

ผลการทดสอบคุณภาพกลิ่นกาแฟด้วยเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์

1. เริ่มต้นศึกษาเปรียบเทียบกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบด แบบผง และแบบชง จากแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน

2. ลักษณะของเมล็ดกาแฟที่แตกต่างกันจะให้ลักษณะกลิ่นที่แตกต่างเช่นกัน ทั้งสภาวะในการคั่วแตกต่างกัน ทั้งรูปแบบเมล็ด ผง หรือเมื่อชงเป็นเครื่องดื่มเนื่องมาจากองค์ประกอบในเมล็ดกาแฟที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างกระบวนการคั่วหรือชง และการเกิดสารระเหยที่ทำให้เกิดกลิ่นหอมของกาแฟ

3. ศึกษาเพิ่มเติมโดยควบคุมปัจจัยการคั่วที่ส่งผลต่อคุณภาพกลิ่นกาแฟ เพื่อศึกษาปัจจัยความแตกต่างที่เกิดขึ้นระหว่างการเพาะปลูก ได้แก่ กาแฟจากแม่กำปอง แม่หลอด ตีนตก และม่อนเงาะ

4. พบว่าไร่กาแฟที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลแตกต่างกันและสภาวะการเพาะปลูกที่แตกต่างกัน ซึ่งนับเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่ออัตลักษณ์ของกาแฟแต่ละชนิด

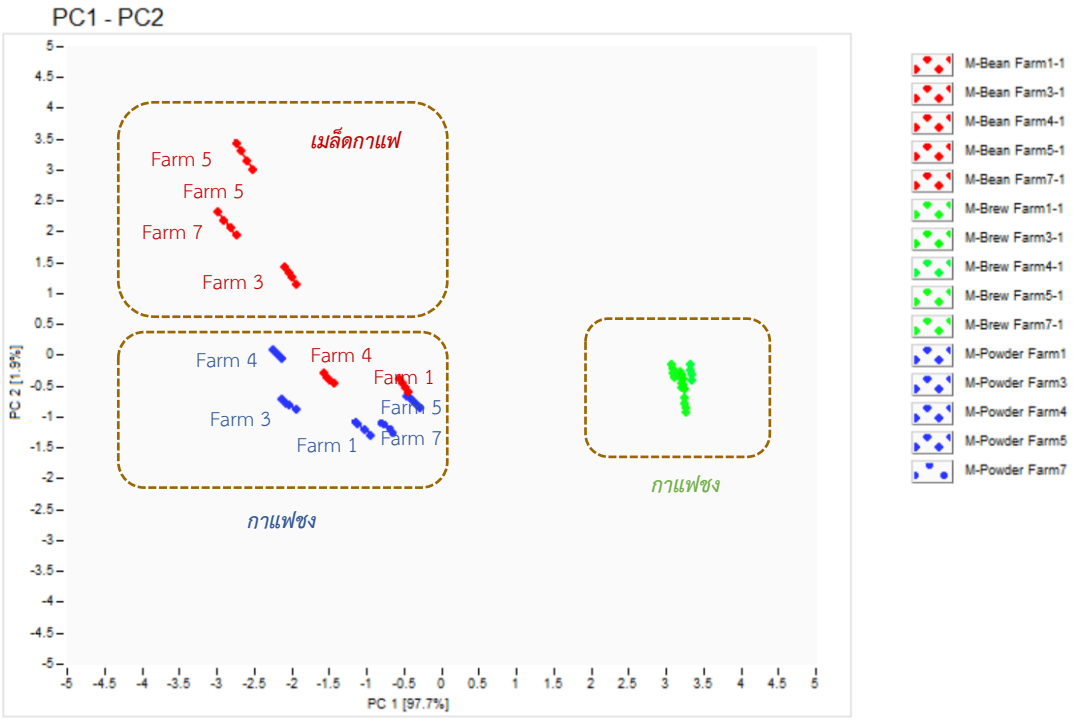
5. ซึ่งสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอทีสำหรับติดตั้งในไร่กาแฟช่วยให้เกษตรกรติดตามความปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศนั้นๆได้อย่างต่อเนื่อง

6. ศึกษาเพิ่มเติมสำหรับกระบวนการคั่วกาแฟ โดยพัฒนาซอฟแวร์เพื่อรองรับการวิเคราะห์ผลคุณภาพกลิ่นกาแฟขณะคั่วด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อยกระดับและต่อยอดการควบคุมคุณภาพการคั่วกาแฟ

ผลการทดสอบศึกษาเปรียบเทียบกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบด แบบผง และแบบชง จากแหล่งที่มาที่แตกต่างกันด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

- เมื่อนำกาแฟมาบดละเอียด พบว่าลักษณะกลิ่นนั้นจะแตกต่างจากกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วบดดั้งเดิม โดยเฉพาะเมื่อนำกาแฟมาชงในน้ำร้อน อาจเนื่องมาจากองค์ประกอบในเมล็ดกาแฟที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างกระบวนการคั่วหรือชง และการเกิดสารระเหยที่ทำให้เกิดกลิ่นหอมของกาแฟ
- กาแฟจากแต่ละพื้นที่ที่นำมาชงแล้ว จะมีความเข้มข้นกลิ่นและลักษณะกลิ่นไม่ต่างกันมากนัก สังเกตได้จากกราฟ PCA ที่ชุดข้อมูลนั้นจับกลุ่มบริเวณใกล้เคียงกัน

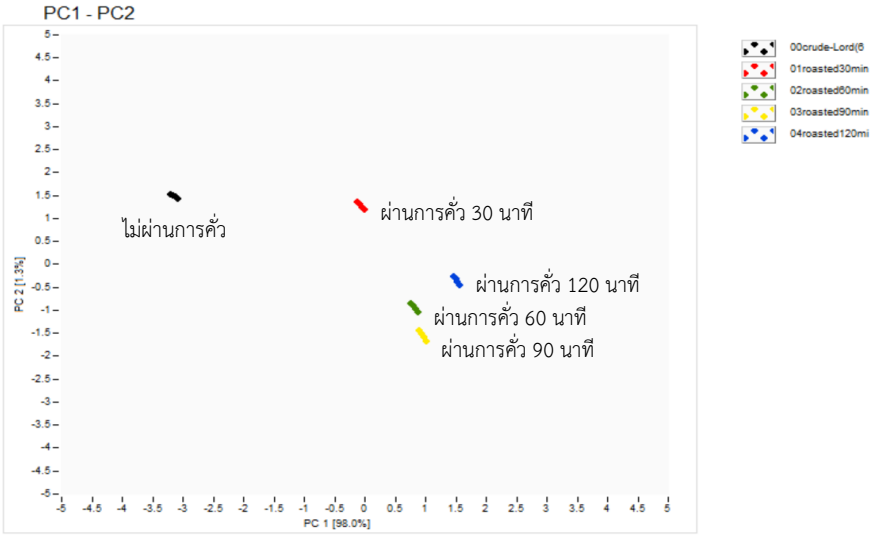
การเปรียบเทียบกลิ่นของกาแฟทั้ง 3 แบบ



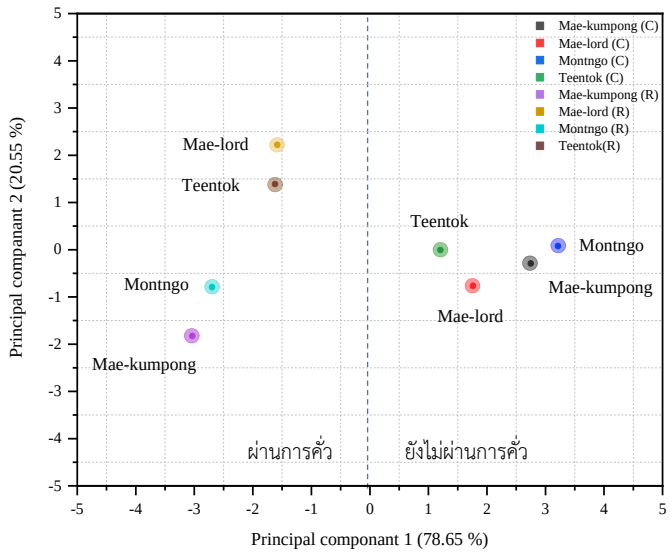
ภาพแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของกลิ่นกาแฟ

ผลการทดสอบศึกษาเปรียบเทียบกลิ่นของเมล็ดกาแฟคั่วที่เวลาแตกต่างกันด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

- เมื่อคั่วกาแฟแตกต่างกันจะส่งผลต่อลักษณะกลิ่นกาแฟที่แตกต่างกันสื่อถึงคุณภาพกาแฟสามารถประเมินได้จากกระบวนการคั่วที่แตกต่างกัน
- เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถจำแนกความแตกต่างของกลิ่นเมล็ดกาแฟที่ยังไม่ผ่านการคั่วและผ่านการคั่วแล้วได้ อีกทั้งแผนภาพข้อมูลกลิ่นชี้ให้เห็นว่ากาแฟที่มีลักษณะกลิ่นใกล้เคียงกันมาจากแหล่งเพาะปลูกที่มีความสูงใกล้เคียงกัน

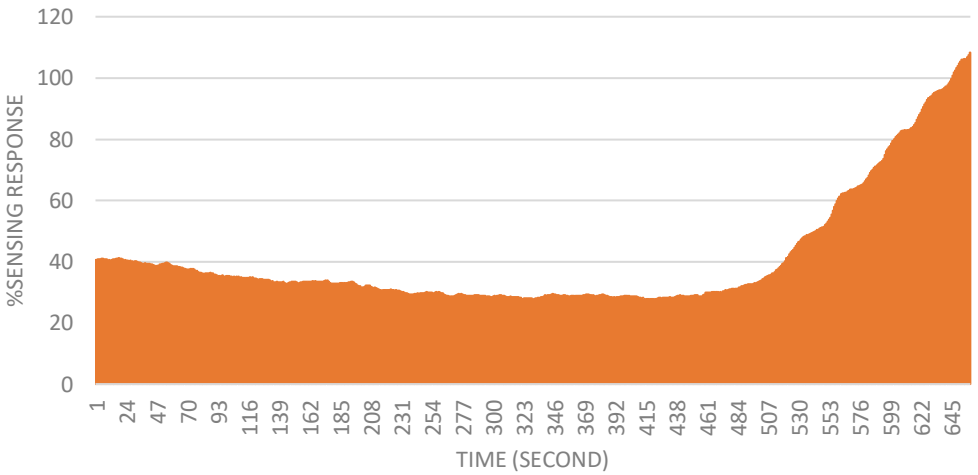


ภาพแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟคั่ว (Roasted Coffee Beans)

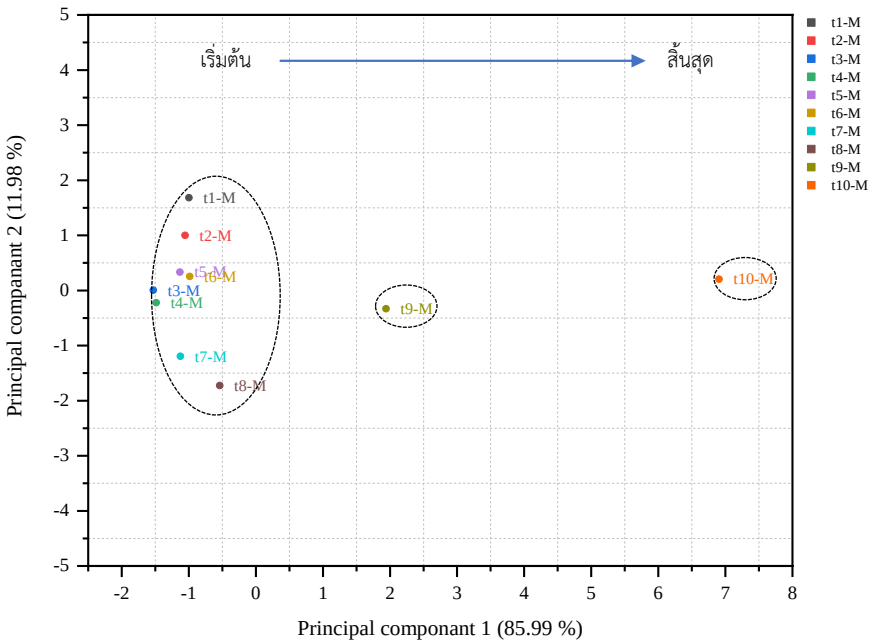


ภาพแสดงผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลิ่นด้วยวิธี PCA ของข้อมูลกลิ่นเมล็ดกาแฟดิบเปรียบเทียบกับคั่ว

- เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถปรับใช้ติดตามลักษณะกลิ่นกาแฟขณะคั่วได้ โดยพบว่าเมื่อระยะเวลาในการคั่วเพิ่มขึ้นกลิ่นกาแฟจะมีความเข้มมากขึ้นเนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นในขณะคั่วกาแฟ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมีขณะคั่วสูง ลักษณะกลิ่นกาแฟจึงเริ่มมีความแตกต่างมากขึ้นเมื่อเกิดการแตกตัวของเมล็ดกาแฟ (first crack) และเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกระบวนการเคมีอื่นๆ



ภาพแสดงระดับความเข้มข้นรวมของเมล็ดกาแฟโคลัมเบียตั้งแต่เริ่มต้นและสิ้นสุดการคั่ว



ภาพแสดงข้อมูลแผนภาพกลิ่นตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการคั่วกาแฟด้วย PCA

สรุปผล

1

สามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายเซ็นเซอร์ พัฒนาเป็นสถานีตรวจวัดสภาพแวดล้อมแบบไอโอทีติดตั้งบนพื้นดินตามตำแหน่งต่างๆ ในไร่กาแฟ ได้แก่ สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง สถานีวิจัยโครงการหลวงแม่หลอด (Mae-lord) สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน บ้านพ่อหลวง ธีรเมศร์ (Mae-kampong) สถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่ออน โครงการหลวงตีนตก (Teentok) และสถานีตรวจวัดในเขต อ.แม่แตง โครงการหลวงม่อนเงาะ (Monngo) ณ จังหวัดเชียงใหม่ได้สำเร็จ

2

สถานีเทคโนโลยีไอโอทีสามารถตรวจวัดและประเมินสภาพอากาศและช่วยวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อยกระดับอุตสาหกรรมในการปลูกกาแฟปลูกกาแฟแบบเกษตรแม่นยำ (Pre-harvest) ได้สำเร็จ

3

พัฒนาเทคโนโลยีเซนเซอร์และดิจิทัลได้แก่ เซนเซอร์ดมกลิ่นกาแฟ (Aroma Sensors) การทำข้อมูลกลิ่นกาแฟ (Digitization of Coffee Aroma) โดยพัฒนาเทคโนโลยีจมูกอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถมาประยุกต์ในการดมกลิ่นกาแฟภายหลังการคั่ว และสามารถยกระดับการวิเคราะห์โดยพัฒนาปรับปรุงซอฟแวร์และฮาร์ดแวร์อย่างจมูกอิเล็กทรอนิกส์วิเคราะห์กลิ่นกาแฟขณะเกิดการคั่วเพื่อเป็นแนวทางการวิเคราะห์คุณภาพกาแฟพร้อมไปกับกระบวนการคั่ว เพื่อในอนาคตส่งมอบเทคโนโลยี Pre-harvest และ Post-harvest แบบพร้อมใช้งาน ไปช่วยเกษตรกรผู้ปลูกกาแฟ และ ผู้ประกอบการผู้ผลิตกาแฟต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. T. Pobkrut, and T. Kerdcharoen, “Soil sensing survay robots based on electronic nose,” in Control, Automation and Systems, Seoul, 2014, pp. 1604-1609.
2. N. Watthanawisuth, A. Tuantranont, T. Kerdcharoen, “Microclimate real-time monitoring based on ZigBee sensor network,” in IEEE Sensors, 2009, pp. 1814-1818
3. M. A. Fourati, W. Chebbi, and A. Kamoun, “Development of a web-based weather station for irrigation sheduling,” in Proceedings of the 3rd IEEE Colloquium in Information Science and Technology (CIST 2014), pp. 37-42, October 2014.
4. N. Tongrod, A. Tuantranont, and T. Kerdcharoen, “Adoption of precision agriculture in vineyard,” in Proceedings of the 6th Annual IEEE International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and formation Technology (IEEE ECTI-CON 2009), May 2009.

ภาคผนวก 3

รายงานการประชุมในระดับนานาชาติ

Electronic Nose for Analysis of Coffee Beans Obtained from Different Altitudes and Origin

Wandee Aunsa-Ard
Materials Science and Engineering Program,
Faculty of Science, Mahidol University
Bangkok 10400, Thailand
aunsaard.w@gmail.com

Teerakiat Kerdcharoen
Department of Physics, Faculty of Science, and Research Network of NANOTEC at Mahidol University
National Nanotechnology Center
Bangkok 10400, Thailand
*Corresponding author: teerakiat@yahoo.com

Abstract— The coffee industry is facing increasing challenges due to climate change, pests, diseases, which leads to the reduced production and negative impact on coffee qualities. Thus, quality assurance of coffee from production to roasting and brewing becomes more important, especially coffee flavor and aroma. This research aims to study the applicability of electronic nose (e-nose) and algorithm to detect coffee aroma obtained from different origins. The coffee beans used in this experiment were obtained from different areas in northern Thailand. These coffee beans have different growing conditions, altitude, processing and roasting condition. In this study, the three aspects of e-nose were investigated; (i) e-nose sensitivity to coffee odors, (ii) e-nose capability of correctly recognizing the detected odors and (iii) factors that influence coffee odors such as altitude, processing and roasting conditions. The e-nose system comprises of eight metal oxide semiconductor (MOX) gas sensors and in-house developed analysis software. Principal Component Analysis (PCA) is a classification algorithm for pattern recognition of different coffee aroma. Based on experimental results, the e-nose technology shows a capability to detect and distinguish the coffee odors caused by different altitude, processing and roasting process. E-nose is a suitable method for aroma detection in coffee industry to enhance the quality.

Keywords-component; electronic nose, coffee, coffee aroma, arabica

I. INTRODUCTION

Coffee is the most popular and consumed brewed drink prepared from roasted coffee beans, the seed from certain Coffea species. Coffee is prized for its aroma and caffeine content. The global coffee market was valued at USD 102.02 billion in 2020 and it is projected to reach a CAGR of 4.28% during forecast period of 2021-2026. Nowadays, coffee is grown in more than 70 tropical countries. The top coffee-producing countries globally are Brazil, Vietnam, and Columbia [1].

The world consumption of coffee in 2020, estimated by the International Coffee Organization (ICO), has been around 176 million bags of 60 kg. In 2020, coffee production for Thailand was 500,000 bags of 60 kg. In Thailand, Arabica beans are commonly grown in northern Thailand due to relatively cool weather, while robusta beans mainly in the south.

Coffee cultivation and productivity depend on several factors, such as local weather conditions, soil type, cultivation type, nutrient management practices, pest and disease complex, availability of water etc. [2]. Arabica coffees are cultivated at 500-1,000 m and requires cooler temperature (15-25°C), while Robusta coffee needs a hot humid climate (20-30°C) [3]. In Thailand, traditional arabica coffee regions include Chiangmai and Chiangrai provinces, which are located in northern Thailand at sea level more than 900 m having cooler dynamic climates. Robusta coffee are cultivated mainly in the south of Thailand.

The global coffee crop is increasingly threatened by climate change, diseases and pests [4]. Coffee aroma depends on several factors such as processing method, drying facility, storage facility, moisture management etc. Coffee bean is constituted by components, including caffeine, cellulose, minerals, sugars, lipids, tannin and polyphenols. Caffeine is most known component in coffee beans with 0.8-1.4% (w/w) in Arabica and 1.7-4.0% (w/w) in Robusta [5].

Nowadays, sensory evaluation is used to identify the taste, odor, texture of coffee. The sensory evaluation includes the basic coffee characteristics such as fragrance, aroma, taste, body and acidity. The purposes of the sensory evaluation involve coffee grading, off-flavor testing, change due to reformulation, changes in processing and storage under various conditions, effect of packaging. However, the problems in coffee evaluation by human sensory is lack of quantitative data and common language. Thus, it is necessary to implement an accurate method with the ability to digitalize the smell, called electronic nose.

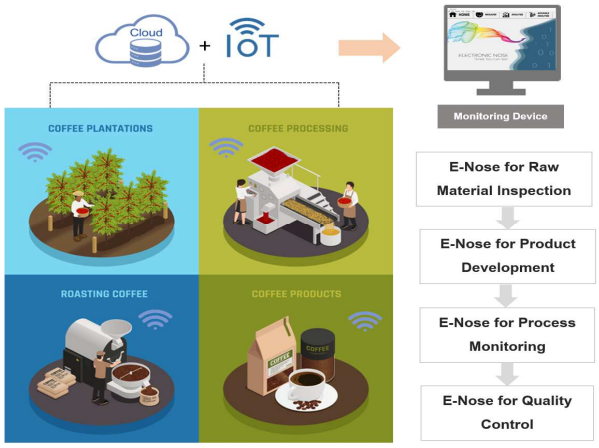


Fig. 1. Electronic nose technology for coffee industry

2022 14th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST) | 978-1-6654-0014-5/22/$31.00 ©2022 IEEE | DOI: 10.1109/KST53302.2022.9729071

Authorized licensed use limited to: Mahidol University provided by UniNet. Downloaded on June 02,2022 at 06:05:23 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

Apart from odor detection, the e-nose will provide benefits for coffee industry such as sensory control of raw materials (coffee beans), new recipe development, benchmarking of competitive products, determination of storage conditions of coffee, roasting and brewing process optimization, sensory control of products as illustrated in Fig. 1.

II. METHODOLOGY

A. Electronic Nose System

An E-nose system used in this study is our in-lab developed e-nose system, which consists of three main components; (i) e-nose machine, (ii) gas flow system and (iii) data acquisition system [6]. The e-nose unit comprises of gas sensor arrays, sensing chamber, solenoid valves, data acquisition (DAQ) devices and pump system as shown in Fig. 2. The clean air carries odor molecules of samples into sensor chamber with appropriate flow rate. The solenoid valve prevents the mixing of gas molecules between reference gas and sample [7].

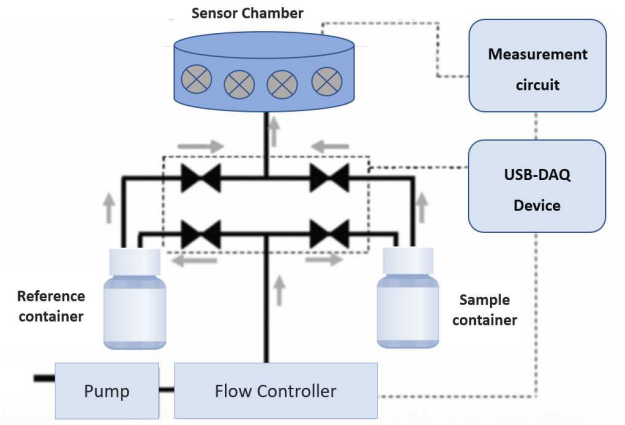


Fig. 2. Working principle of electronic nose system

Eight metal oxide semiconductor (MOS) sensors with some cross-sensitivities to target gases were used for the sensing unit of the e-nose. These gas sensors are highly sensitive to various volatile compounds as shown in Table I. Their working principle is based on catalytic reactions of metal oxide surface (i.e. SnO_2 and WO_3) with the target gas molecules at high temperature (250-350°C), resulting in the resistance change between electrodes. The maximum resistance of reference gas and minimum of sample gas were extracted for the sensing response analysis [8].

Table I. LIST OF SEMICONDUCTOR GAS SENSORS

Sensor No.	Target Gas
1	Combustible Gases
2	Air pollutants (Hydrogen, Ethanol etc.)
3	Organic Solvent Vapor
4	Air pollutants (VOCs, Ammonia, H_2S)
5	Ammonia
6	Butane, Propane
7	Alcohol, Solvent vapors
8	Ammonia

The analysis program used for the e-nose system includes Principal Component Analysis (PCA), which is a linear and unsupervised pattern-recognition method. PCA is a tool to reduce the dimension of high-dimensional data to lower-dimensional space due to high-dimensional space and multiple extracted signal characters of the data obtained from the e-nose. PC1, PC2 and PC3 are principal components with the most three maximum variances.

B. Coffee origin

Roasted coffee beans (Arabica) were collected from different coffee origins in northern Thailand. Table 2 shows the coffee origins with different altitude, roasting time and temperature of medium- and dark-roasted coffee beans. The roasting process of coffee beans is particularly important step, which mostly affects organoleptic properties (flavors, aromas and color) as a consequence of coffee quality. During roasting process, the chemical reactions, moisture loss and property changes (color, volume, mass, form, pH, density and volatile components) occur in the bean matrix [9]. Table 2 shows the roasted coffee beans from six farms located in different altitudes.

Table II. LIST OF COFFEE USED IN THE EXPERIMENT

Farm No.	Area	Altitude (m)	Roasting temperature (medium)	Roasting temperature (dark)
Farm 1	Doi Saket District	563	200-230°C	>230°C
Farm 2	Doi Saket District	1,126	115°C	123°C
Farm 3	Doi Saket District	1,148	200-250°C	200-250°C
Farm 4	Mae On District	1,232	230-235°C	>235°C
Farm 5	Mae On District	1,140	180°C	190°C
Farm 6	Mae Taeng District	890	200-250°C	200-250°C

Remark: Roasting time about 20-30 min.

C. Sample preparation

Sample preparation is one of major components of successfully using an e-nose. Sampling techniques such as sample containment, treatment, conditioning and storage can impact the experimental results performed with e-nose.

In this experiment, coffee samples were prepared in three steps: roasted coffee beans, ground coffee and brewed coffee. Firstly, the roasted coffee beans obtained from different sources were ground in a milling machine. The ground coffee was brewed by solid-liquid extraction with heated water. The ratio between ground coffee powder and water was 1:4 w/w. The obtained coffee brews had a temperature of 60°C. Thereafter, the coffee samples were placed in 100 mL glass container. The experiments were setup at room temperature.

Fig. 3 Coffee sample preparation

Authorized licensed use limited to: Mahidol University provided by UniNet. Downloaded on June 02,2022 at 06:05:23 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

D. *E-Nose Experiment*

Before running the sample analysis, the gas sensors in the e-nose need to be cleaned using clean air (air zero grade) passing through the chamber for 10 minutes. The parameters shown in Table 3 have been optimized for each coffee sample type.

In each experiment, the gas sensors were stabilized with the reference gas for 3 minutes (reference time) to prevent cross contamination of samples. The sample time was 1 minute for each sample. The flow rate used for coffee sample analysis was 1.0 L/min.

Table III. LIST OF PARAMETERS

1.Parameter	**Coffee beans**	**Coffee power**	**Brewed coffee**
Sample state	Solid	Solid	Liquid
Sample amount	10 g	10 g	40 ml
Sample Temperature	Room temperature	Room temperature	60°C
2.Analysis program			
Flow rate	1 Lit/min.	1 Lit/min.	1 Lit/min.
Reference time	3 min.	3 min.	3 min.
Sample time	1 min.	1 min.	1 min.
Number of trial cycle	1	1	1

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. *Classification of dark-roasted coffee beans*

Fig. 4 shows the sensing response of eight gas sensors to volatile compounds of the dark-roasted coffee beans. Sensor No. 4 and 5 show high sensitivity to coffee odor molecules, while sensor No. 6 shows the lowest sensitivity.

The total sensing response of each coffee sample in Fig. 5 was calculated based on summation of the above sensing responses, as an approximation of the odor intensity of coffee. The coffee from farm 1 shows highest total sensing response with 561 unit, while coffee from farm 2 shows the lowest total sensing response with 444 unit due to its low roasting temperature about 123°C.

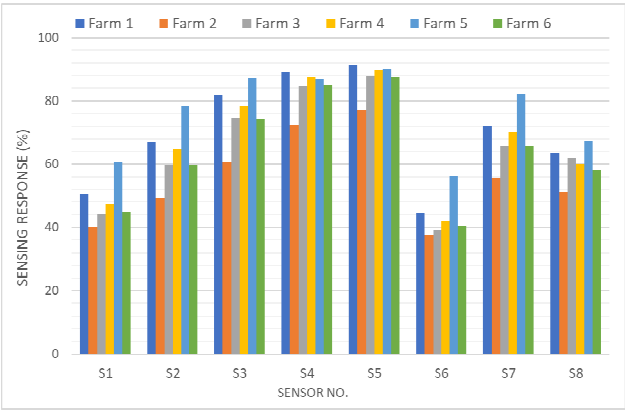


Fig. 4 Average percentage change in resistance of 8 semiconductor gas sensors used in electronic nose

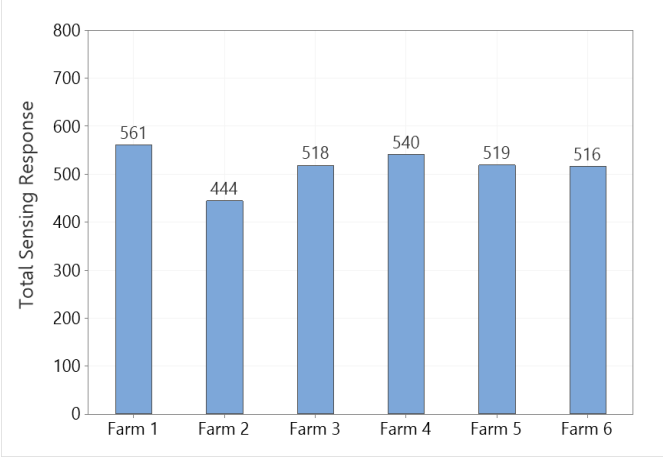


Fig. 5 Total sensing response of dark-roasted coffee beans

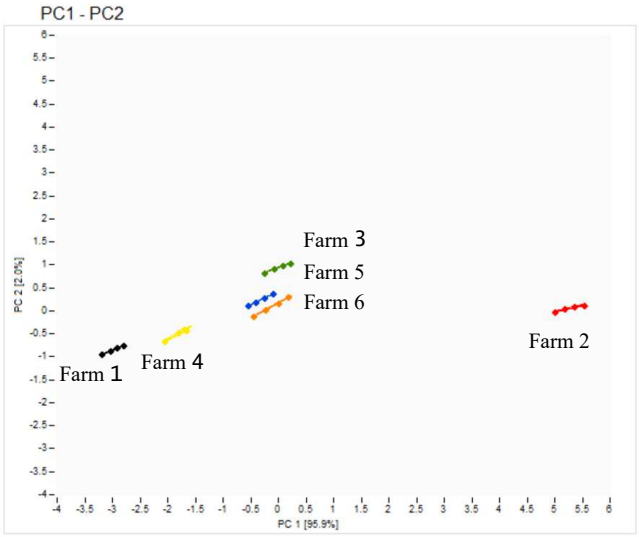


Fig. 6 Principal component analysis (PCA) of the e-nose data

Fig. 6 illustrates the PCA results when an e-nose was used to identify different coffee bean samples. The two-dimensional scatter plot shows that coffee beans were classified into four groups. The first principal component (PC1) expresses 95.9% and the second principal component (PC2) 2.0% of total variance in data. Coffee beans from farm 2 shows different odor characteristics and the odor intensity is lower than other coffee bean sources. Odor characteristics of farm 3, 5 and 6 are most similar due to their clustered data group.

In order to study the similarity of odor characteristics by e-nose machine, the cluster analysis method is used, which provides the odor similarity data of the coffee. Basically, the similar odors will have a lower distance index, while different odors show a higher distance index. From the experiment, the odor of sample No.5 (Farm 5) was the closest to sample No. 6 (Farm 4), with a distance index of approximately 0.18 unit. Sample No. 2 (Farm 2) shows a highest distance index compared other coffee samples, resulting in different odor characteristic.

Authorized licensed use limited to: Mahidol University provided by UniNet. Downloaded on June 02,2022 at 06:05:23 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

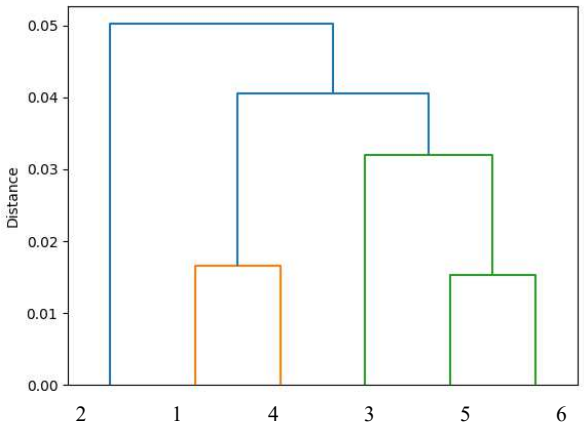


Fig. 7 Cluster analysis of coffee bean samples (Farm 1-6)

B. *Comparision of coffee beans, powder and brewed coffee*

Fig. 8 shows the total sensing response related to the odor intensity of coffee samples; roasted coffee beans, ground coffee and brewed coffee from six different coffee sources.

The brewed coffee has higher odor intensity than coffee beans due to their large surface area, resulting in a greater concentration of volatiles released into headspace. The brewed coffee shows the strongest odor with more than 700 unit.

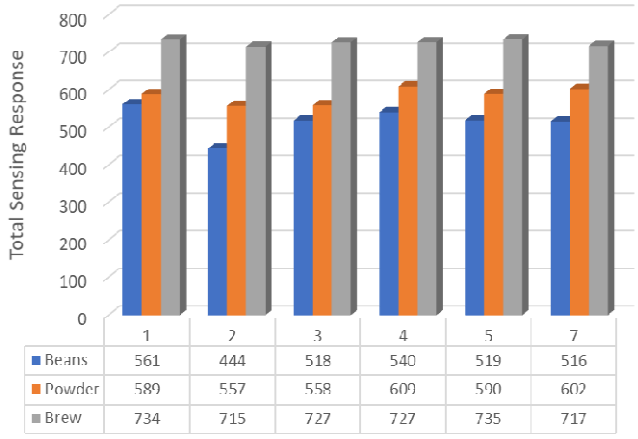


Fig. 8 Total sensing response (%) of dark-roasted coffee beans, ground coffee and brewed coffee

The PCA plot in Fig. 9 shows the first principal component (PC1) with 96.7% of total variance and the second principal component (PC2) with 2.9% of total variance. The PCA result shows, that odor characteristics of brewed coffee odor is distinguished from coffee beans and ground coffee. Furthermore, it indicates that brewed coffee from all farms has relative similar odors despite their different altitude and roasting conditions. Compared to other farms, farm 2 roasted the coffee beans at low temperature (123°C), which can lead to different odor characteristic.

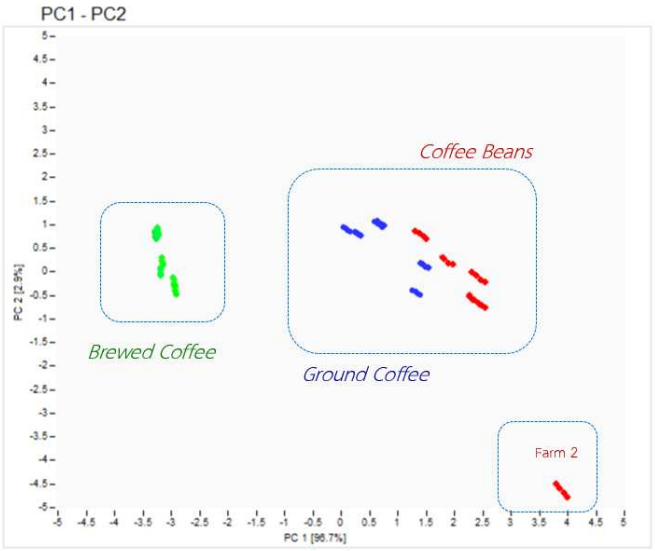


Fig. 9. Classification of coffee beans, ground coffee and brewed coffee (dark-roasted) by PCA method

IV. CONCLUSION

In this research, arabica coffee from six cultivation areas with different altitude and roasting process was tested using an in-lab developed e-nose system. The experimental results obtained from the e-nose indicate the investigation of coffee aroma in term of odor characteristics and odor intensity. Coffee bean from farm 2 show the lowest odor intensity due to its low roasting temperature (123°C), while coffee beans from other area were roasted at higher temperature (>190°C). Compared between different coffee state, the brewed coffee in liquid state showed highest odor intensity, indicating the strongest coffee aroma in this experiment.

Sample preparation (amount, temperature) and e-nose conditions (flow rate, reference time, sample time) are the important factors to obtain the precise and accurate measurement data from the e-nose machine.

The application of electronic nose to the classification and identification of coffee products can provide a large potential market. The e-nose technology has proven to be useful at an industrial level in quality control, security and traceability applications in coffee industry.

Future work will be considered the study of factors that impact on coffee aroma; from coffee plantation (climate, altitude, soil, water), coffee processing condition, roasting process to brewing process.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to express their gratitude to the Office of the National Broadcasting and Telecommunications Commission for the financial support. The infrastructure for this research was supported by Mahidol University and National Nanotechnology Center (NANOTEC) through its Research Network of NANOTEC (RNN).

Authorized licensed use limited to: Mahidol University provided by UniNet. Downloaded on June 02,2022 at 06:05:23 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

REFERENCES

[1] A. Torok, T. Mizik, A. Jambor, "Comparative advantages in the global coffee trade," in IFAMA World Conference, 2017.

[2] K. Velmourougane, R. Bhat, "Sustainability challenges in the coffee plantation sector," pp. 616-642, 2017.

[3] D. Groenen, "The effects of climate change on the pests and diseases of coffee crops in mesoamerica," Climatology & Weather Forecasting, vol. 6, pp. 239-243, 2018.

[4] J. Pohlan, M. Janssens, "Growth and production of coffee, in soils, plant growth and crop production," Encyclopedia of Life Support Systems, 2010.

[5] S. Mussatto, E. L. M. Machado, S. Martins, J. A. Teixeira, "Production, composition and application of coffee and its industrial residues," Food and Bioprocess Technology, pp. 661-672, 2011.

[6] T.C. Pearce, S.S. Schiffman, H.T. Nagle, and J.W. Gardner, "Handbook of machine olfaction: Electronic Nose Technology," Wiley-VCH, Weinheim, pp. 79-84, 2003.

[7] C. Wongchoosuk, P. Lorwongtragool, T. Kerdcharoen, "Malodor detection based on electronic nose," Chapter 3 in Air Quality Monitoring, Assessment and Management, 2011.

[8] C. Wongchoosuk, M. Lutz, T. Kerdcharoen, "Detection and classification of human body odor using an electronic nose," Sensors, vol. 9, pp. 7234-7249, 2009.

[9] S. Schenker, T. Rothgeb, "The roast – Creating the beans' signature," The Craft and Science of Coffee, pp. 245-271, 2017.

Authorized licensed use limited to: Mahidol University provided by UniNet. Downloaded on June 02,2022 at 06:05:23 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.

ภาคผนวก

คู่มือการใช้งานเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

สารบัญ

1. ข้อมูลทางเทคนิค 1

1.1 คำอธิบายทั่วไป 1

1.2 ข้อกำหนดทางเทคนิค 2

2. รายการส่วนประกอบของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ 3

2.1 ส่วนประกอบของจมูกอิเล็กทรอนิกส์ 3

2.2 ระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ 4

2.3 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องปรับความดัน (Pressure Regulator) 5

3. การใช้งาน 6

3.1 ขั้นตอนการใช้งานของระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ 6

3.2 ขั้นตอนการใช้งานของเครื่องปรับความดัน (Pressure Regulator) 7

3.3 โปรแกรมซอฟต์แวร์ (Software Program) 8

3.3.1 โปรแกรม ODORA 8

3.3.2 ส่วนประกอบของหน้าต่างโปรแกรม 9

3.3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับการวัด 10

3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล 12

- การวิเคราะห์อัตราการตอบสนองของเซ็นเซอร์ (Sensing Response) 13
- การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component analysis) 16
- การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของกลิ่น (Smell comparison) 18
- การเปิดดูไฟล์การตรวจวัดแบบย้อนหลัง 20

4. พารามิเตอร์ (Parameter) 22

5. การบำรุงรักษา (Maintenance) 23

5.1 การทำความสะอาดระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์ 23

5.2 การทำความสะอาดระบบหมุนเวียนอากาศ 23

1. ข้อมูลทางเทคนิค

1.1 คำอธิบายทั่วไป

จมูกอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอุปกรณ์ที่จำลองระบบการดมกลิ่นเพื่อเลียนแบบจมูกมนุษย์ โดยมีส่วนประกอบสำคัญพื้นฐานคือ ส่วนการรับกลิ่น ซึ่งจะมีแก๊สเซนเซอร์ที่มีความไวต่อสารเคมีระเหยแตกต่างกันหลาย ๆ ชนิด ประกอบเข้าด้วยกันคล้ายการทำงานของจมูกมนุษย์ แก๊สเซนเซอร์แต่ละชนิดจะมีการตอบสนองต่อกลิ่น แก๊ส หรือไอระเหยที่แตกต่างกัน เมื่อโมเลกุลของสารเคมีเหล่านั้นมาสัมผัสกับหัววัดเซนเซอร์จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของเซนเซอร์ในรูปแบบของความต้านทานที่แตกต่างกัน จากนั้นหน่วยประมวลผลโดยระบบคอมพิวเตอร์จะทำการบันทึกค่าสัญญาณที่อ่านค่าได้ไว้ เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติเปรียบเทียบกับกลิ่นของสารตัวอย่างที่เราต้องการทราบความแตกต่าง ระบบก็จะแสดงว่ากลิ่นตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นมีความเหมือนหรือแตกต่างกับกลิ่นที่บันทึกไว้หรือไม่ ในรูปแบบของกราฟ PCA (Principal Component Analysis) และสามารถเปรียบเทียบความรุนแรงของกลิ่นตัวอย่างได้จากการวิเคราะห์อัตราการตอบสนองของเซนเซอร์ (Percent Sensing Response) แม้ว่าการวิเคราะห์กลิ่นด้วยเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์สามารถให้ข้อมูลเกี่ยวกับตัวอย่างได้เพียงในเบื้องต้น ไม่สามารถระบุได้ว่ากลิ่นที่ตรวจวัดประกอบด้วยสารเคมี ใดบ้าง แต่เป็นวิธีที่ให้ผลได้รวดเร็วในทันทีและให้ข้อมูลเพียงพอกับความต้องการของผู้ใช้งานส่วนมาก

รูปที่ 1 เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

1.2 ข้อกำหนดทางเทคนิค (Technical Specification)

Model: **MUI NOSE 1.0**

ข้อมูลทางเทคนิค

Sensor technology:	Metal oxides sensors, working temperature 350°C ... 500°C
Sensor array:	8 different metal oxide sensors, optional adapted to application
Sensor response time:	Typical: 1 second
Inlet Sampler:	Special fluidic connector
Sample flow:	500 ml/min to 1400 ml/min
Flow system:	Internal pumps, internal sample dilution system
Measurement time:	Depending on application from 20 seconds to some minutes Typical: 1 minute (30s sample, 30s zero gas)
Display:	Graphical display
Dimension:	47 x 35.7 x 17.6 cm
Weight:	5 kg

Environment Requirements

Temperature:	Typical: 0°C to 80°C
Humidity (relative):	0% to 95%, non-condensing

Power Requirements

Main power:	Power supply: max. 100 watt

Communications

Computer interface:	USB port (Type B)

System Requirements

Operating system	Windows 10, Windows 11
Software:	WinMuster PEN for evaluation and analysis Algorithm for analysis: Euclid, Correlation, Mahalanobis, DFA, PCA, LDA and PLS

2. รายการส่วนประกอบของจมูกอิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ 2 ส่วนประกอบของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

2.1 ส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

1. ช่องสำหรับทางเดินอากาศจากปั๊ม
2. ช่องสำหรับดูดอากาศ (Pump in)
3. ช่องระบายอากาศจาก Sensors Chamber
4. จุดต่อขวด Sample
5. ช่องทางเดินอากาศ Reference
6. ไฟแสดงสถานะขณะการตรวจวัดกลิ่นตัวอย่าง
7. ช่องสำหรับดูดอากาศ (Pump out)
8. จุดต่อไฟฟ้า
9. สวิตช์เปิด/ปิดเครื่อง
10. ช่องต่อสาย USB กับ คอมพิวเตอร์
11. หน้าจอแสดงผล

2.2 ระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์

	เครื่องจมูก อิเล็กทรอนิกส์ แบบพกพา (Portable Electronic Nose)
	สายไฟ (Main Power Supply)
	สาย USB Type B
	ตัวควบคุมความดัน (Pressure Regulator) Calibration Gases Pressure Regulator

	Air Zero Grade • Oxygen (O_2): 20% • Nitrogen (N_2): Balance • Moisture (H_2O) <5 ppm • Total Hydrocarbons < 1 ppm
   ODORA Analytics ODORA Measurement	ชุดโปรแกรมประมวลผล

2.3 ข้อมูลทางเทคนิคของเครื่องกำเนิดอากาศบริสุทธิ์

ข้อมูลทางเทคนิค	**ค่า (Value)**
ความดันสูงสุดขาเข้า (Max. pressure; Inlet)	See label
อัตราการไหลสูงสุดขาออก (Max. flow; outlet)	See label
แรงดันขาออกที่กำหนด (ถ้ามี):	5 bar
ความแม่นยำของอัตราการไหล (Accuracy of the flow rate)	Acc. To EN-ISO 10524-1
เกลียวต่อกระบอกสูบ (Cylinder connection thread)	CGA Standard
Constant outlet thread	M 12x1
Thread (if present) at flow outlet	9/16 UNF
Nipple diameter	6 mm acc. To DIN-EN 13544-2

3. การใช้งาน

1.1 ขั้นตอนการใช้งานระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์

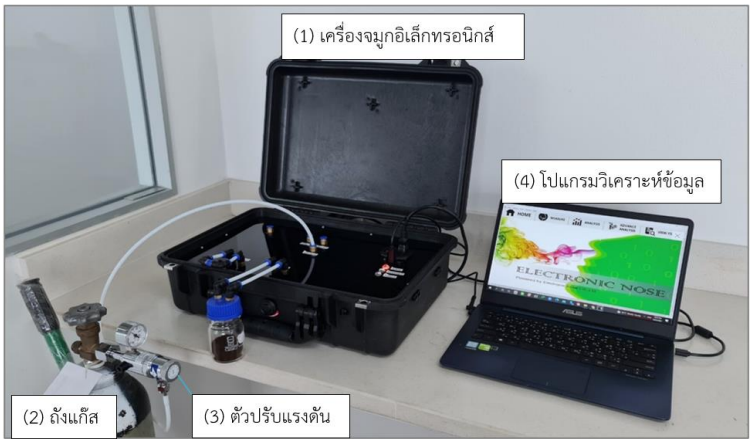
1. เสียบปลั๊กไฟ 220 V และเปิดสวิตช์ของเครื่อง
2. ต่อสาย USB จากตัวเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์เข้ากับคอมพิวเตอร์
3. เปิดโปรแกรม ODORA
4. ต่อท่อกรองอากาศ (Activated Carbon Filter) เข้ากับช่องต่ออุปกรณ์กรองอากาศ
5. ทำการวอร์มเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์เป็นเวลา 30 นาที
6. นำตัวอย่างที่ต้องการทดสอบใส่ลงในขวด Sample และต่อขวด Sample เข้ากับช่อง Sample ที่ตัวเครื่อง
7. ทำการตั้งค่าสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่องจากโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ (ขั้นตอนการใช้งานจะอธิบายในส่วนของการใช้โปรแกรม) และกดปุ่ม Start
8. รอเครื่องทำงานจนเสร็จ

(1) เครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ พร้อมขวดแก้วสำหรับบรรจุตัวอย่าง โดยจะดูดกลิ่นของตัวอย่างผ่านปั๊มลม

(2) Zero Grade Air ที่บรรจุอยู่ในถัง สำหรับเป็น Reference Gas และ Carrier Gas

(3) ตัวปรับแรงดัน (Pressure Regulator) เพื่อควบคุมอัตราการไหล

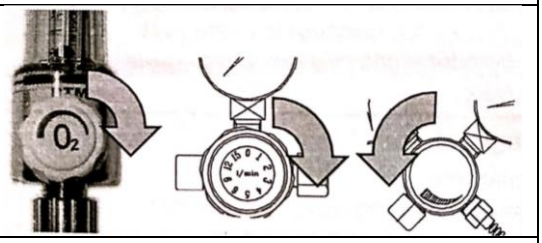
(4) เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับรับข้อมูลสัญญาณ และการแปลผลข้อมูลสัญญาณกลิ่น



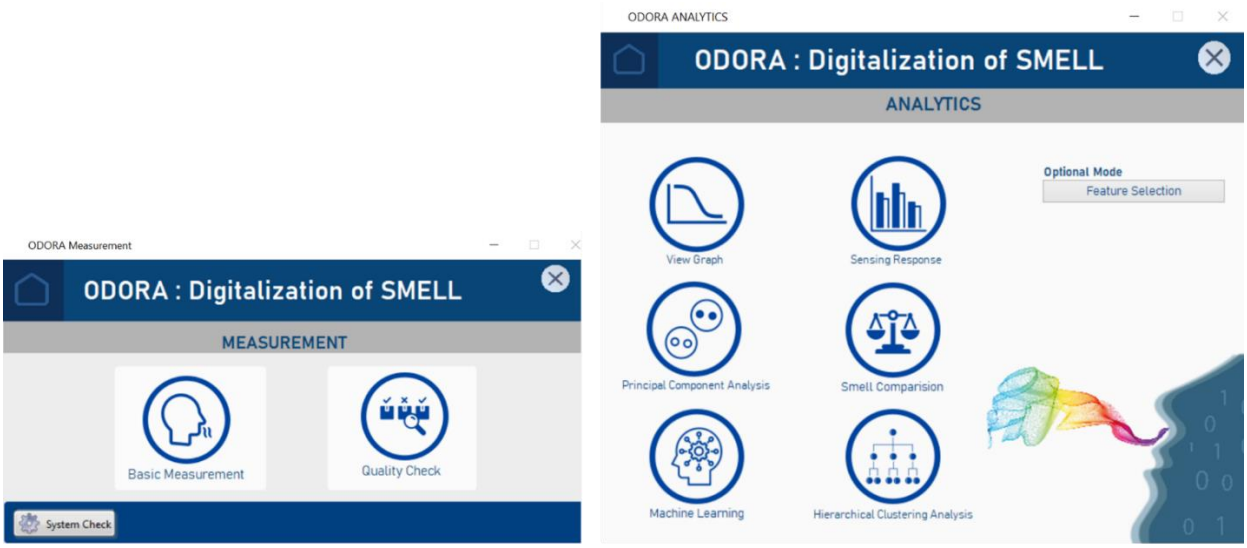
รูปที่ 3 ระบบจมูกอิเล็กทรอนิกส์

3.2 ขั้นตอนการใช้งานตัวปรับแรงดัน (Pressure Regulator)

การเชื่อมต่อตัวปรับแรงดัน (Pressure regulator) กับวาล์วถังแก๊ส (Cylinder valve) มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ที่	ขั้นตอน	ภาพประกอบ
1	ตรวจสอบให้แน่ใจว่าตั้งค่าอัตราการไหลเป็นศูนย์ หมุนวงล้อมือหรือตัวเลือกปาก (orifice selector) ในทิศทางที่แสดงเพื่อปิด	
2	ตรวจสอบให้แน่ใจว่าถังแก๊ส • อยู่ในแนวตั้ง • และไม่พลิกคว่ำ	
3	เมื่อต้องการใช้งาน ให้ถอดฝาซีลบนวาล์วถังแก๊สออก	
4	ขันสกรูข้อต่อกระบอกสูบของตัวปรับแรงดันเข้ากับเกลียววาล์วถังแก๊ส การเชื่อมต่อกระบอกสูบจะต้องหมุนตามเข็มนาฬิกา อย่าใช้เครื่องมือขันสกรูที่วงล้อมือ! (*Never use a tool to screw on the hand wheel!)*	
5	จัดตำแหน่งตัวปรับแรงดันเพื่อให้มิเตอร์วัดการไหลอยู่ในแนวตั้ง อย่าใช้เครื่องมือขันสกรูที่วงล้อมือ! เชื่อมต่อตัวปรับแรงดัน	
6	แนะนำให้ใช้อัตราการไหล **0.5 – 1.5 ลิตร/นาที** สำหรับจมูกอิเล็กทรอนิกส์	

3.3 Software Program



ODORA Analytics

ODORA Measurement

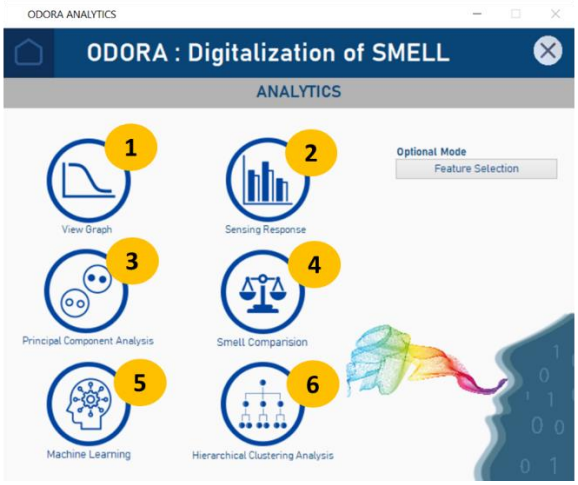
3.3.1 โปรแกรม ODORA

โปรแกรม ODORA ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้งานกับเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยเฉพาะ ตัวโปรแกรมถูกออกแบบให้สามารถใช้งานได้ง่าย ไม่ซับซ้อน สามารถดูผลการตรวจวิเคราะห์แบบ Real-Time ได้ในรูปแบบของกราฟ สามารถบันทึกข้อมูลการตรวจวัดในรูปแบบของ Text ไฟล์ได้เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมอื่น ๆ เช่น Microsoft Excel เป็นต้น นอกจากนี้ตัวโปรแกรม E-Nose Machine เองยังมีฟังก์ชันในการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีการทาง PCA (Principal Component Analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์ของกลิ่นตัวอย่างที่เราสนใจว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร โดยแสดงผลในรูปแบบของกราฟที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย และยังสามารถคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การตอบสนองของเซนเซอร์แต่ละชนิดได้อีกด้วย

3.3.2 ส่วนประกอบของหน้าต่างโปรแกรม

ODORA Measurement

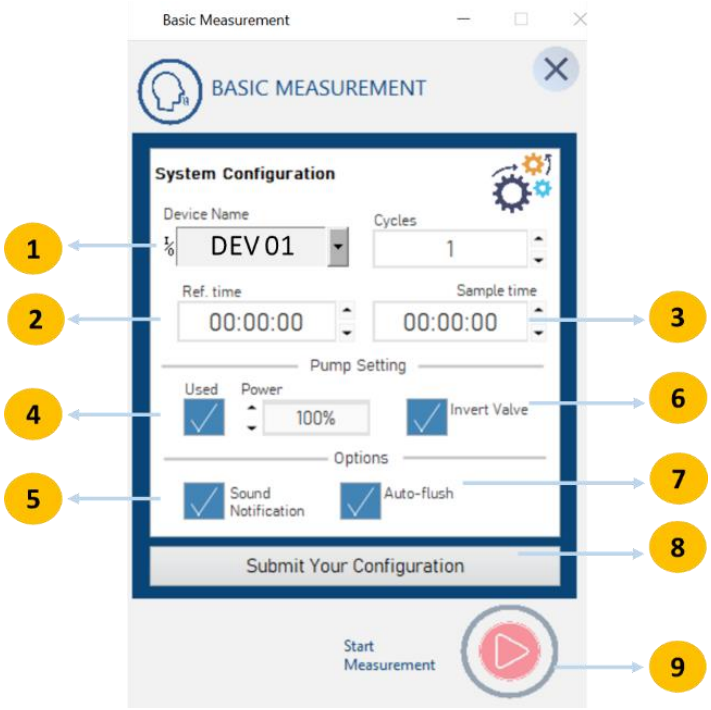
ODORA Analytics

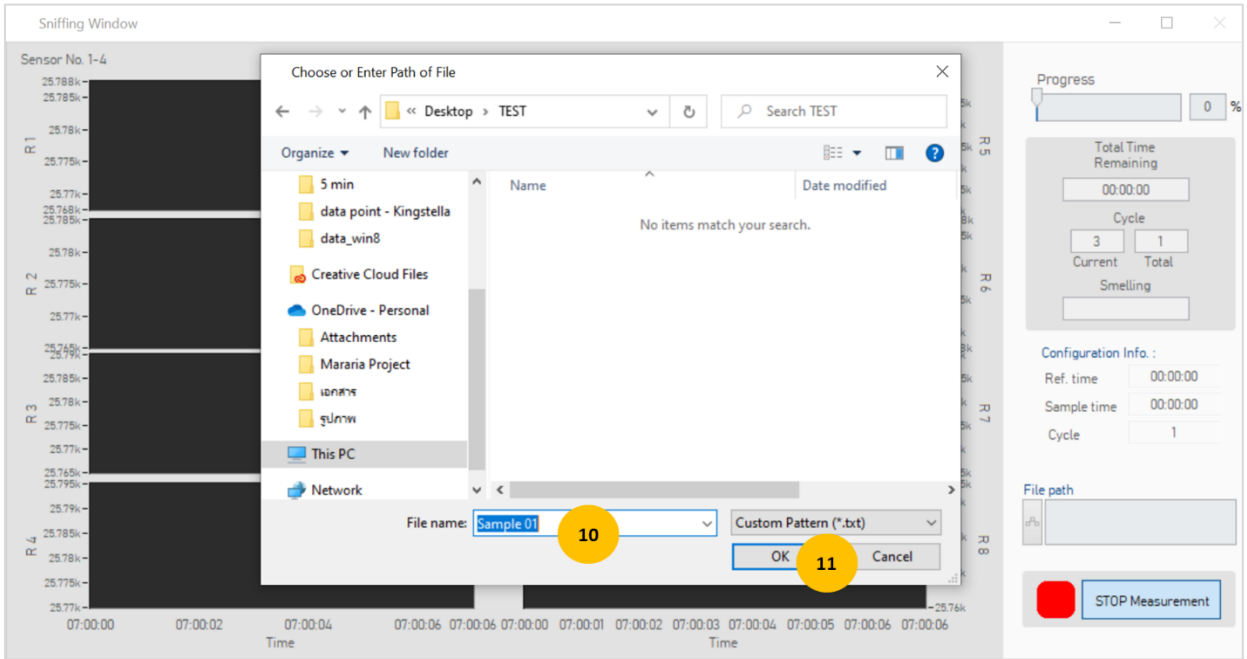


ODORA Measurement	ODORA Analytics
1. หน้าตาสำหรับการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการตรวจวัด (Basic Measurement)	1. ฟังก์ชันสำหรับเรียกดูไฟล์ย้อนหลัง (Raw File)
	2. วิเคราะห์ผลด้วย Sensing response
	3. วิเคราะห์ผลด้วย Principal Component Analysis
2. Quality Check Function	4. วิเคราะห์ผลด้วย Smell Comparison
	5. Machine Learning
	6. hierarchical clustering analysis

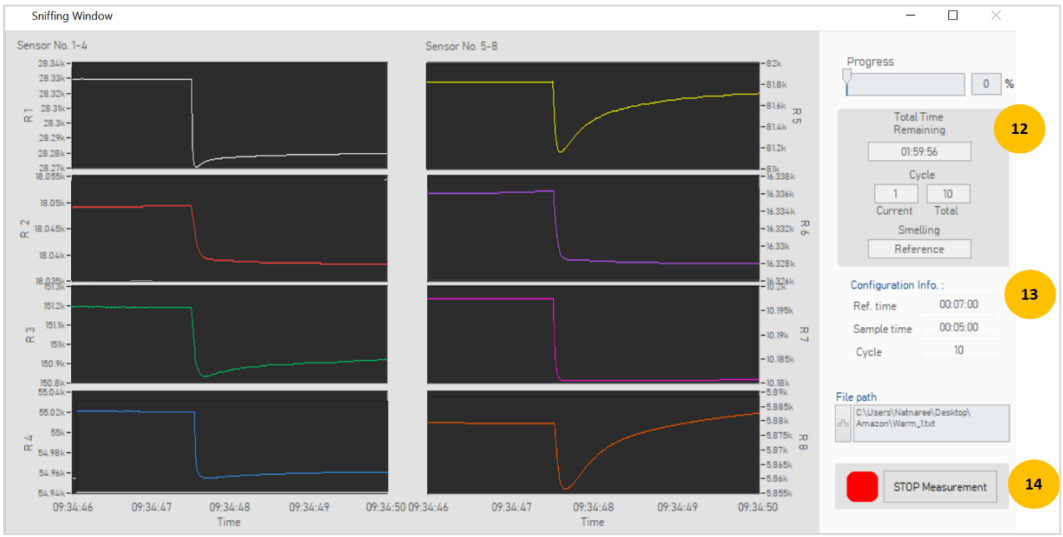
3.3.3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ สำหรับการตรวจวัด

1. ทำได้โดยการเลือกเมนู Measurement และทำการตั้งค่าดังขั้นตอนดังนี้





2. หน้าต่างแสดงสัญญาณการตรวจวัด ในหน้าต่างนี้จะแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ตั้งค่าไว้ทั้งหมดและแสดงสัญญาณแบบ Real-Time ของค่าที่ sensor ทั้ง 8 ชนิด รอจนเครื่องทำงานเสร็จ หน้าต่างจะปิดอัตโนมัติ



หมายเลข 1 เลือก Device name

หมายเลข 2 ตั้งเวลา Reference time

หมายเลข 3 ตั้งเวลา Sample time

หมายเลข 4 ปุ่มเปิด/ปิด ปั๊ม

หมายเลข 5 คลิก Sound notification

หมายเลข 6 คลิก inverse valve

หมายเลข 7 คลิก Auto flush

หมายเลข 8 คลิก Submit your notification

หมายเลข 9 คลิก Start Measurement

หมายเลข 10 ตั้งชื่อไฟล์ (เป็นภาษาอังกฤษ และตัวเลข)

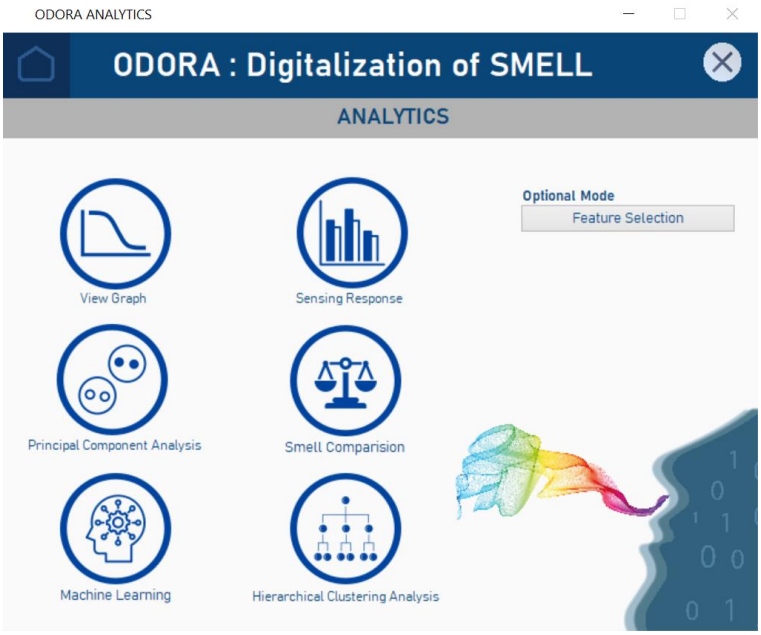
หมายเลข 11 คลิก OK

หมายเลข 12 หน้าจอแสดงผล ซึ่งแสดงระยะเวลาที่เหลือขณะรันตัวอย่าง

หมายเลข 13 หน้าจอแสดงผล ซึ่งแสดงพารามิเตอร์ที่ตั้งค่าไว้

หมายเลข 14 ปุ่มหยุดการตรวจวัดตัวอย่าง (Stop Measurement)

3.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย ODORA Analytics



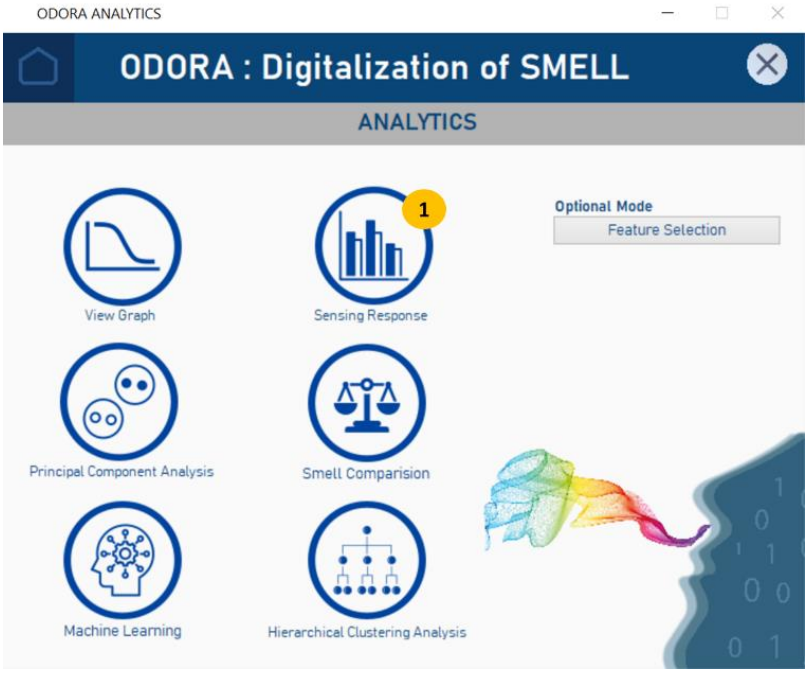
ODORA Analytics เป็นโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

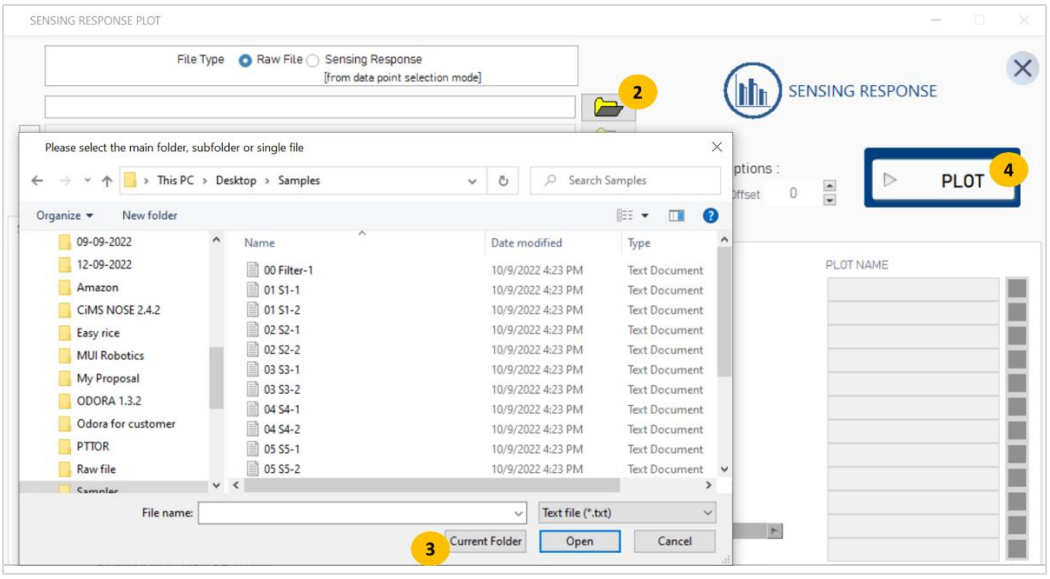
ซึ่งสามารถเลือกวิเคราะห์ได้ 3 รูปแบบ คือ

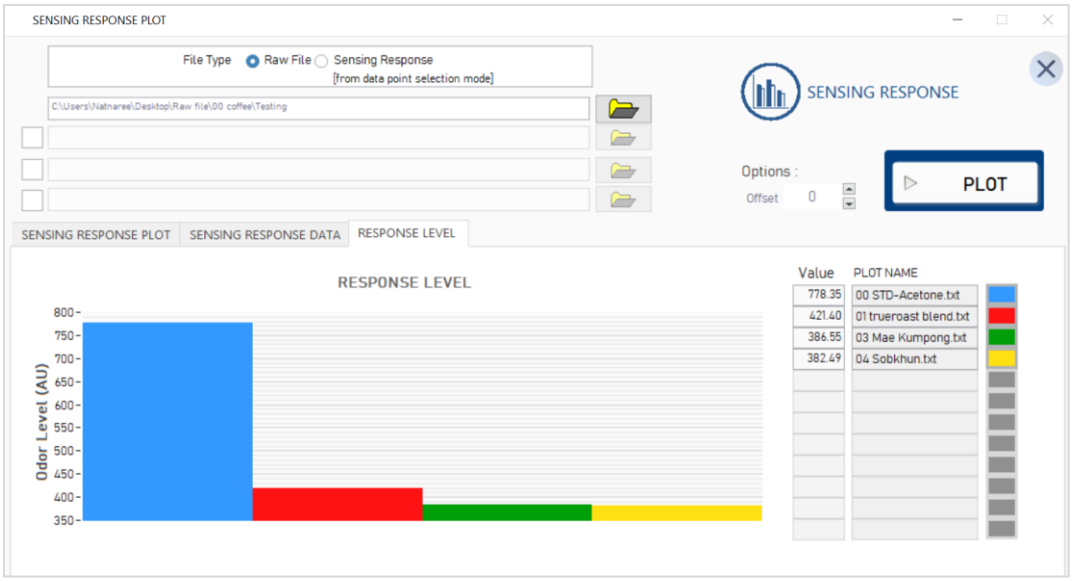
1. Sensing response
2. Principal Components Analysis (PCA)
3. Smell Comparison

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Sensing response

1. การเลือกวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ Sensing response มีขั้นตอนดังนี้







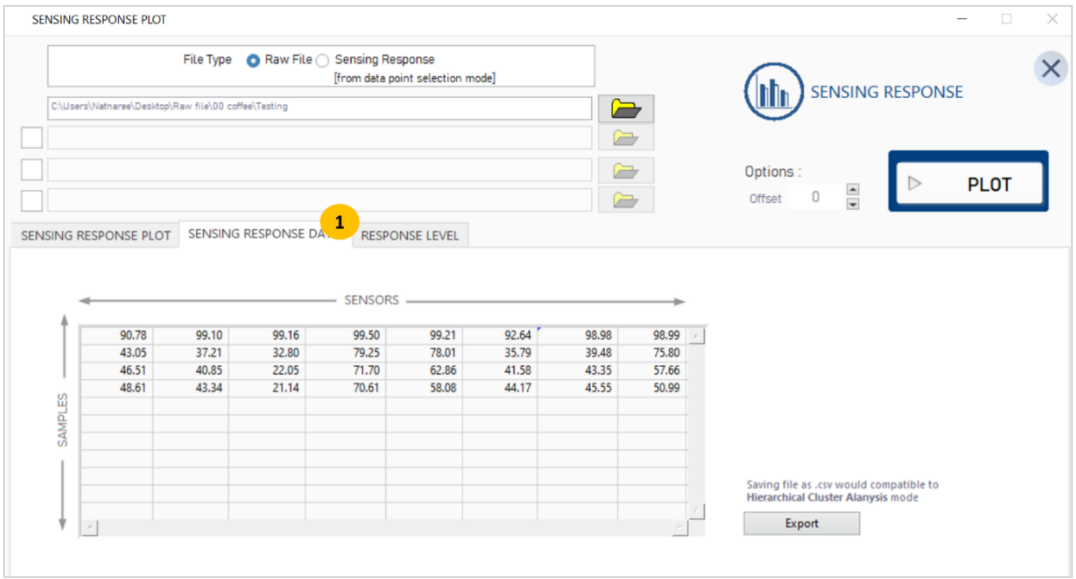
หมายเลข 1 คลิกเลือกไอคอน Sensing response สำหรับเปิดไฟล์ข้อมูลที่ต้องการวิเคราะห์

หมายเลข 2 เลือกเพิ่มไฟล์

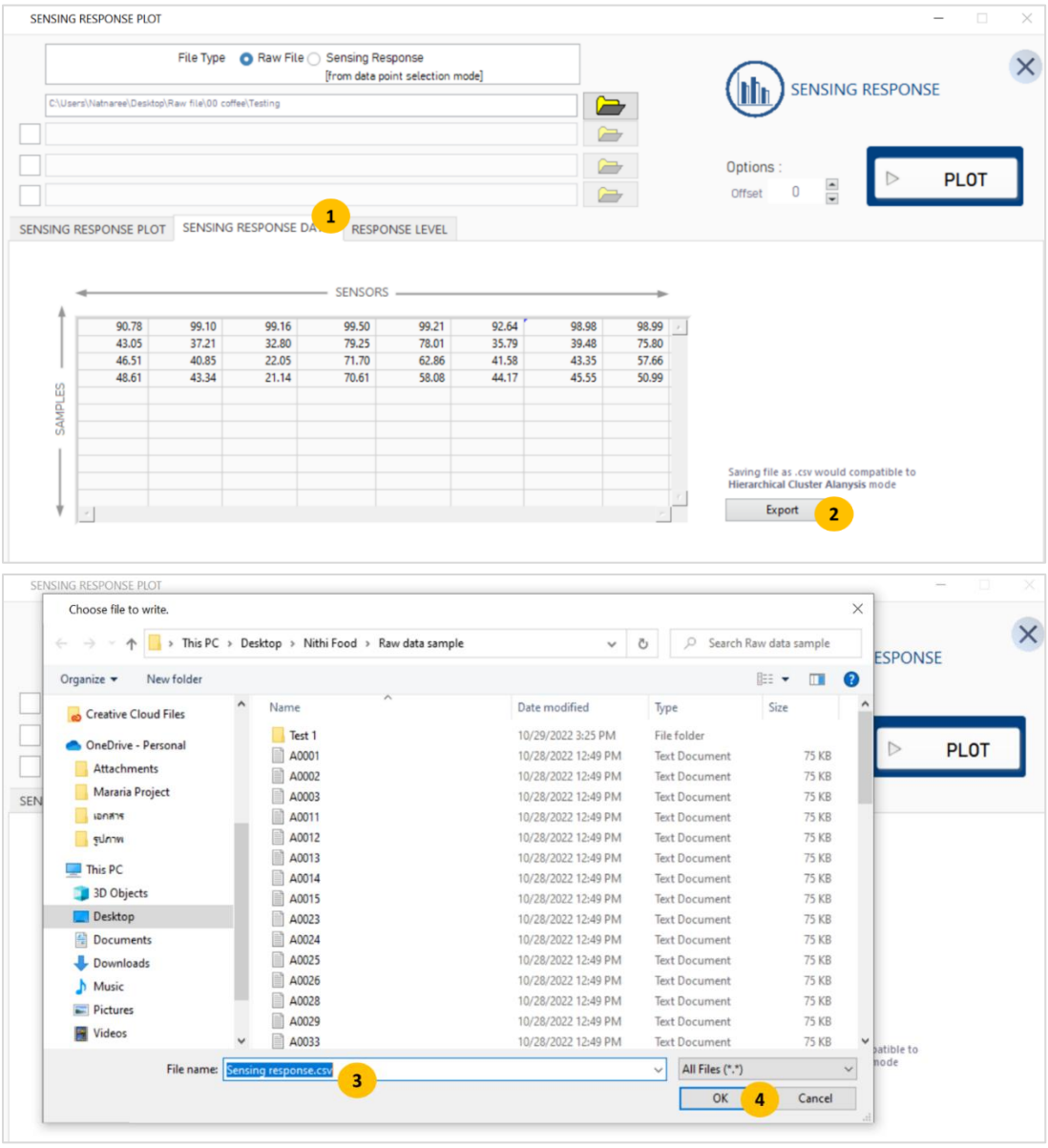
หมายเลข 3 คลิก Current Folder

หมายเลข 4 คลิก Plot โปรแกรมจะแสดงหน้าต่างผลการวิเคราะห์แบบ Sensing Response

2. สามารถเลือกดูไฟล์ตัวเลขของข้อมูล Sensing Response ได้ โดยค่าเปอร์เซ็นต์ Sensing Response จะแสดงตามลำดับเซนเซอร์จากซ้ายไปขวา และเรียงลำดับข้อมูลของไฟล์ที่เลือกไว้จากบนลงล่าง โดย SENSORS แสดงถึงเซนเซอร์ลำดับที่ 1-8 และ SAMPLES แสดงถึงข้อมูลไฟล์ที่เลือกวิเคราะห์



3. สามารถ Export ข้อมูล Sensing response เพื่อนำไปใช้ในการนำเสนอข้อมูลในรูปแบบอื่นๆ ตามขั้นตอนดังนี้



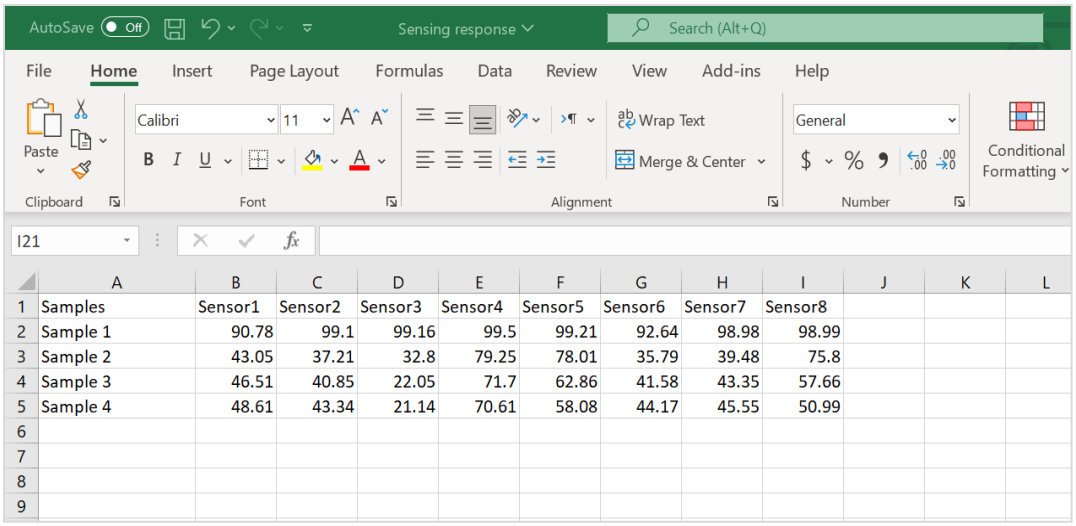
หมายเลข 1 เลือก Sensing response Data

หมายเลข 2 คลิก Export

หมายเลข 3 เลือกตำแหน่งที่จะบันทึกไฟล์ ตั้งชื่อไฟล์ และบันทึกเป็นสกุล .csv

ตัวอย่างเช่น Sensing response data.csv

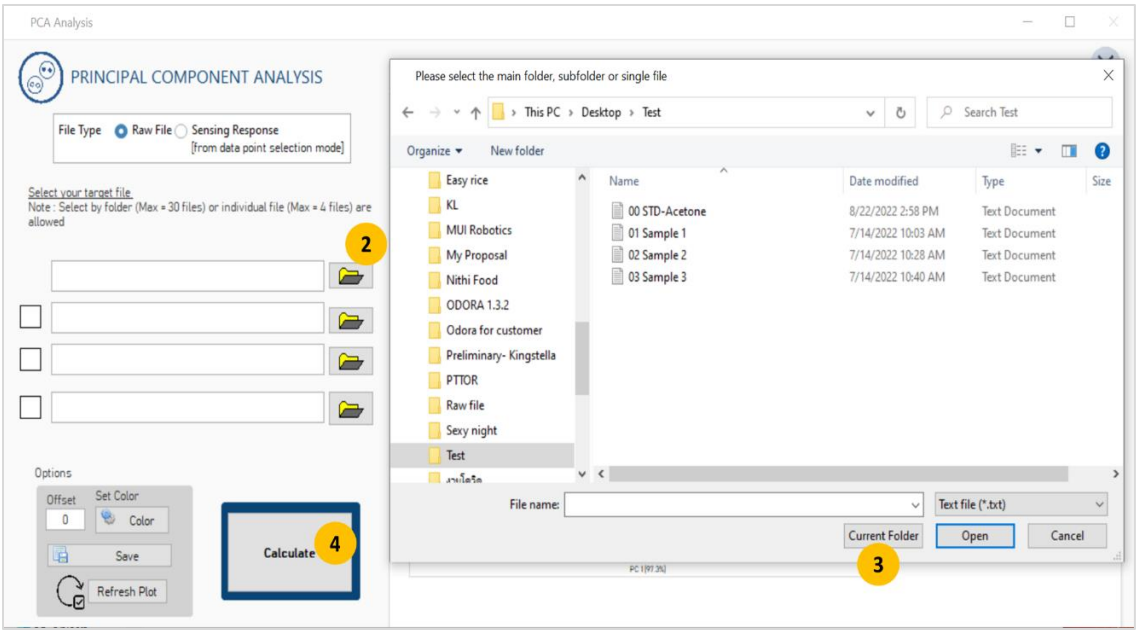
หมายเลข 4 คลิก OK เพื่อบันทึกไฟล์ และข้อมูลจะถูกแสดงไปยังหน้า Excel ดังนี้



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Samples	Sensor1	Sensor2	Sensor3	Sensor4	Sensor5	Sensor6	Sensor7	Sensor8			
2	Sample 1	90.78	99.1	99.16	99.5	99.21	92.64	98.98	98.99			
3	Sample 2	43.05	37.21	32.8	79.25	78.01	35.79	39.48	75.8			
4	Sample 3	46.51	40.85	22.05	71.7	62.86	41.58	43.35	57.66			
5	Sample 4	48.61	43.34	21.14	70.61	58.08	44.17	45.55	50.99			
6												
7												
8												
9												

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี Principal component analysis (PCA)

การเลือกวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการ PCA มีขั้นตอนดังนี้



หมายเลข 1 เลือกไอคอน Principal component analysis

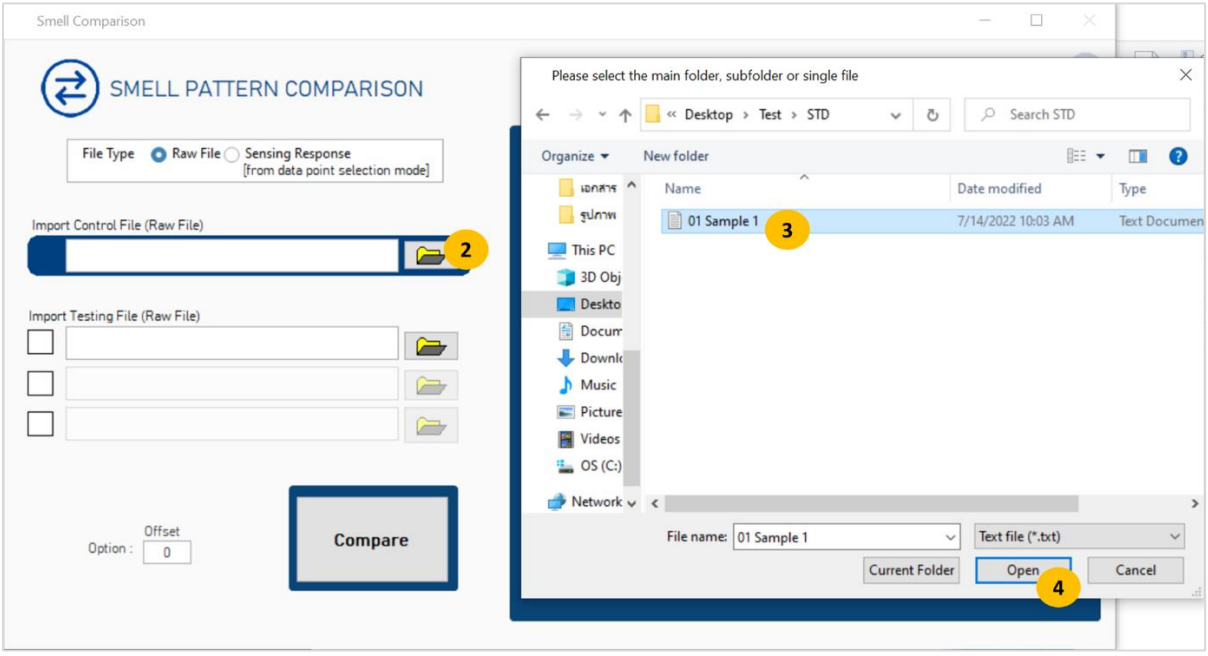
หมายเลข 2 คลิกเพื่อเลือกไฟล์ที่ต้องการวิเคราะห์

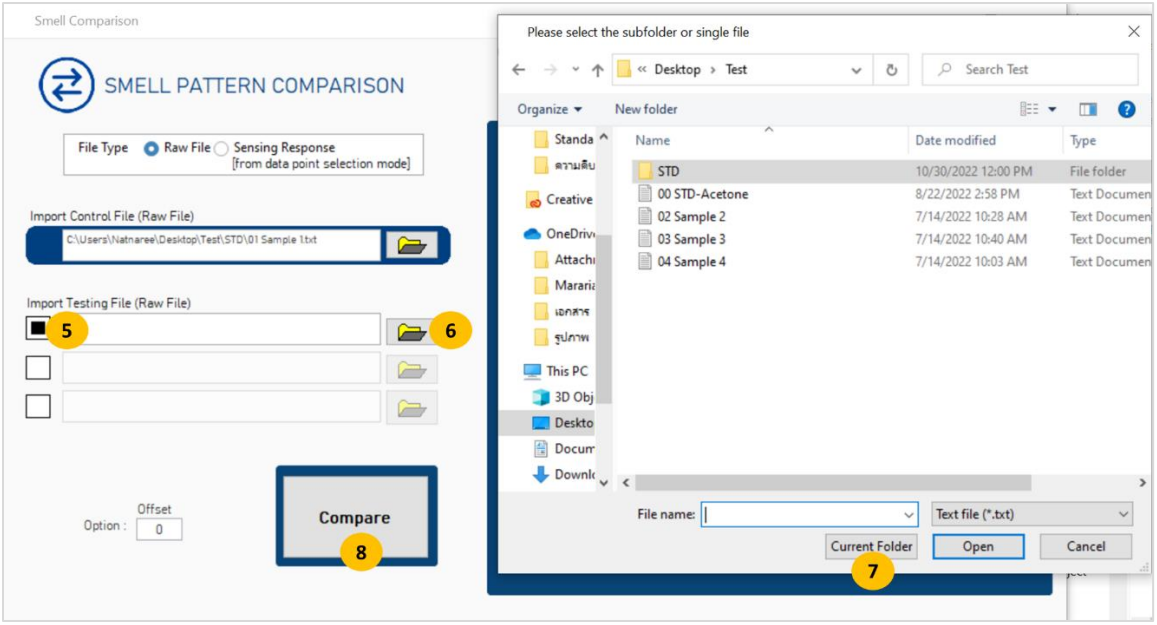
หมายเลข 3 คลิก Current Folder

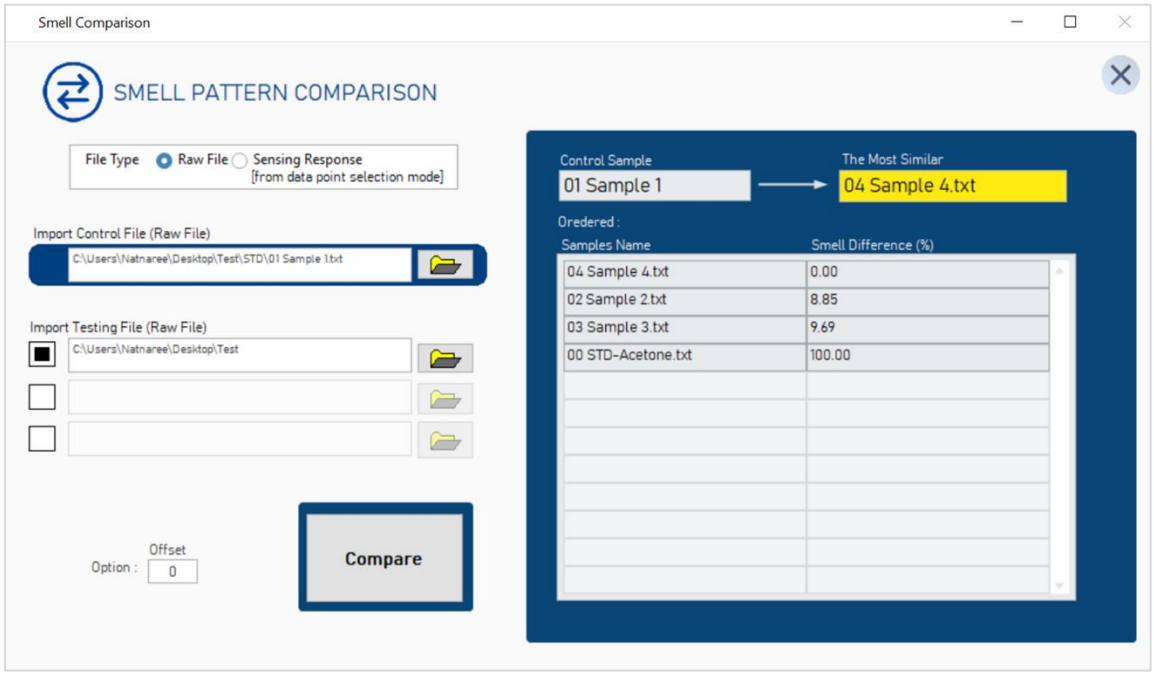
หมายเลข 4 คลิก Calculate

หมายเลข 5 แสดงหน้าต่างผลการวิเคราะห์ด้วย PCA หรือ แผนที่กลิ่น ซึ่งจะแสดงขึ้นในลักษณะ 2 มิติ โดยสามารถคลิกตัวเลขของสเกล เพื่อปรับสเกลในแนวแกน PC1 และ PC2 ได้

3.2.7 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของกลิ่น (Smell comparison)







หมายเลข 1 เลือกไอคอน Smell comparison

หมายเลข 2 คลิกเพื่อเลือกไฟล์ Control

หมายเลข 3 เลือกไฟล์ Control

หมายเลข 4 คลิก Open

หมายเลข 5 คลิกเพื่อจะทำการเลือกไฟล์

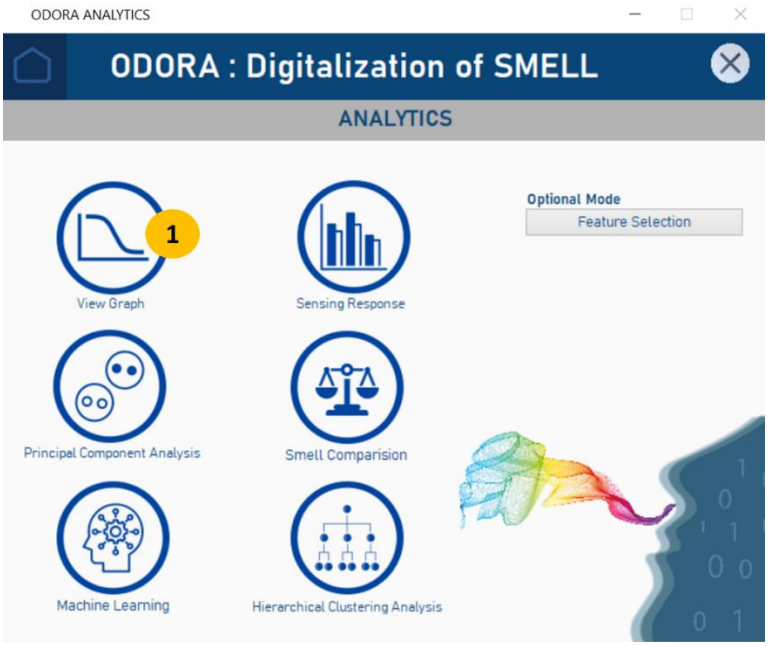
หมายเลข 6 เลือกไฟล์ที่ต้องการนำวิเคราะห์ หรือเปรียบเทียบความแตกต่างกับตัว Control

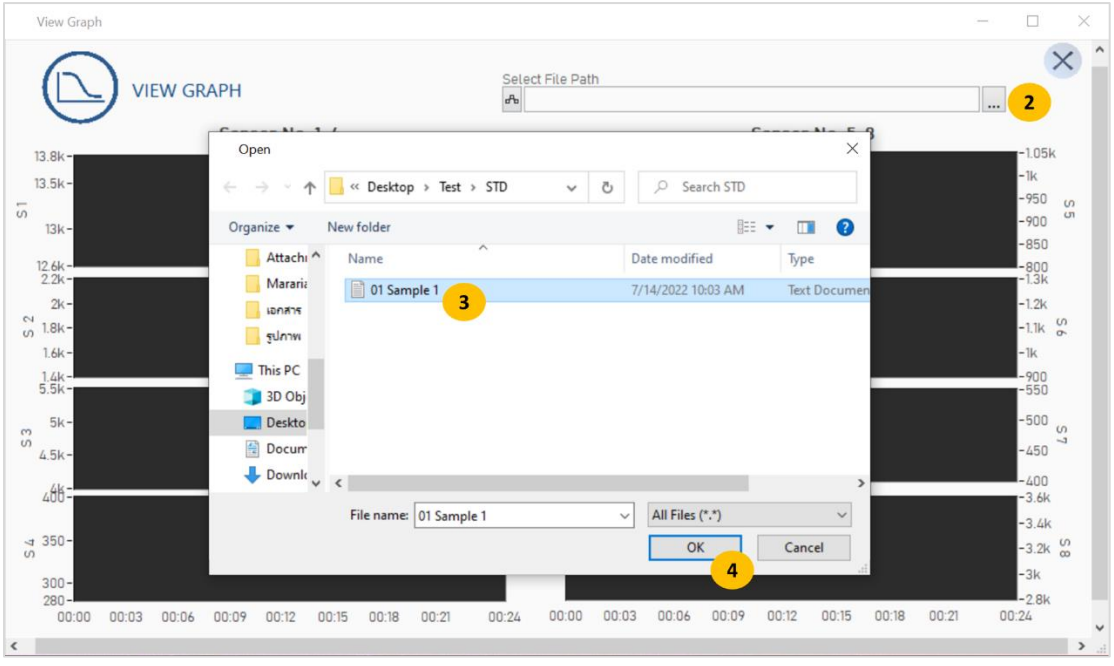
หมายเลข 7 คลิก Current Folder

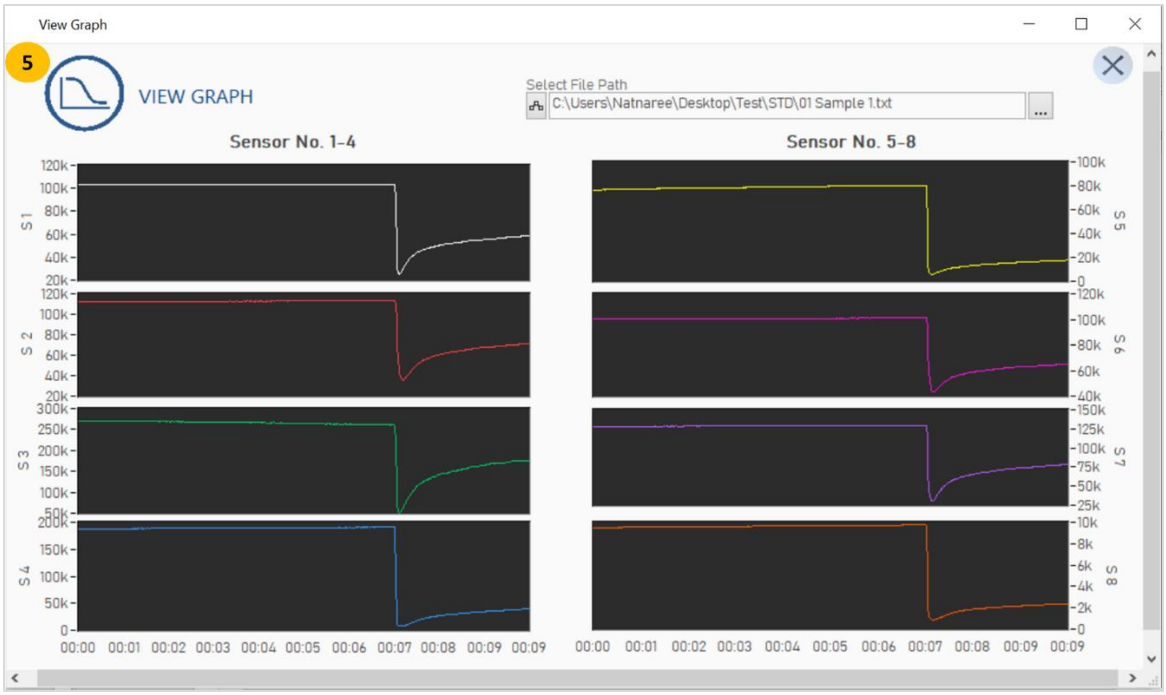
หมายเลข 8 คลิก Compare

3.2.6 การเปิดดูไฟล์การตรวจวัดย้อนหลัง

เปิดไฟล์การตรวจวัด สามารถทำตามขั้นตอนได้ดังนี้







หมายเลข 1 เลือกไอคอน View Graph

หมายเลข 2 เลือกไฟล์ที่ต้องการดูลักษณะสัญญาณ

หมายเลข 3 คลิก OK เพื่อเปิดดูไฟล์

หมายเลข 4 คลิก Calculate

หมายเลข 5 โปรแกรมจะแสดงลักษณะสัญญาณของทั้ง 8 เซนเซอร์

4. พารามิเตอร์สำหรับการตรวจวัดกลิ่นด้วย E-nose

ตารางแสดงพารามิเตอร์ที่ใช้และปรับในการทดลองกลิ่นของตัวอย่าง

E-Nose condition	คำอธิบาย	หน่วย	ตัวอย่าง 1	ตัวอย่าง 2	ตัวอย่าง n
Flow rate	อัตราการไหล	Liter/min.			
Pump (ON/OFF)	ปั๊ม (ON/OFF)	%			
Reference time	ระยะเวลาวัดกลิ่นอากาศบริสุทธิ์	Second			
Sample time	ระยะเวลาวัดกลิ่นตัวอย่าง	Second			
Number of trial cycles	จำนวนรอบ	Cycle			
Sample condition					
Sample state	สถานะตัวอย่าง	Solid/liquid/gas			
Sample Amount	ปริมาณตัวอย่าง	gram or ml.			
Sample dimension (LxWxH)	ขนาดตัวอย่าง	cm.			
Distance between sample and tube end	ระยะห่างระหว่างตัวอย่างและปลายท่อ	cm.			
Temperature of Sample	อุณหภูมิของตัวอย่าง	°C			
Humidity	ความชื้น	%			

หมายเหตุ:

ควรควบคุมพารามิเตอร์เหล่านี้ให้เท่ากันสำหรับการทดลองของตัวอย่างที่ต้องการเปรียบเทียบเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องที่สุด

5. การบำรุงรักษา

5.1 การเก็บเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์

หลังจากใช้งานเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์เสร็จแล้วผู้ใช้ควรเก็บเครื่องให้เรียบร้อยโดยทำตามขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดระบบท่อ และแชมเบอร์ของเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์โดยการเปิดให้เครื่องทำงานในอากาศสะอาดประมาณ 30 นาที เพื่อกำจัดกลิ่นตกค้างในระบบ
2. ปิดสวิซต์ ถอดสายสัณญาณออกจากคอมพิวเตอร์ และถอดสายไฟเก็บให้เรียบร้อย
3. ควรวางเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ใน**แนวนอน** ไม่ควรเก็บในบริเวณที่มีความชื้นหรืออุณหภูมิสูง เพราะอาจทำให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในขัดข้องได้ ทำให้เครื่องเกิดความเสียหาย หรือมีอายุการใช้งานสั้นลง)

5.2 การทำความสะอาดระบบไหลเวียนอากาศ

หลังการใช้งานเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ทุกครั้งผู้ใช้ควรทำความสะอาดระบบไหลเวียนแก๊สภายในเครื่องเพื่อป้องกันกรณีที่อาจมีสารหรือแก๊สตกค้างในระบบ เช่นบริเวณวาล์ว ปั้ม หรือในท่อ โดยการทำความสะอาดระบบไหลเวียนอากาศภายในเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ผู้ใช้สามารถปฏิบัติตามขั้นตอน ดังนี้

1. นำเครื่องจมูกอิเล็กทรอนิกส์ไปวางไว้ในที่ที่มีอากาศสะอาด
2. เปิดโปรแกรม Electronic Nose Machine และทำการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับทำความสะอาดระบบในเมนู Config ดังนี้
    - Reference Time: 15 นาที
    - Sample Time: 15 นาที
    - Power: 100%
3. สั่ง Run โปรแกรม และรอจนเครื่องทำงานเสร็จ