



การสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายเพื่อใช้ศึกษาผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi 6 ต่อเซลล์
มนุษย์

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF CO₂ INCUBATOR TO STUDY THE EFFECT OF WI-
FI 6 SIGNALS ON HUMAN CELLS

สุกัลป์ วัฒนอลอสมนบุญ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565

การสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายเพื่อใช้ศึกษาผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi 6 ต่อ
เซลล์มนุษย์



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF CO₂ INCUBATOR TO STUDY THE EFFECT OF WI-
FI 6 SIGNALS ON HUMAN CELLS



SUGUN WATTANALAORSOMBOON

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF ENGINEERING
(Electrical Engineering)

Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายเพื่อใช้ศึกษาผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi 6 ต่อเซลล์

มนุษย์

ของ

สุกัลป์ วัฒนอลอสมบุญ

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน

(รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์)

(ศาสตราจารย์ ดร.ยุทธนา ขำสุวรรณ)

..... ที่ปรึกษาร่วม

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา ธเนศพงษ์ธรรม)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิศร์ มาตรา)

ชื่อเรื่อง	การสร้างเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายเพื่อใช้ศึกษาผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi 6 ต่อเซลล์มนุษย์
ผู้วิจัย	สุกัลป์ วัฒนลออสมบุญ
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร. วลัยยา ฐเนศพงศัทรธรรม

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายเพื่อใช้ศึกษาผลกระทบของสัญญาณวายฟาย 6 ต่อเซลล์มนุษย์ โดยแบ่งเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกนำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบต้นแบบและแบบปรับปรุงที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ตามที่ต้องการ ติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟาย 6 ไว้ภายในได้และมีซีลด์ลดทอนสัญญาณวายฟาย ผลการทดสอบซีลด์สามารถลดทอนสัญญาณได้ 10 และ 14 เดซิเบล ในย่านความถี่ 2.4 และ 5 กิกะเฮิรตซ์ตามลำดับ ระบบทำความเย็นในเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุงเพื่อลดอุณหภูมิของอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟายไม่ให้อุณหภูมิเพาะเลี้ยงเซลล์ จากผลการทดสอบอุณหภูมิพบว่าสามารถควบคุมอุณหภูมิไม่ให้อุณหภูมิเพาะเลี้ยงเซลล์ได้ ยืนยันประสิทธิภาพการเพาะเลี้ยงเซลล์ด้วยการเลี้ยงเซลล์ผิวหนึ่งของมนุษย์ (WS-1) หาเปอร์เซ็นต์ความมีชีวิตรอดของเซลล์ด้วยวิธี MTT assay และสัญญาณวิทยาของเซลล์ นำไปเปรียบเทียบกับเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน ผลที่ได้จากเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ทั้งในแบบต้นแบบและแบบปรับปรุงนั้น มีความใกล้เคียงกับผลที่ได้จากเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน จึงนำไปใช้ทดลองในส่วนที่ 2 คือ การศึกษาผลกระทบของสัญญาณวายฟาย 6 ต่อเซลล์มนุษย์ โดยทำการเลี้ยงเซลล์ผิวหนึ่งของมนุษย์ (WS-1) ภายใต้สัญญาณวายฟาย 6 เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หาเปอร์เซ็นต์ความมีชีวิตรอดของเซลล์ด้วยวิธี MTT assay และการตายของเซลล์จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงปกติและแบบฟลูออเรสเซนส์เปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับสัญญาณวายฟาย 6 ผลแสดงให้เห็นว่าสัญญาณวายฟาย 6 ไม่ส่งผลกระทบต่อเซลล์ผิวหนึ่งของมนุษย์ (WS-1) ในระยะเวลา 24 48 และ 72 ชั่วโมง

คำสำคัญ : เครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์, วายฟาย 6, เซลล์ผิวหนึ่งของมนุษย์, WS-1

Title	DESIGN AND IMPLEMENTATION OF CO ₂ INCUBATOR TO STUDY THE EFFECT OF WI-FI 6 SIGNALS ON HUMAN CELLS
Author	SUGUN WATTANALAORSOMBOON
Degree	MASTER OF ENGINEERING
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Associate Professor Vuttipon Tarateeraseth , Ph.D.
Co Advisor	Associate Professor Wanlaya Tanechpongamb , Ph.D.

This thesis proposes the design and implementation of the CO₂ incubator to study the effect of Wi-Fi 6 signals on human cells. The thesis is divided into two parts. The first part proposes the design and implementation of a CO₂ incubator prototype and improved versions can maintain the desired temperature and CO₂ levels with Wi-Fi 6 access point where the shield is installed inside the incubator. The experimental results revealed that both incubators can maintain the desired temperature and CO₂ levels, and the implemented shielding can reduce unintentional Wi-Fi signal levels in 2.4 GHz to 10 dB and 5 GHz to 14 dB, respectively. In addition, the improved version with the cooling system to reduce Wi-Fi access point temperature can reduce the Wi-Fi access point's temperature to 33 C°. To verify the performance of the proposed incubators, the epidermal cell (WS-1) is cultured in the standard and both proposed incubators for 24 hrs. Then the cell viability by MTT assay is analyzed and observed by microscope for cell morphology. In terms of the culturing results, it shows a good agreement between standard and proposed incubators in terms of culturing cells. For the effect of Wi-Fi signals on human cells, the epidermal cell (WS-1) is cultured under Wi-Fi 6 signal exposure for 24, 48 and 72 hrs. The results of cell viability and cell morphology are compared between control and treated groups. It found that epidermal cell (WS-1) has no significant effects on Wi-Fi 6 signal exposure for 24, 48 and 72 hrs.

Keyword : Incubator, Wi-Fi 6, Human skin cell, WS-1

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.วุฒิพล ธาราธิโรเศรษฐ์ สำหรับความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้รวมถึงให้คำชี้แนะ คำปรึกษาด้านต่างๆทั้งในเรื่องการศึกษา การทำปริญญานิพนธ์และอุปสรรคต่างๆตลอดการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต และ ขอขอบคุณ รศ.ดร.วัลยา ทัศนพงศ์ธรรม สำหรับความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงให้ความรู้คำแนะนำและช่วยเหลือในศาสตร์ที่ผู้วิจัยไม่ถนัดตลอดการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต ซึ่งสิ่งเหล่านี้หล่อหลอมให้ผู้วิจัยสามารถสำเร็จการทำปริญญานิพนธ์ได้เป็นพระคุณอย่างสูง

ขอขอบคุณ ดร. ศักดิพงศ์ พันธุ์ไผ่ ที่สละเวลาให้ข้อมูล ความรู้ คำแนะนำ และความช่วยเหลือด้านการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ในศาสตร์ที่ผู้วิจัยไม่ถนัด จนทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์บุคลากร ในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์และภาควิชาชีวเคมี คณะแพทยศาสตร์ ที่ให้ความรู้และ ให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่ในการทำปริญญานิพนธ์รวมถึงเอกสารต่างๆที่จำเป็นสำหรับมหาบัณฑิต

ขอขอบคุณนางสาววริษา แซ่ตั้ง และนางสาวกุลนันท์ หาญธรรม สำหรับความร่วมมือในการช่วยมีส่วนร่วมสร้างอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย และขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆในภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคนอื่นที่ไม่ได้กล่าวนามมา ณ ที่นี้สำหรับกำลังใจและคำปรึกษาด้านต่างๆ ตลอดการศึกษาในระดับมหาบัณฑิต

สุกัลป์ วัฒนลออสมบุญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1. ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
3. ขอบเขตของงานวิจัย	2
4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
1. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
1.1 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	4
1.2 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	6
2. สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย	7
2.1 ความเป็นมาอุปกรณ์การกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย.....	8
2.2 มาตรฐาน IEEE 802.11	9
3. การชิลด์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน	11
3.1 สนามระยะใกล้ และสนามระยะไกล	11
3.2 ลักษณะเฉพาะ และอิมพีแดนซ์ของคลื่น	12

3.3 ประสิทธิภาพการซีลด์	13
3.3.1 สูญเสียจากการดูดซับของวัสดุ.....	13
3.3.2 สูญเสียจากการสะท้อน	13
4. เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ (CO ₂ incubator).....	14
5. เซลล์.....	15
5.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์	15
5.1.1 ทฤษฎีเซลล์.....	15
5.1.2 ชนิดของเซลล์	16
5.2 การแบ่งเซลล์.....	18
5.2.1 การแบ่งตัวของนิวเคลียส (karyokinesis)	18
5.2.1.1 การแบ่งตัวของนิวเคลียสแบบไมโทซิส (mitosis).....	18
5.2.1.2 การแบ่งตัวของนิวเคลียสแบบไมโอซิส (meiosis)	20
5.2.2 การแบ่งตัวของไซโทพลาซึม (cytokinesis)	22
5.3 การตายของเซลล์.....	24
5.3.1 การตายแบบนิโครซิส (Necrosis)	24
5.3.2 การตายแบบอะพอพโทซิส (apoptosis)	25
5.4 วิธีการเพาะเลี้ยงเซลล์หรือเนื้อเยื่อ	26
5.5 เครื่องมือ และอุปกรณ์พื้นฐานในการเพาะเลี้ยงเซลล์	28
5.6 สัณฐานวิทยาของเซลล์.....	31
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์	34
6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของสัญญาณวายฟาย.....	34
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	37

1. การออกแบบเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	38
1.1 แผนผังการทำงานของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	38
1.2 การทำงานอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	41
1.3 วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	44
1.4 การออกแบบโครงสร้าง.....	46
1.4.1 แบบต้นแบบ.....	46
1.4.2 แบบปรับปรุง.....	49
1.5 การออกแบบซีลด์ลดทอนสัญญาณภายในเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	54
2. การออกแบบการติดตั้งเครื่องกระจายสัญญาณ Wi-Fi.....	55
2.1 อุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi 6.....	55
2.2 การติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณภายในเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	57
3. ออกแบบการทดสอบเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	58
3.1 การทดสอบส่วนที่ใช้ปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	58
3.1.1 อุณหภูมิ ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	58
3.1.2 การทดสอบการเพาะเลี้ยงเซลล์.....	58
1. การเตรียมเซลล์สำหรับการทดสอบปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	58
2. MTT Assay.....	65
3. การเลี้ยงเซลล์เปรียบเทียบกับเครื่องแบบมาตรฐาน.....	66
3.2 การทดสอบซีลด์ลดทอนสัญญาณ.....	66
3.3 การทดสอบระบบทำความเย็น.....	67
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย.....	68
4.1 การทดสอบส่วนที่ใช้ปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	68
4.1.1 แบบต้นแบบ.....	68

1. ระดับอุณหภูมิ	68
2. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	68
3. การเพาะเลี้ยงเซลล์.....	69
4.1.2 แบบปรับปรุง	71
1. ระดับอุณหภูมิ	71
2. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	71
3. การเพาะเลี้ยงเซลล์.....	72
4.2 การทดสอบซีลด์ลดทอนสัญญาณ.....	74
4.3 การทดสอบระบบทำความเย็น.....	77
4.4 การทดลองศึกษาผลกระทบของสัญญาณวายฟายต่อเซลล์มนุษย์.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	80
สรุปผลการดำเนินงาน.....	80
ข้อเสนอแนะ	81
บรรณานุกรม	82
ภาคผนวก.....	84
ประวัติผู้เขียน.....	92

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 ตารางมาตรฐาน IEEE802.11 ของเครือข่ายไร้สาย	11
ตาราง 2 วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์	44
ตาราง 3 คุณสมบัติทางเทคนิค Access point ยี่ห้อ Huawei™ รุ่น AP7060DN.....	55
ตาราง 4 คุณลักษณะของเซลล์ผิวหนัง WS-1	59
ตาราง 5 ชุดคำสั่งโปรแกรม Arduino ควบคุมการทำงานของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	85



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้งาน.....	5
ภาพประกอบ 2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทต่างๆ.....	6
ภาพประกอบ 3 ตราสัญลักษณ์ Wi-Fi ผ่านการรับรองความเข้ากันได้ของผลิตภัณฑ์.....	9
ภาพประกอบ 4 ตัวอย่างเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน.....	15
ภาพประกอบ 5 เซลล์โพคาริโอต.....	16
ภาพประกอบ 6 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์สัตว์.....	17
ภาพประกอบ 7 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์พืช.....	17
ภาพประกอบ 8 วัฏจักรของเซลล์.....	19
ภาพประกอบ 9 การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส.....	22
ภาพประกอบ 10 การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส และแบบไมโทซิส.....	23
ภาพประกอบ 11 การเกิดร่องแบ่งในเซลล์สัตว์.....	23
ภาพประกอบ 12 การตายแบบนิโครซิส.....	25
ภาพประกอบ 13 การตายของเซลล์แบบอะพอพโทซิส และแบบนิโครซิส.....	26
ภาพประกอบ 14 การเพาะเลี้ยงเซลล์ภายในเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	27
ภาพประกอบ 15 ตู้ปลอดเชื้อ.....	28
ภาพประกอบ 16 เครื่องปั่นเหวี่ยง.....	29
ภาพประกอบ 17 เครื่องปั๊มเซลล์เพาะเลี้ยง.....	29
ภาพประกอบ 18 กล้องจุลทรรศน์.....	30
ภาพประกอบ 19 ภาชนะที่ใช้เลี้ยงเซลล์.....	30
ภาพประกอบ 20 ออโตปิเปต.....	31
ภาพประกอบ 21 หลอดไมโครเซ็นติฟิวจ์.....	31

ภาพประกอบ 22 เซลล์รูปกระสวย (fibroblast-like cells)	32
ภาพประกอบ 23 เซลล์เยื่อบุผิว (epithelial-like cells)	33
ภาพประกอบ 24 เซลล์ชนิดทรงกลม (lymphoblast – like cells).....	33
ภาพประกอบ 25 แผนผังการทำงานโดยรวมของของงานวิจัย	37
ภาพประกอบ 26 แผนผังการทำงานของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์	38
ภาพประกอบ 27 แผนผังการทำงานของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ (ต่อ)	39
ภาพประกอบ 28 วงจรควบคุมพัลลัม.....	41
ภาพประกอบ 29 การเชื่อมต่อวงจรเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	41
ภาพประกอบ 30 วงจรเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	42
ภาพประกอบ 31 วงจรควบคุมแผ่นทำความร้อน	42
ภาพประกอบ 32 วงจรควบคุมโซลินอยด์	43
ภาพประกอบ 33 วงจรแสดงผลแอลซีดี.....	43
ภาพประกอบ 34 การออกแบบขนาดของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์	47
ภาพประกอบ 35 แบบจำลองเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์	47
ภาพประกอบ 36 ภายในส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์	48
ภาพประกอบ 37 ส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์(ส่วนบน).....	48
ภาพประกอบ 38 การออกแบบขนาดของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์	49
ภาพประกอบ 39 ภาพตัดขวางแบบจำลองเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์.....	50
ภาพประกอบ 40 แบบจำลองโดยรวมของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายแบบปรับปรุง.....	50
ภาพประกอบ 41 ชิ้นงานจริงส่วนแผงวงจรควบคุมการทำงานอุปกรณ์ทั้งหมด	51
ภาพประกอบ 42 ชิ้นงานจริงส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์และการติดตั้งตัวกระจายสัญญาณ อินเทอร์เน็ทแบบไร้สาย.....	51
ภาพประกอบ 43 ชิ้นงานจริงส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์และการติดตั้งตัวกระจายสัญญาณ อินเทอร์เน็ทแบบไร้สาย.....	52

ภาพประกอบ 44 ส่วนด้านบนและด้านล่างของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์	52
ภาพประกอบ 45 การติดตั้ง เซ็นเซอร์ ระบบทำความร้อน และหมุ่นเวียนอากาศ ของฉากกัน	53
ภาพประกอบ 46 ภาพรวมระบบทำความเย็น.....	54
ภาพประกอบ 47 การออกแบบซีลด์ด้วยแผ่นอลูมิเนียม.....	54
ภาพประกอบ 48 Access point ยี่ห้อ Huawei™ รุ่น AP7060DN.....	55
ภาพประกอบ 49 การวางอุปกรณ์กระจายสัญญาณ	58
ภาพประกอบ 50 การนำเซลล์ออกจากที่จัดเก็บ.....	60
ภาพประกอบ 51 การละลายเซลล์จากสภาวะแช่แข็ง.....	60
ภาพประกอบ 52 รูปจำลองการลงเซลล์เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยง.....	61
ภาพประกอบ 53 การปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตกตะกอนเซลล์	61
ภาพประกอบ 54 รูปขณะทำการนับจำนวนเซลล์.....	63
ภาพประกอบ 55 รูปการส่อง Hemocytometer ผ่านกล้องจุลทรรศน์	63
ภาพประกอบ 56 รูปจำลองการลงเซลล์เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยง.....	65
ภาพประกอบ 57 รูปแสดงตำแหน่งชนิดระดับสัญญาณ	67
ภาพประกอบ 58 รูปบริเวณที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิในส่วนที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณ.....	67
ภาพประกอบ 59 กราฟบันทึกระดับอุณหภูมิของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ	68
ภาพประกอบ 60 กราฟบันทึกระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ	69
ภาพประกอบ 61 ภาพเซลล์ WS-1 จากเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ หลังจากเพาะเลี้ยง 24 ชั่วโมง	69
ภาพประกอบ 62 ภาพเซลล์ WS-1 จากเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน หลังจากเพาะเลี้ยง 24 ชั่วโมง	70
ภาพประกอบ 63 กราฟแสดงผลเปอร์เซ็นต์ความมีชีวิตรอดหลังจากเพาะเลี้ยงเซลล์มาแล้ว 24 ชั่วโมง	70

ภาพประกอบ 64 กราฟบันทึกระดับอุณหภูมิของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุง.....	71
ภาพประกอบ 65 กราฟบันทึกระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายใน เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุง.....	72
ภาพประกอบ 66 ภาพเซลล์ WS-1 จากเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุง หลังจากเพาะเลี้ยง 24 ชั่วโมง	73
ภาพประกอบ 67 ภาพเซลล์ WS-1 จากเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน หลังจากเพาะเลี้ยง 24 ชั่วโมง	73
ภาพประกอบ 68 กราฟแสดงผลความมีชีวิตรอดหลังจากเพาะเลี้ยงเซลล์มาแล้ว 24 ชั่วโมง.....	74
ภาพประกอบ 69 ผลการวัดระดับสัญญาณวายฟายในพื้นที่ทดลองในย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์	75
ภาพประกอบ 70 ผลการวัดระดับสัญญาณวายฟายในพื้นที่ทดลองในย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์	76
ภาพประกอบ 71 ระดับอุณหภูมิภายในส่วนที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟาย	77
ภาพประกอบ 72 ผลการเจริญเติบโตของเซลล์ WS-1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากการทดลอง ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ.....	78
ภาพประกอบ 73 ผลการเจริญเติบโตของเซลล์ WS-1 เป็นเวลา 72 ชั่วโมงจากการทดลอง ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุง.....	79
ภาพประกอบ 74 ผล Fluorescence microscopy ของเซลล์ WS-1 เป็นเวลา 72 ชั่วโมงจากการทดลองภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุง	79

บทที่ 1

บทนำ

1. ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

จากการวิวัฒนาการของระบบการสื่อสารไร้สาย 5G เพื่อรองรับการใช้งานของผู้ใช้งานจำนวนมาก การใช้งาน ระบบ IOT ที่ในปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของจำนวนอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเป็นจำนวนมาก ประกอบกับความเร็วที่ใช้ในการสื่อสารที่สูงกว่าในอดีต ทำให้เกิดนวัตกรรมต่างๆ เพื่อนำมาใช้ทั้งในภาคครัวเรือน การขนส่ง พลังงาน การแพทย์ การศึกษา ความบันเทิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคอุตสาหกรรมที่สามารถเชื่อมอุปกรณ์ได้เป็นจำนวนมาก โดยที่อุปกรณ์สามารถเชื่อมต่อกันได้โดยตรงโดยที่ไม่มีความจำเป็นต้องใช้มนุษย์มาเป็นตัวกลางแทรกแซงส่งผลให้สามารถลดจำนวนคนและใช้เครื่องจักรได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นและส่งผลต่อการพัฒนาและปฏิบัติอุตสาหกรรม นอก โดยในปัจจุบัน เริ่มมีการใช้งานระบบการสื่อสารเคลื่อนที่ 5G แล้วในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทย และมีการคาดการณ์ว่าจะมีการใช้งานครอบคลุมทั่วโลกภายใน พ.ศ. 2568 (อัศรเอกผาติน, 2564)

เนื่องจากความนิยมในการใช้งานที่มากขึ้นและมีความครอบคลุมมากขึ้น ทำให้มีความพยายามที่จะศึกษาถึงผลกระทบของสัญญาณเครือข่ายไร้สายกับมนุษย์ที่อาจเกิดขึ้นได้ไม่ว่าจะเป็นด้านระบบภูมิคุ้มกัน ระบบประสาท พฤติกรรม และระบบสืบพันธุ์ ซึ่งผลสรุปนั้นมีหลากหลาย ทั้งผลเสียในระดับเซลล์ ผลกระทบแบบชั่วคราว หรือแม้กระทั่งผลดี ซึ่งมีทั้งการศึกษาในระดับ in vivo และ in vitro (Ait-Aïssa et al., 2010; Atasoy, Gunal, Atasoy, d, & Bugdayci, 2012; Delavarifar et al., 2020; Ishak, Ariffin, Ali, Sagiruddin, & Tawi, 2011; Koyama et al., 2015; Lee et al., 2014)

โดยงานวิจัยนี้สนใจการทดลองในระดับ In vitro ซึ่งเป็นการทดลองแบบในหลอดทดลอง ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้งานกันภายในห้องทดลอง มีราคาที่สูงมาก การซื้อจึงไม่ใช่คำตอบ จากความจำเป็นที่ต้องใช้งานจึงต้องสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นมา งานวิจัย (Nunchuen, Punpai, Tanechpongamb, & Tarateeraseth, 2019) เสนอการออกแบบเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายโดยเครื่องสามารถรักษาระดับของอุณหภูมิและระดับแก๊สได้ตามที่ควรจะเป็น ต่อมา (Songsiri, Tarateeraseth, & Tanechpongamb, 2020) ได้เสนอการสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์อย่างง่ายที่สามารถปรับสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบทางชีวภาพของสนามแม่เหล็ก

อย่างไรก็ตามสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นควรมีการทำชิลด์เพื่อป้องกันสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ที่อาจมาจากสภาพแวดล้อมเข้ามาปะปนและส่งผลกระทบต่อสัญญาณที่นำมาใช้ในการทดลอง โดยปกติแล้วภายในแชมเบอร์เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์จะทำมาจากโลหะที่ประกอบเชื่อมเป็นลักษณะผิวปิดอยู่แล้วทำให้กลายเป็นการสร้างชิลด์ขึ้นมาในตัว แต่จากต้นแบบของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์อย่างง่าย (Nunchuen et al., 2019) และ (Songsiri et al., 2020) นั้น สร้างแชมเบอร์ด้านในจากไม้และวัสดุฉนวนกันความร้อนทำให้ไม่มีความสามารถในการป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ในงานวิจัยนี้เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์อย่างง่ายจาก นำมาดัดแปลงและติดตั้งชิลด์ และพัฒนา รูปแบบให้เหมาะสมกับการนำไปทดลองหาผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi 6 ต่อเซลล์มนุษย์ต่อไป

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษา ออกแบบ และสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่าย (simple CO₂ incubator) ที่มีการติดตั้งชิลด์ลดทอนระดับสัญญาณ Wi-Fi และ อุปกรณ์ตัวกระจายสัญญาณ Wi-Fi 6 ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่าย
2. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานระหว่างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน (standard CO₂ incubator) กับเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่าย (simple CO₂ incubator) โดยดูอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์เพื่อพิสูจน์การทำงานของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์
3. เพื่อศึกษาเบื้องต้นของผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi 6 ต่อเซลล์มนุษย์

3. ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบโครงสร้าง และหลักการทำงานเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่าย (simple CO₂ incubator) ที่มีเงื่อนไขดังนี้
 1. ควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส และ ระดับก๊าซ CO₂ ที่ 5 เปอร์เซ็นต์
 2. สามารถติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi 6 ได้
 3. ชิลด์สามารถลดระดับสัญญาณได้ 10 dB
2. เปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ WS-1 ระหว่างการเพาะเลี้ยงในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่าย และแบบมาตรฐานเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. ศึกษาผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi 6 ต่อเซลล์ WS-1

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายที่มีขีดลดทอนสัญญาณ Wi-Fi และตัวกระจายสัญญาณ Wi-Fi 6 ที่ไม่พึ่งประสงค์ ให้มีการทำงานและประสิทธิภาพเทียบเคียงกับเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐานทราบถึงข้อจำกัดการทำงานเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่าย

2. สามารถศึกษา วิเคราะห์ ผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi 6 ต่อเซลล์มนุษย์เพื่อประโยชน์ในการศึกษาในอนาคต



บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ โดยจะกล่าวถึงสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย (Wi-Fi) ซึ่งอุปกรณ์นี้เป็นหนึ่งในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า รวมไปถึงเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์ การแบ่งเซลล์ การตายของเซลล์ การเพาะเลี้ยงเซลล์ และเนื้อเยื่อ

1. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) ตามนิยามของพจนานุกรมศัพท์วิศวกรรมไฟฟ้าฉบับ วสท. หมายถึง “คลื่นที่แสดงลักษณะด้วยการแปรผันของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า” โดย “คลื่น” จะเป็นตัวกลางที่ทำหน้าที่ส่งผ่านพลังงานในรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เจมส์ คลาร์ก แมกเวลล์ ได้อาศัยสมการของแมกเวลล์ทำการพิสูจน์ให้เห็นจริงถึงการมีอยู่จริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อีกทั้งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ออกห่างจากแหล่งกำเนิดทุกทิศทางรอบๆ แหล่งกำเนิด และพิสูจน์ให้เห็นว่า แท้ที่จริงแล้วแสงกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็คือสิ่งเดียวกัน อีกทั้งรู돌อล์ฟ ไฮน์ ริช เอิร์ต ได้พิสูจน์การมีอยู่จริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยการสร้างเครื่องส่ง และรับคลื่นวิทยุ นอกจากคลื่นวิทยุ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังมีอีกหลายชนิดด้วยกัน โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิด นิยมแบ่งออกตาม สเปกความถี่ โดยที่สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีตั้งแต่คลื่นที่มีความยาวคลื่นมากๆ ได้แก่ คลื่นวิทยุ เอเอ็ม (ขนาดประมาณสนามฟุตบอล) ไปจนกระทั่งถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมากๆ ได้แก่ รังสีแกมมา (ขนาดประมาณอะตอม) ดังแสดงในภาพประกอบ 2.2 ซึ่งแสดงตัวอย่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน ได้แก่ คลื่นวิทยุ คลื่นโทรทัศน์ คลื่นเรดาร์ คลื่นไมโครเวฟ รังสีเอกซ์ คลื่นสัญญาณโทรศัพท์มือถือ คลื่นสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย เป็นต้น

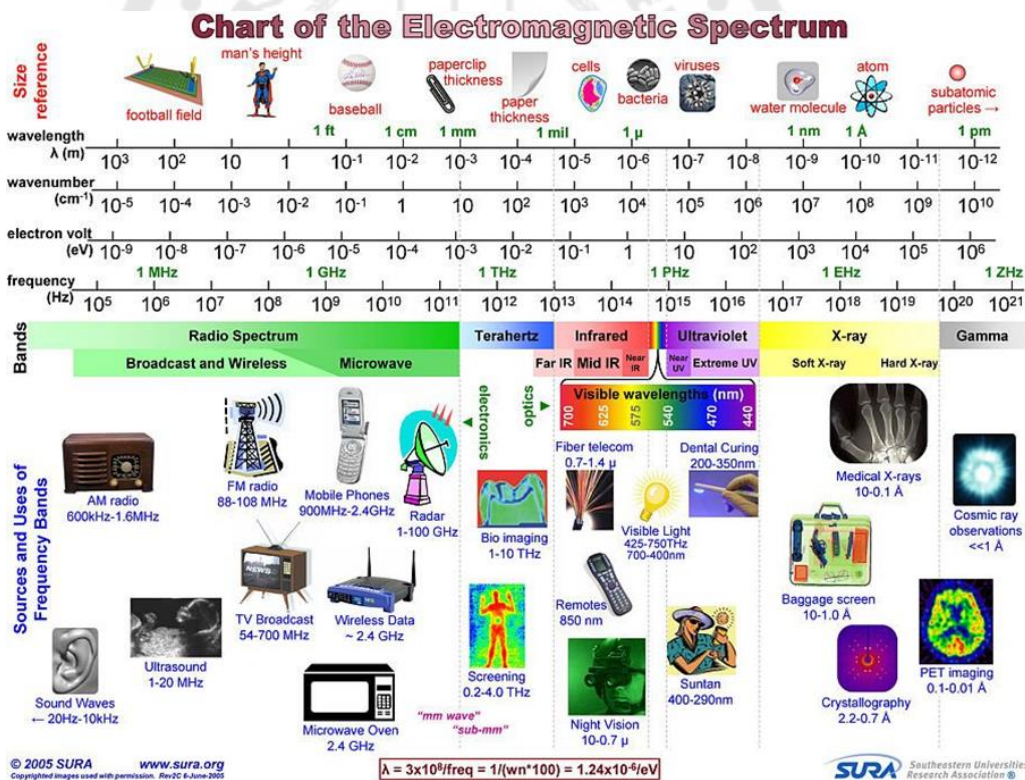
1.1 คุณสมบัติที่สำคัญของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

“คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า” ประกอบด้วยสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้าทำมุมตั้งฉากซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

1. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแตกต่างจากคลื่นชนิดอื่นๆ โดยส่วนใหญ่ที่ต้องการตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่น คลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านอากาศ หรือน้ำ หรือคลื่นไหวสั่นสะเทือน

(seismic wave) เคลื่อนที่ผ่านพื้นดิน เป็นต้น แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในอวกาศว่าง หรือสุญญากาศโดยไม่ต้องการตัวกลางในการเคลื่อนที่แต่อย่างใด

2. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถส่งผ่านพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้
3. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีความเร็วในการเคลื่อนที่จำกัดที่ค่าๆ หนึ่ง โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน โดยในอวกาศว่าง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที และความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะลดต่ำลงเมื่อผ่านตัวกลางชนิดอื่น
4. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถกำหนดระบุมิติศทางในการเคลื่อนที่ได้ เช่น การส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดาวเทียมมายังโลก
5. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเกิดการสะท้อน (reflected) หักเห (refracted) และเลี้ยวเบน (diffracted) ได้



ภาพประกอบ 1 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้งาน

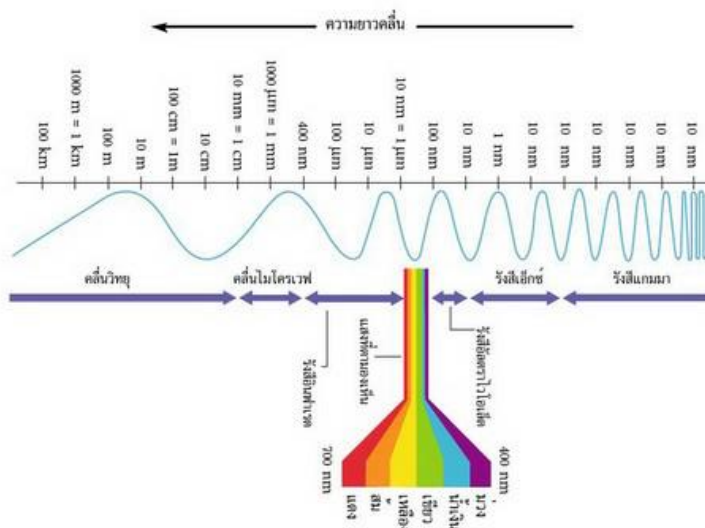
ที่มา: <http://www.sura.org/commercialization/terahertz.html>

1.2 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

แสงที่ตามองเห็น (visible light) เป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงคลื่น 400–700 นาโนเมตร (1 เมตร = 109 นาโนเมตร หรือ 100 ล้านนาโนเมตร) หากนำแท่งแก้วปริซึมมาหักเหแสงอาทิตย์ จะเห็นว่าแสงสีขาวถูกหักเหออกเป็นสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง คล้ายกับสีของรุ้งกินน้ำ เรียกว่า “สเปกตรัม” (spectrum) แสงแต่ละสีมีความยาวคลื่นแตกต่างกัน สีม่วงมีความยาวคลื่นน้อยที่สุด สีแดงมีความยาวคลื่นมากที่สุด ดังที่แสดงในภาพประกอบ 2.3 นอกจากนี้แสงที่ตามองเห็นแล้วยังมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดอื่นๆ ดังนี้

1. รังสีแกมมา (gamma ray) ความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.01 นาโนเมตร
2. รังสีเอ็กซ์ (x-ray) มีความยาวคลื่น 0.01-1 นาโนเมตร
3. รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) มีความยาวคลื่น 1-400 นาโนเมตร
4. แสงที่ตามองเห็น (visible light) มีความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร
5. รังสีอินฟราเรด (infrared) มีความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร - 1 มิลลิเมตร
6. คลื่นไมโครเวฟ (microwave) มีความยาวคลื่น 1 มิลลิเมตร - 10 เซนติเมตร
7. คลื่นวิทยุ (radio wave) ความยาวคลื่นมากกว่า 10 เซนติเมตร

ในส่วนของการทำงานประยุกต์ใช้งาน แสดงดังภาพประกอบ 2.2 ซึ่งจะเห็นว่าคลื่นสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย เป็นหนึ่งในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเช่นกัน (ธาราธิรเศรษฐ์, 2557)



ภาพประกอบ 2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทต่างๆ

ที่มา: <http://de4twer.blogspot.com/2018/?view=classic>

2. สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย

สัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย (wireless fidelity: Wi-Fi) หรือที่เรียกกันว่าไวเลส (wireless) หมายถึง เครือข่ายไร้สาย มักใช้กับระบบเครือข่าย ไม่ว่าจะป็นในองค์กร หรือในระบบเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ส่วนระบบเครือข่ายไร้สาย (wireless LAN : WLAN) หมายถึงเทคโนโลยีที่ช่วยให้การติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง หรือกลุ่มของเครื่องคอมพิวเตอร์สามารถสื่อสารกันได้ รวมถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์เครือข่ายคอมพิวเตอร์ด้วย โดยปราศจากการใช้สายสัญญาณในการเชื่อมต่อ แต่จะใช้คลื่นวิทยุเป็นช่องทางการสื่อสารแทน การรับส่งข้อมูลระหว่างกันจะผ่านอากาศ ทำให้ไม่ต้องเดินสายสัญญาณ และติดตั้งใช้งานได้สะดวกขึ้น ซึ่งระบบเครือข่ายไร้สายใช้แม่เหล็กไฟฟ้าผ่านอากาศ เพื่อรับส่งข้อมูลข่าวสารระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ และระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์เครือข่าย โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้อาจเป็นคลื่นวิทยุ (radio) หรืออินฟราเรด (Infrared) ซึ่งแตกต่างจากระบบ LAN ที่จะต้องใช้สาย LAN เป็นตัวเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้ากับเครือข่าย

ไวไฟ (Wi-Fi) เป็นองค์กรที่ทำหน้าที่ทดสอบผลิตภัณฑ์ระบบเครือข่ายแบบไร้สาย (wireless LAN) ภายใต้เทคโนโลยีการสื่อสารมาตรฐาน IEEE 802.11 ว่าอุปกรณ์แต่ละยี่ห้อที่นั้นสามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยไม่มีปัญหา ซึ่งเมื่ออุปกรณ์เหล่านั้นผ่านการตรวจสอบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว อุปกรณ์ก็ถูกประทับตราสัญลักษณ์ Wi-Fi certified รับรองว่าอุปกรณ์ชิ้นนั้นสามารถติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ตัวอื่นๆ ที่มีตราสัญลักษณ์ Wi-Fi certified ได้ เป็นเหตุผลที่ทำให้นำคำว่า Wi-Fi มาเรียกใช้แทนอุปกรณ์เชื่อมต่อไร้สาย หรือ Wireless

โดยการสื่อสารผ่านเครือข่ายไร้สายมีมาตรฐาน IEEE802.11 เป็นมาตรฐานกำหนดรูปแบบการสื่อสาร ซึ่งมาตรฐานแต่ละตัวจะบอกถึงความเร็ว และคลื่นความถี่สัญญาณที่แตกต่างกันในการสื่อสารข้อมูล และมาตรฐานของสัญญาณไวเลส หรือ WLAN สำหรับให้บริการอินเทอร์เน็ตในปัจจุบัน มีอยู่ 2 ย่านความถี่ คือ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 5 กิกะเฮิรตซ์

สัญญาณอินเทอร์เน็ตไร้สายที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ มีการใช้งานมานานแล้ว ข้อดีราคาไม่แพงและคลื่นสัญญาณไปได้ไกล แต่มีข้อจำกัดเรื่องช่องสัญญาณ และสัญญาณชนกันเนื่องจากช่องสัญญาณน้อย โอกาสที่สัญญาณทับซ้อนกันมีเยอะ อีกทั้งสัญญาณรบกวนเยอะ แต่ก็สามารถเล่นโซเชียลมีเดียต่างๆ ที่ไม่ได้ใช้ปริมาณเน็ตมากได้ เช่น เฟสบุ๊ค (Facebook), อินสตาแกรม (Instagram) หรือเว็บไซต์ต่างๆ ส่วนความถี่ 5.0 กิกะเฮิรตซ์ เพิ่งจะมาอนุญาตให้ใช้ได้ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมา ราคาอุปกรณ์ค่อนข้างสูง ข้อดีคือช่องสัญญาณเยอะกว่า 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และโอกาสช่องสัญญาณจะชนกับของผู้อื่นมีน้อย อีกทั้งมีกำลังส่งที่แรงกว่า แต่ก็ยังมีข้อเสียใน

เรื่องระยะทางสั้นลง มีกระจายสัญญาณได้ไกลกว่า 4 กิกะเฮิร์ตซ์ เนื่องจากคลื่นที่มีความถี่สูง ระยะทางจะใกล้กว่าคลื่นที่มีความถี่ต่ำ โดยสัญญาณอินเทอร์เน็ตรหัสสายที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ มีความเร็วสูง จึงเหมาะกับการดูหนังที่มีความละเอียดสูง เล่นเกมออนไลน์ รวมถึงการเทรดหุ้น

2.1 ความเป็นมาอุปกรณ์การกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย

เทคโนโลยีเครือข่ายแบบไร้สาย มาตรฐาน IEEE 802.11 ถือกำเนิดขึ้นในปี ค.ศ. 1997 จัดตั้งโดยองค์การ IEEE มีความเร็ว 1 เมกะบิตต่อวินาที ในยุคเริ่มแรกนั้นให้ประสิทธิภาพการทำงานที่ค่อนข้างต่ำ ทั้งไม่มีการรับรองคุณภาพของการให้บริการที่เรียกว่า QoS (Quality of Service: QoS) และมาตรฐานความปลอดภัยต่ำ เมื่อคำนึงตามยุคสมัยของอุปกรณ์ ถือได้ว่ามีความสามารถระดับหนึ่ง

จากนั้นทาง IEEE จัดตั้งคณะทำงานขึ้นมาปรับปรุงหลายกลุ่ม โดยกลุ่มที่ได้รับการยอมรับอย่างเป็นทางการว่าได้มาตรฐาน ได้แก่กลุ่ม 802.11a, 802.11b และ 802.11g

เทคโนโลยี 802.11 มีต้นกำเนิดในปี ค.ศ. 1985 กำหนดขึ้นโดยคณะกรรมการการสื่อสารแห่งชาติสหรัฐอเมริกาที่ประกาศช่วงความถี่สำหรับกิจการด้านอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์สำหรับการใช้งานที่ไม่ต้องมีใบอนุญาต

ในปี ค.ศ. 1991 บริษัท เอ็นซีอาร์/เอทีแอนด์ที ซึ่งตอนนี้เป็น Alcatel-Lucent และ LSI คอร์-ปอเรชั่น ได้สร้างชุดตั้งต้นของ 802.11 ในเมืองนูเวเกน (Nieuwegein) เนเธอร์แลนด์ ตอนแรกนักประดิษฐ์ตั้งใจจะใช้เทคโนโลยีนี้สำหรับระบบเก็บเงิน โดยผลิตภัณฑ์ไร้สายตัวแรกที่ถูกนำออกสู่ตลาดอยู่ภายใต้ชื่อ WaveLAN ที่มีอัตราข้อมูลดิบของ 1 เมกะบิตต่อวินาที และ 2 เมกะบิตต่อวินาที

ต่อมาวิก เฮส์ ผู้เป็นประธานของ IEEE 802.11 เป็นระยะเวลา 10 ปี จึงถูกเรียกว่า "บิดาแห่ง Wi-Fi" ได้มีส่วนร่วมในการออกแบบ 802.11b และ 802.11a มาตรฐานเริ่มต้นภายใน IEEE

ในปี ค.ศ. 1999 Wi-Fi Alliance ถูกจัดตั้งขึ้นเป็นสมาคมการค้าเจ้าของเครื่องหมายการค้า Wi-Fi ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ที่ใช้ Wi-Fi จะมีเครื่องหมายดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 ตราสัญลักษณ์ Wi-Fi ผ่านการรับรองความเข้ากันได้ของผลิตภัณฑ์

ที่มา: <http://www.itsystem.co.th/bthkhwam/wireless-lan-technology>

2.2 มาตรฐาน IEEE 802.11

Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) เป็นองค์กรกำหนดมาตรฐานการสื่อสารข้อมูลบนระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้กำหนดมาตรฐานสำหรับเครือข่ายไร้สายแลนขึ้น คือ มาตรฐาน IEEE802.11 และมาตรฐานที่ใช้ในปัจจุบัน คือ a, b, g และ n ตามลำดับ โดยแต่ละมาตรฐานมีความเร็ว และคลื่นความถี่สัญญาณที่แตกต่างกัน มีรายละเอียด ดังนี้

2.2.1 มาตรฐาน IEEE 802.11a

เป็นเครือข่ายไร้สายแลนที่ทำงานย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์ มีความเร็วในการรับส่งข้อมูล 54 เมกะบิตต่อวินาที สามารถทำการแพร่ภาพวิดีโอ และข้อมูลที่ต้องการความละเอียดสูงได้ โดยอัตราความเร็วในการรับส่งข้อมูลสามารถปรับระดับให้ช้าลงได้ เพื่อเพิ่มระยะทางการเชื่อมต่อให้มากขึ้น เช่น 54, 48, 36, 24 และ 11 เมกะบิตต่อวินาที เป็นต้น ขณะที่คลื่นความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์ ไม่ได้ใช้งานอย่างแพร่หลาย เพราะบางประเทศไม่อนุญาตให้ใช้คลื่นความถี่นี้ ดังนั้นปัญหาการรบกวนคลื่นความถี่จึงมีน้อย ต่างจากคลื่นความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทำให้สัญญาณของคลื่นความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ถูกรบกวนจากอุปกรณ์ประเภทอื่นที่ใช้คลื่นความถี่เดียวกันได้

2.2.2 มาตรฐาน IEEE 802.11b

เป็นมาตรฐานที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย รวมทั้งประเทศไทยด้วยเช่นกัน ทำงานที่คลื่นความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลที่มีความเร็ว 11 เม

กะบิตต่อวินาที ผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เครือข่ายไวเลสแลนมาตรฐานนี้ได้รับความนิยมจำนวนมาก โดยทุกผลิตภัณฑ์ต้องสามารถทำงานร่วมกันได้ อุปกรณ์ทุกยี่ห้อต้องผ่านการตรวจสอบจากสถาบัน Wi-Fi Alliance เพื่อตรวจสอบมาตรฐานของอุปกรณ์ และความเข้ากันได้ของแต่ละผู้ผลิต ซึ่งอุปกรณ์ไวเลสแลนที่มาตรฐาน 802.11b จะนำไปใช้ในองค์กรธุรกิจ สถาบันการศึกษา สถานที่สาธารณะ และกำลังแพร่เข้าสู่สถานที่พักอาศัยมากขึ้น และมาตรฐานนี้มีระบบเข้ารหัสข้อมูลแบบ WEP ที่ 128 บิต

2.2.3 มาตรฐาน IEEE 802.11g

ใช้ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ สามารถรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 36-54 เมกะบิตต่อวินาที ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงกว่ามาตรฐาน 802.11b โดยมาตรฐาน 802.11g สามารถปรับระดับความเร็วในการสื่อสารลงเหลือ 2 เมกะบิตต่อวินาที ได้ มาตรฐานนี้เป็นที่นิยมของผู้ใช้เป็นจำนวนมาก และเข้ามาแทนที่ 802.11b ที่ความเร็วต่ำกว่า

2.2.4 มาตรฐาน IEEE 802.11n

เป็นมาตรฐานที่สามารถทำงานบนคลื่นความถี่ 2.4 และ 5 กิกะเฮิรตซ์ รองรับความเร็วตั้งแต่ 300-600 เมกะบิตต่อวินาที โดยรองรับเสาอากาศหลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MIMO) มีเสาสัญญาณตั้งแต่ 2-4 เสา บนตัวอุปกรณ์กระจายสัญญาณไวเลสแลน และหากผู้ใช้ต้องการใช้งานที่ความเร็วสูงสุด เครื่องคอมพิวเตอร์พกพา หรืออุปกรณ์เคลื่อนที่ ต้องรองรับมาตรฐาน 802.11n ได้ด้วยเช่นกัน มาตรฐาน 802.11n สามารถทำงานร่วมกับ 802.11b และ 802.11g ได้ โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพทั้งระบบลดลงเหมือนมาตรฐาน 802.11g เมื่อมีอุปกรณ์ 802.11b เข้ามาใช้งานร่วมกัน โดยมาตรฐานนี้ถูกกำหนดใหม่ในชื่อของ Wi-Fi 4

2.2.5 มาตรฐาน IEEE 802.11ac

เป็นมาตรฐานที่พัฒนามาจาก IEEE 802.11n โดยเพิ่มระดับความเร็วสูงสุดได้ถึง 3.5 กิกะบิตต่อวินาที และความกว้างของช่องสัญญาณเดิมจาก 40 เมกะเฮิรตซ์ เป็น 80 เมกะเฮิรตซ์ ในย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์ และเพิ่มการใช้งานแบบหลายผู้ใช้หลายอินพุตหลายเอาต์พุต (MU-MIMO) ทำให้สัญญาณ Wi-Fi สามารถรองรับผู้ใช้ได้จำนวนมากขึ้นโดยมาตรฐานนี้ถูกกำหนดใหม่ในชื่อของ Wi-Fi 5

2.2.6 มาตรฐาน IEEE 802.11ax

เป็นมาตรฐานที่พัฒนามาจาก IEEE 802.11ac โดยมีการเพิ่มเทคนิควิธีการที่เรียกว่า OFDMA ทำให้สามารถจัดการการใช้งานของผู้ใช้จำนวนที่มากกว่าเดิมได้โดยที่ยังคงประสิทธิภาพ ในมาตรฐานนี้นั้นจะสามารถทำความเร็วในการรับส่งข้อมูลได้มากถึง 9.6 กิกะบิตต่อวินาที โดยมาตรฐานนี้ถูกกำหนดใหม่ในชื่อของ Wi-Fi 6

ตาราง 1 ตารางมาตรฐาน IEEE802.11 ของเครือข่ายไร้สาย

มาตรฐาน	ย่านคลื่นความถี่ (GHz)	อัตราความเร็วของข้อมูลสูงสุด (Mbps)
802.11a	5	54
802.11b	2.4	11
802.11g	2.4	54
802.11n	2.4, 5	600
802.11ac	2.4, 5	3500
802.11ax	2.4, 5, 6	9600

3. การชิลด์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน

การชิลด์เพื่อป้องกันนั้นคือการนำโลหะไปติดตั้งคั่นระหว่างพื้นที่ว่าง เพื่อจำกัดอาณาเขตของการกระจายสัญญาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การนำไปใช้งานจะสามารถใช้ในการป้องกันสิ่งที่ต้องการโดยรอบด้วยการล้อมแหล่งต้นกำเนิดสัญญาณรบกวนเพื่อไม่ให้มีสัญญาณรบกวนเล็ดลอดออกมาด้านนอกของชิลด์ หรือล้อมสิ่งที่ต้องการป้องกันด้วยชิลด์ เพื่อเป็นการเพิ่มการป้องกันสัญญาณรบกวนไม่ให้ผ่านเข้าไปในชิลด์ได้ การชิลด์เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนนั้นจะต้องมีองค์ประกอบหลายส่วนดังนี้(ถาวรธีรเศรษฐ์)

3.1 สนามระยะใกล้ และสนามระยะไกล

ลักษณะเฉพาะของสนามระยะใกล้และสนามระยะไกลนั้นสามารถระบุได้ขึ้นอยู่กับต้นกำเนิดของสัญญาณ (เสากระจายสัญญาณ) ตัวกลางที่อยู่รอบๆกับต้นกำเนิดของสัญญาณ และระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดสัญญาณกับจุดที่ใช้ในการพิจารณา หากจุดที่พิจารณานั้นอยู่ติดกับแหล่งต้นกำเนิดสัญญาณ ลักษณะเฉพาะต่างๆของสนาม จะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของต้นกำเนิดสัญญาณ แต่เมื่อจุดที่พิจารณานั้น มีระยะที่เริ่มห่างออกจากแหล่งต้นกำเนิดสัญญาณ คุณลักษณะสมบัติต่างๆของสนามนั้นจะขึ้นอยู่กับตัวกลางที่สัญญาณนั้นๆใช้ในการแพร่กระจายสัญญาณเป็นหลัก

พื้นที่ว่างรอบๆ แหล่งต้นกำเนิดสัญญาณนั้น จะสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ สนามระยะใกล้ และ สนามระยะไกล โดยมีจุดแบ่งที่เป็นจุดเปลี่ยนผ่านของ สนามระยะใกล้ และ สนามระยะไกลเท่ากับ ความยาวคลื่น (λ) ของคลื่นที่ปล่อยมาจากแหล่งต้นกำเนิดสัญญาณหาร ด้วย 2π เมื่อระยะห่างระหว่างแหล่งต้นกำเนิดสัญญาณกับจุดที่พิจารณา มีค่ามากกว่าค่าที่ คำนวณได้ จะเรียกได้ว่า บริเวณนั้นเป็น สนามระยะไกล ลักษณะอิมพีแดนซ์จะอยู่ในรูปของคลื่น ระนาบ ในทางกลับกันหากระยะห่างระหว่างแหล่งต้นกำเนิดสัญญาณกับจุดที่พิจารณา มีค่าน้อย กว่าค่าที่คำนวณได้ ถือว่าจุดนั้นอยู่ในพื้นที่ของ สนามระยะใกล้ ซึ่งลักษณะอิมพีแดนซ์จะอยู่ในรูป ของสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าขึ้นกับกระแสและแรงดันของแหล่งต้นกำเนิดสัญญาณ

3.2 ลักษณะเฉพาะ และอิมพีแดนซ์ของคลื่น

นิยามของอิมพีแดนซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใด ๆ สามารถนิยามได้โดยกำหนดให้ Z_w คืออิมพีแดนซ์ของคลื่น E คือสนามไฟฟ้า และ H คือสนามแม่เหล็กดังสมการที่ 1

$$Z_w = \frac{E}{H} \quad (1)$$

ส่วนนิยามของคุณลักษณะเฉพาะของอิมพีแดนซ์ของตัวกลางคลื่นสามารถนิยามได้ โดยกำหนดให้ μ คือค่าซึมซาบแม่เหล็ก σ คือค่าความนำไฟฟ้าและ ϵ คือค่าคงตัวไดอิเล็กทริกดัง สมการ 2

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\epsilon}} \quad (2)$$

ส่วนในกรณีของคลื่นระนาบ ในสนามระยะไกล Z_0 จะมีค่าเท่ากับ Z_w ส่วนกรณีฉนวน (มีค่า $\sigma \ll j\omega\epsilon$) คุณลักษณะเฉพาะอิมพีแดนซ์ที่ไม่ขึ้นกับความถี่จะกลายเป็นดังสมการที่ 3

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3)$$

ในกรณีของพื้นที่ว่าง Z_0 จะมีค่าเท่ากับ 377 โอห์ม และกรณีตัวนำ (มีค่า $\sigma \gg j\omega\epsilon$) คุณลักษณะเฉพาะอิมพีแดนซ์จะถูกเรียกว่า ค่าอิมพีแดนซ์ของซีลด์ (Z_s) และสามารถเขียนใหม่ ได้เป็นดังสมการที่ 4.1 และ 4.2

$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1 + j), \quad (4.1)$$

$$|Z_s| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} \quad (4.2)$$

โดยปกติ ทองแดง ที่ 1 เมกะเฮิร်ซ $|Z_s|$ มีค่าเท่ากับ $|Z_s| = 3.68 \times 10^{-4}$ เมื่อแทนค่ากลับเข้าไปในสมการ 4.3 จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 4.3

$$|Z_s| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{f} \quad (4.3)$$

ทำให้สามารถเขียนสมการค่าอิมพีแดนซ์ของซีลด์สำหรับตัวนำใดๆได้ใหม่ดังสมการที่

4.4 คือ

$$|Z_s| = 3.68 \times 10^{-7} \sqrt{\frac{\mu_r}{\sigma_r}} \sqrt{f}. \quad (4.4)$$

โดย μ_r คือค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ และ σ_r คือค่าความนำสัมพัทธ์ ซึ่งจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละวัสดุที่นำมาใช้เพื่อเป็นซีลด์

3.3 ประสิทธิภาพการซีลด์

ประสิทธิภาพการซีลด์นั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังสมการที่ 5

$$S = A + R \quad (5)$$

3.3.1 สูญเสียจากการดูดซับของวัสดุ

การสูญเสียจากการดูดซับของวัสดุนั้นเกิดขึ้นจากกระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากสัญญาณที่ผ่านมาที่ซีลด์ทำให้เกิดความร้อนสูญเสียออกไปในเนื้อวัสดุ โดยสามารถเขียนสมการที่ 6

$$A = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log(e) [dB], \quad (6.1)$$

$$A = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) [dB], \quad (6.2)$$

โดย A คือ การสูญเสียจากการดูดซับของวัสดุ t คือความหนาของวัสดุซีลด์ และ δ คือค่าความลึกของผิว ซึ่งค่าความลึกของผิวนั้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 7

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} [m]. \quad (7)$$

3.3.2 สูญเสียจากการสะท้อน

การสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนของสัญญาณนั้นจะเกิดที่จุดแบ่งระหว่างทั้งสองตัวกลางซึ่งสัมพันธ์กับความแตกต่างของคุณลักษณะเฉพาะอิมพีแดนซ์ระหว่างทั้งสองตัวกลาง ในกรณีคลื่นระนาบ(ภายในสนามระยะไกล) การสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 8 คือ

$$R = 20 \log \frac{94.25}{|Z_s|} [dB]. \quad (8)$$

โดย R คือ การสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนของสัญญาณ และเมื่อแทนค่า $|Z_s|$ จากสมการที่ 4.4 โดยจะสามารถทำให้เขียนสมการได้ใหม่ดังสมการที่ 9

$$R = 168 + 10 \log \left(\frac{\sigma_r}{\mu_r f} \right) [dB]. \quad (9)$$

โดย μ_r คือค่าความซึมซาบสัมพัทธ์ และ σ_r คือค่าความนำสัมพัทธ์ ซึ่งจะแตกต่างกันออกไปในแต่ละวัสดุที่นำมาใช้เพื่อเป็นชีลด์

4. เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ (CO₂ incubator)

เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ (CO₂ incubator) ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิจัยทางวิทยาศาสตร์เพื่อการเจริญเติบโต และบำรุงรักษาเซลล์ โดยการใช้งานทั่วไป ได้แก่ วิศวกรรมเนื้อเยื่อ การปฏิสนธิในอวัยวะระบบประสาท การวิจัยโรคมะเร็ง และการวิจัยเซลล์เลี้ยงลูกด้วยนมอื่น ๆ เป็นต้น

โดยเครื่องนี้มีความสำคัญกับการเลี้ยงเซลล์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการเลี้ยงเซลล์สัตว์นั้น ถ้าต้องการให้เซลล์มีการเจริญเติบโตได้นั้น จำเป็นต้องใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับร่างกายของสัตว์ที่นำเซลล์มาเลี้ยง และเลียนแบบสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติของเซลล์อย่างน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ดังนั้นในการใช้ตู้เพาะเลี้ยงเซลล์จำเป็นต้องควบคุมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิให้อยู่ในระดับคงที่ คือ

1. อุณหภูมิอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส
2. ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์

เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ นอกจากจะต้องควบคุมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิแล้ว แต่ยังคงควบคุมความชื้นให้อยู่ที่ 95 เปอร์เซ็นต์ รวมถึงควบคุมการปนเปื้อนของเชื้อราด้วย โดยการป้องกันเซลล์จากการปนเปื้อน มีวิธีที่ดีที่สุดคือการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน หรือแสงยูวี ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์หลายรุ่น มีประสิทธิภาพสูง และคุณภาพดี ที่สามารถเลือกใช้ได้หลากหลาย



ภาพประกอบ 4 ตัวอย่างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน

ที่มา: <https://www.cleantifescience.co.uk/products/st-45-co2-incubator-45l/>

5. เซลล์

5.1 ทฤษฎีพื้นฐานของเซลล์

เซลล์ (cell) เป็นโครงสร้าง และหน่วยทำงานที่เล็กที่สุดของสิ่งมีชีวิตแทบทุกชนิด ในบางครั้ง อาจเรียกว่า หน่วยที่เป็นองค์ประกอบของชีวิต (building blocks of life) สิ่งมีชีวิตบางชนิด เช่น แบคทีเรีย ประกอบด้วยเซลล์เพียง 3 เซลล์ (unicellular) แต่สัตว์หลายชนิด เช่น มนุษย์ เป็นสิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ (Multicellular) ซึ่งมนุษย์มีเซลล์อยู่ประมาณ 100 ล้านล้าน หรือ 10^{14} เซลล์

โดยเซลล์ของสิ่งมีชีวิตส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็ก ทั้งนี้เพื่อเพิ่มอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตร ทำให้เซลล์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการนำสารอาหาร ก๊าซต่างๆ ที่จำเป็นเข้าสู่ภายในเซลล์ และมีการขับของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมแทบอลิซึมออกไปนอกเซลล์ได้ดีขึ้น

5.1.1 ทฤษฎีเซลล์

ทฤษฎีเซลล์ (cell theory) ตั้งโดย เทโอดอร์ ชวัน และมัทธิลัส ยาคอบชไลเดน มีใจความว่า “สิ่งมีชีวิตทั้งหลายประกอบขึ้นด้วยเซลล์ และเซลล์คือหน่วยพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด” และทฤษฎีเซลล์ในปัจจุบันยังครอบคลุมถึงใจความสำคัญ 3 ประการ คือ

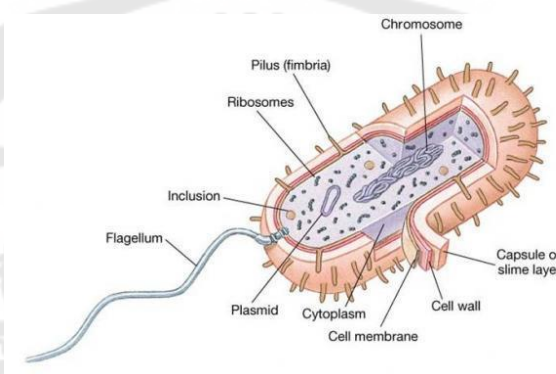
1. เซลล์เป็นหน่วยพื้นฐานที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต สามารถดำรงกิจกรรมต่างๆ ได้
2. สิ่งมีชีวิตทุกชนิดจะต้องประกอบขึ้นจากเซลล์ และผลิตภัณฑ์ของเซลล์

3. เซลล์ทุกเซลล์ของสิ่งมีชีวิตจะต้องมาจากเซลล์ที่มีอยู่ก่อน (preexisting cell) โดยผ่านการแบ่งเซลล์

5.1.2 ชนิดของเซลล์

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามโครงสร้างของเซลล์ ได้แก่ เซลล์โพรคาริโอต (prokaryotic cell) และเซลล์ยูคาริโอต (eukaryotic cell)

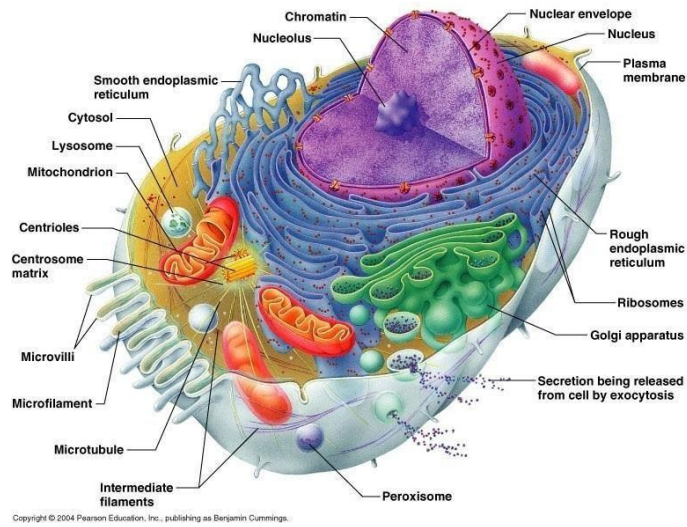
1. เซลล์โพรคาริโอต (prokaryotic cell) เป็นเซลล์ที่ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส นิวเคลียสประกอบด้วย โครโมโซมเพียงเส้นเดียว มีลักษณะเป็นวงแหวน ได้แก่ เซลล์ของพวกแบคทีเรีย และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน



ภาพประกอบ 5 เซลล์โพรคาริโอต

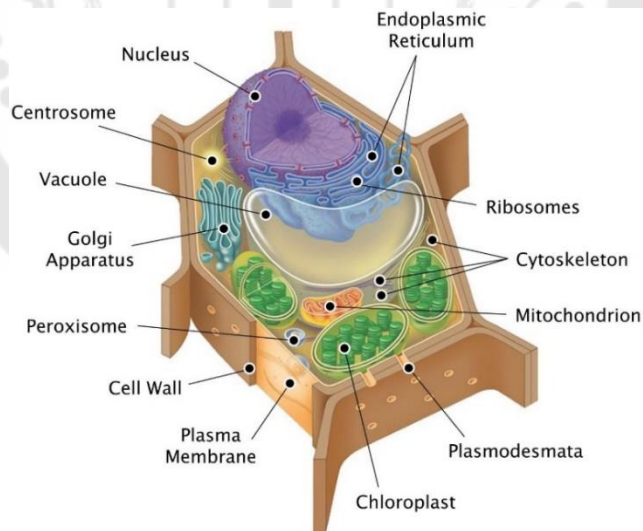
ที่มา: <https://sites.google.com/site/cell941tu78/neuxha>

2. เซลล์ยูคาริโอต (eukaryotic cell) เป็นเซลล์ที่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสสารพันธุกรรมหรือโครโมโซมบรรจุอยู่ในนิวเคลียส ได้แก่ เซลล์สิ่งมีชีวิตทั่วไป เช่น รา โพรทิสต์ สาหร่ายอื่นๆ พืช สัตว์



ภาพประกอบ 6 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์สัตว์

ที่มา: <https://sites.google.com/site/cell941tu78/neuxha>



ภาพประกอบ 7 โครงสร้างพื้นฐานของเซลล์พืช

ที่มา: <https://sites.google.com/site/structureofplantandanimalcell/khorngrang-sell-phuch>

5.2 การแบ่งเซลล์

การสืบพันธุ์และเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตมีการแบ่งเซลล์เข้ามาเกี่ยวข้องกัน มีกระบวนการ 2 กระบวนการเกิดเวียนสลับต่อกันในการแบ่งเซลล์ คือ การแบ่งตัวของนิวเคลียส (karyokinesis) และการแบ่งตัวของไซโทพลาสซึม (Cytokinesis) เมื่อสิ้นสุดการแบ่งตัวของนิวเคลียสเรียบร้อยแล้ว โดยปกติแล้วก็จะเริ่มการแบ่งตัวของไซโทพลาสซึมต่อมาในทันที ในการแบ่งตัวของนิวเคลียสนั้นแยกเป็น 2 แบบ คือ การแบ่งตัวแบบไมโทซิส และการแบ่งตัวแบบไมโอซิส

5.2.1 การแบ่งตัวของนิวเคลียส (karyokinesis)

5.2.1.1 การแบ่งตัวของนิวเคลียสแบบไมโทซิส (mitosis)

เป็นการแบ่งตัวของเซลล์ร่างกายเพื่อที่จะเพิ่มจำนวนเซลล์ หรือเพื่อทดแทนเซลล์ที่เกิดความเสียหายหรือเกิดการตาย การแบ่งตัวแบบนี้ทำให้เกิดเซลล์ใหม่หรือเซลล์ลูก (daughter cell) ขึ้น 2 เซลล์ จากเซลล์เดิมหรือเซลล์แม่ (mother cell) เซลล์เดียว โดยยังคงชนิดและจำนวนของโครโมโซมเหมือนกับเซลล์แม่ทุกอย่าง การแบ่งตัวของนิวเคลียสแบบไมโทซิสนี้ แบ่งออกได้เป็น 5 ระยะเวลาต่อเนื่องไม่มีการหยุดพักระหว่างขั้นตอน

1. ระยะเวลาอินเตอร์เฟส (interphase) เซลล์ที่อยู่ระยะนี้ ยังไม่ปรากฏโครโมโซมเป็นแท่ง ในนิวเคลียส แต่ที่เห็นได้ชัด คือ เยื่อหุ้มนิวเคลียสและนิวคลีโอลัส (nucleolus) และเซลล์ในระยะนี้มีการเพิ่มกิจกรรมภายในเซลล์ที่สูงที่สุด มีการเมแทบอลิซึม (metabolism) ที่สูง มีการเตรียมสารอาหารให้พร้อมต่อการแบ่งเซลล์ และมีขนาดใหญ่ขึ้น

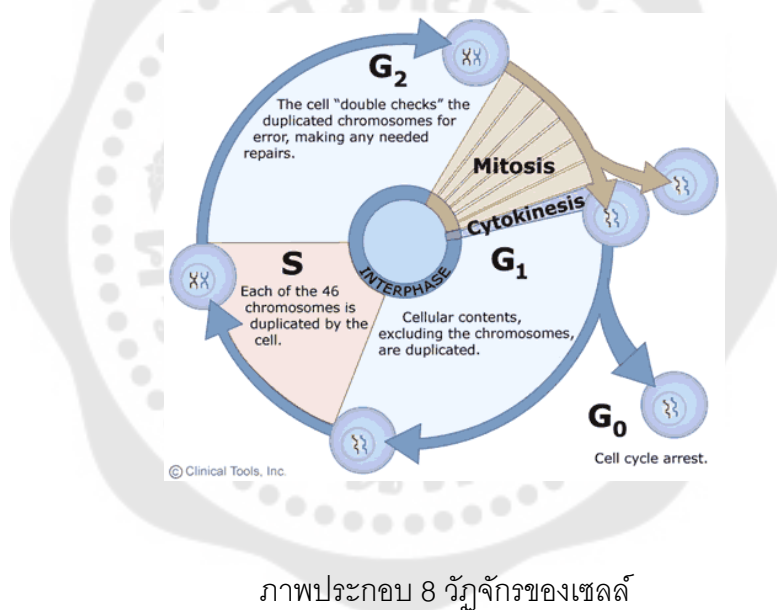
2. ระยะเวลาโพรเฟส (prophase) ในระยะนี้โครโมโซมจะปรากฏเป็นแท่งที่ประกอบด้วย 2 โครมาทิด ซึ่งยังมีไคนेटออร์ยึดติดกันอยู่ที่บริเวณ เซนโทรเมียร์ (centromere) ในขณะเดียวกัน ในกรณีของเซลล์สัตว์ เซนโทรโซม (centrosome) จะจำลองตัวเองออกเป็น 2 เซนโทรโซม แต่ละเซนโทรโซมจะเคลื่อนตัวแยกจากกันไปคนละฝั่งขั้วของเซลล์ จากนั้นจะเกิดเส้นใยสปินเดิล (spindle fiber) ขึ้น โดยปลายฝั่งหนึ่งจะยึดกระจุกรวมกันตรงขั้วของเซลล์ส่วนปลายอีกฝั่งหนึ่งของเส้นใยแต่ละเส้น จะยึดบริเวณเซนโทรเมียร์ของโครโมโซมแต่ละแท่ง เยื่อหุ้มนิวเคลียส และนิวคลีโอลัสจะมีการสลายในตอนช่วงท้ายของระยะนี้

3. ระยะเวลาเมทาเฟส (metaphase) เป็นระยะที่โครโมโซมที่มี 2 โครมาทิดแต่ละแท่ง เคลื่อนที่มาอยู่ตรงกึ่งกลางของเซลล์ และเส้นใยสปินเดิลที่ยึดไว้ในขั้นตอนก่อนหน้านี้ เตรียมที่จะดึงโครมาทิดแต่ละข้างให้แยกออกจากกันไปยังคนละคนละฝั่งขั้วของเซลล์ตรงข้ามกัน

4. ระยะเวลาแอนาเฟส (anaphase) ระยะนี้โครมาทิดแต่ละแท่งของโครโมโซม จะถูกดึงให้แยกออกจากกันด้วยเส้นใยสปินเดิลแล้วเคลื่อนที่ไปยังแต่ละฝั่งขั้วของเซลล์ โดยโครมาทิดที่ถูกดึงแยกจากกันนี้ จะถูกเรียกใหม่ว่าโครโมโซมลูก (daughter chromosome)

5. ระยะเทโลเฟส (telophase) เป็นระยะหลังจากที่โครโมโซมลูกเคลื่อนมารวมกันที่ขั้วของเซลล์แต่ละฝั่งแล้ว โครโมโซมลูกจะเกิดการคลายตัวออกเป็นเส้นใยที่เรียกว่าโครมาทิน (Chromatin) เส้นใยสปินเดิลจะมีการสลายตัวไป เกิดเยื่อหุ้มนิวเคลียสและนิวคลีโอลัสเข้ามาล้อมรอบเส้นใยโครมาทินที่คลายตัวแล้ว ระยะนี้เซลล์จะปรากฏนิวเคลียส 2 นิวเคลียสในตอนท้ายระยะ ซึ่งถือว่าเสร็จสิ้นระยะของกระบวนการแบ่งตัวของนิวเคลียส จากนั้นจะกระบวนการแบ่งตัวของไซโทพลาซึมจะเกิดขึ้นต่อทันที เพื่อที่จะเป็นเซลล์ลูก 2 เซลล์โดยสมบูรณ์

ทั้งนี้กระบวนการแบ่งเซลล์เป็นกระบวนการที่มีความต่อเนื่องไม่หยุดพัก ดังนั้นก่อนที่จะมีการแบ่งเซลล์เกิดขึ้น เซลล์จะต้องมีการเตรียมความพร้อมก่อนเสมอ ซึ่งช่วงระยะเวลาที่เซลล์เตรียมความพร้อม การแบ่งนิวเคลียส ไปจนเสร็จสิ้นการแบ่งไซโทพลาซึมและได้เซลล์ลูก ถูกเรียกว่า วัฏจักรของเซลล์ (cell cycle) ซึ่งมีเฉพาะในการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส



ภาพประกอบ 8 วัฏจักรของเซลล์

ที่มา: <https://sites.google.com/site/celldivisionandgenetics/wad-cakr-sell>

โดยวัฏจักรของเซลล์ หมายถึง ช่วงระยะเวลาการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ ในขณะที่เซลล์มีการแบ่งตัว ซึ่งประกอบด้วย 2 ระยะได้แก่ การเตรียมตัวให้พร้อมที่จะแบ่งตัว และกระบวนการแบ่งเซลล์

1. ระยะอินเตอร์เฟส (interphase) ระยะนี้เป็นระยะเตรียมตัวที่จะแบ่งเซลล์ในวัฏจักรของเซลล์ แบ่งออกเป็น 3 ระยะย่อย คือ

1.1 ระยะเวลา G1 เป็นระยะก่อนการสร้าง (deoxyribonucleic acid: DNA) ซึ่งเซลล์มีการเจริญเติบโตเต็มที่ ระยะเวลาจะมีการสร้างสารบางอย่าง เพื่อใช้สร้างสารพันธุกรรมในระยะต่อไป

1.2 ระยะเวลา S เป็นระยะการจำลองตัวเองของดีเอ็นเอ (DNA replication) โดยเซลล์มีการเจริญเติบโต และมีการสังเคราะห์สารพันธุกรรมอีก 1 ตัว หรือมีการจำลองโครโมโซมอีก 1 เท่าตัว แต่โครโมโซมที่จำลองขึ้นยังติดกับท่อนเก่าที่ปมเซนโทรเมียร์ (centromere) หรือไคเนโตคอร์ (kinetochore) ซึ่งระยะนี้ใช้เวลานานที่สุด

1.3 ระยะเวลา G2 เป็นระยะหลังสร้างสารพันธุกรรม ซึ่งเซลล์มีการเจริญเติบโต และเตรียมพร้อมที่จะแบ่งโครโมโซม และไซโทพลาสซึมต่อไป

2. ระยะเวลา M (M-phase) เป็นระยะที่มีการแบ่งนิวเคลียส และแบ่งไซโทพลาสซึม ซึ่งโครโมโซมจะมีการเปลี่ยนแปลงหลายขั้นตอน ก่อนที่จะถูกแบ่งแยกออกจากกัน ประกอบด้วย 4 ระยะย่อย คือ โพรเฟส เมทาเฟส แอนาเฟส และเทโลเฟส

ในเซลล์บางชนิด เช่น เซลล์ไข่กระดูก เซลล์บุผิว พบว่าเซลล์จะมีการแบ่งตัวอยู่เกือบตลอดเวลา จึงกล่าวได้ว่า เซลล์เหล่านี้อยู่ในวัฏจักรของเซลล์ตลอด แต่เซลล์บางชนิดเมื่อแบ่งเซลล์แล้วจะไม่มี การแบ่งตัวอีกต่อไป นั่นคือ เซลล์จะไม่เข้าสู่วัฏจักรของเซลล์อีก แต่จะเข้าสู่ G0 จนกระทั่งเซลล์ชราภาพ (cell aging) และตายไป (cell death) ในที่สุด แต่เซลล์บางชนิดจะพักตัวหรืออยู่ใน G0 ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ถ้าจะกลับมาแบ่งตัวอีกก็จะเข้าวัฏจักรของเซลล์ต่อไป

5.2.1.2 การแบ่งตัวของนิวเคลียสแบบไมโอซิส (meiosis)

เป็นการแบ่งนิวเคลียสของเซลล์ เพื่อให้เซลล์ที่ได้ไปทำหน้าที่เป็นเซลล์สืบพันธุ์ (gamete) ขบวนการนี้มีการเปลี่ยนแปลงของโครโมโซม ซึ่งดำเนินติดต่อกันไป โดยแบ่งได้เป็น 2 ชั้นใหญ่ๆ คือ

1. การแบ่งแบบไมโอซิสขั้นที่ 1 (meiosis - I) หรือ reductional division ขั้นตอนนี้จะมีการแยกโฮโมโลกัสโครโมโซม (homologous chromosome) ออกจากกัน เป็นระยะที่มีการลดจำนวนโครโมโซมจากเดิมลงครึ่งหนึ่ง คือ จากเซลล์ เริ่มต้นที่มีจำนวนโครโมโซมเป็นดิพลอยด์ (2n) จะได้เซลล์ที่มีโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ 2 เซลล์ ไมโอซิสขั้นที่ 1 แบ่งออกเป็นระยะต่างๆ 4 ระยะ ได้แก่

1.1 โพรเฟส 1 (prophase I) เป็นระยะที่มีความซับซ้อนมากที่สุด

1.2 เมทาเฟส 1 (metaphase I) เยื่อหุ้มนิวเคลียสจะสลายไป

1.3 แอนาเฟส 1 (anaphase I) ระยะนี้เซนโทรเมียร์จะยังไม่แบ่งตัว จาก 1 เป็น 2

1.4 เทโลเฟส 1 (telophase I) โครโมโซมที่ขั้วเซลล์มีจำนวน โครโมโซมลดลงครึ่งหนึ่ง

2. การแบ่งแบบไมโอซิสขั้นที่ 2 (meiosis II) หรือ equational division เป็นระยะที่คล้ายคลึงกับการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส ขั้นตอนนี้จะมีการแยกโครมาทิดออกจากกัน เกิดขึ้น เมื่อสิ้นสุดระยะนี้จะได้ 4 เซลล์ มีโครโมโซมเป็นแฮพลอยด์ และ 4 เซลล์นี้ จะมีจำนวน โครโมโซม และพันธุกรรมแตกต่างจากเซลล์เริ่มต้น จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นเซลล์สืบพันธุ์ ไมโอซิสขั้น ที่ 2 จะมีการจำลองโครโมโซมขึ้นอีกในสิ่งมีชีวิตชั้นสูง สามารถแบ่งออกเป็นระยะต่างๆ 4 ระยะ ประกอบด้วย

2.1 โพรเฟส 2 (prophase – II) โครโมโซมของแต่ละเซลล์จะเริ่ม ปรากฏขึ้นมาใหม่

2.2 เมทาเฟส 2 (metaphase – II) เยื่อหุ้มนิวเคลียสหายไป แต่ละ โครโมโซมที่ประกอบด้วย 2 โครมาทิด จะเคลื่อนตัวมาเรียงบริเวณตรงกลางเซลล์

2.3 แอนาเฟส 2 (anaphase – II) เซนโทรเมียร์ของแต่ละโครโมโซม จะแบ่งตัวจาก 1 เป็น 2 และโครมาทิดจะแยกออก

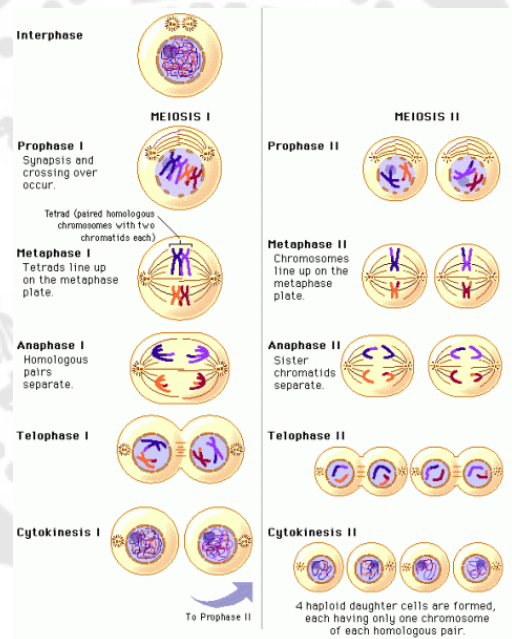
2.4 เทโลเฟส 2 (telophase – II) จะเกิดเยื่อหุ้มนิวเคลียสขึ้นมา ล้อมรอบโครโมโซมที่ขั้ว เมื่อเกิดการแบ่งไซโทพลาซึมอีกจะได้เซลล์ลูก 4 เซลล์

ผลที่ได้จากการแบ่งเซลล์แบบนี้จะได้เซลล์ใหม่เกิดขึ้น 4 เซลล์ จากเซลล์เดิม เพียง 1 เซลล์ แต่ละเซลล์จะมีจำนวนโครโมโซมเพียง 1 ชุด ในแต่ละขั้นของการแบ่งเซลล์จะมีการ เปลี่ยนแปลงเป็นระยะๆ ด้วยการแบ่งเซลล์แบบไมโทซิส คือ มีระยะอินเตอร์เฟส โพรเฟส เมทาเฟส แอนาเฟส และเทโลเฟสตามลำดับ แต่มีข้อแตกต่างกัน สรุปได้ว่า ในขั้นแรกของการแบ่ง นิวเคลียส แบบไมโอซิส จะมีปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นต่างไปจากการแบ่งแบบไมโทซิส คือ ในระยะโพรเฟส หลังจากที่โครโมโซม แต่ละแท่งจำลองตัวเองแล้วแท่งที่เป็นคู่กัน หรือเป็นฮอมอโลกัส โครโมโซมกันจะมาเข้าคู่ขนานกัน ดังนั้นฮอมอโลกัส โครโมโซมแต่ละคู่ในระยะนี้จะเห็นเป็น 4 โครมาทิด ในระยะต่อมาจะมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับการแบ่งแบบไมโทซิส จนกระทั่งระยะแอนนาเฟสฮอมอโลกัสโครโมโซมที่จะเข้าสู่คู่กันนั้น จะแยกออกจากกันไปยังคนละขั้วของเซลล์แล้วมีการ แบ่งได้ 2 เซลล์ เซลล์แต่ละเซลล์ที่ได้ในขั้นนี้จะมีจำนวนโครโมโซมลดลงครึ่งหนึ่งของจำนวนเดิม แต่ว่าโครโมโซมแต่ละแท่งจะประกอบด้วย 2 โครมาทิด ส่วนในขั้นที่สองของการแบ่งแบบไมโอซิส

มีการเปลี่ยนแปลงของนิวเคลียสที่ต่างไปจากการแบ่งไมโทซิส คือ ในระยะโพรเฟสโครโมโซมแต่ละแท่งที่ประกอบด้วย 2 โครมาทิด จะไม่มีการจำลองโครโมโซมแต่แต่ละแท่งจะแยกออกจากกันไปขั้วตรงกันข้ามของเซลล์แล้วเข้าร่วมกลุ่มที่ขั้วของเซลล์ในระยะเทโลเฟส แสดงดังภาพประกอบ 9

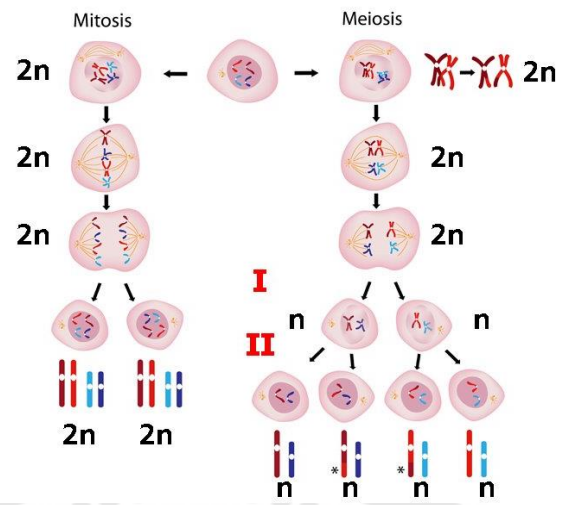
5.2.2 การแบ่งตัวของไซโทพลาซึม (cytokinesis)

มีด้วยกัน 2 ลักษณะ คือ การเกิดร่องแบ่ง (furrow type) ในเซลล์สัตว์ และการสร้างผนังกัน (cell plate type) ในเซลล์พืช โดยการเกิดร่องแบ่งในเซลล์สัตว์ เยื่อหุ้มเซลล์จะคอดกึ่งจากทั้ง 2 ด้านเข้าสู่ใจกลางเซลล์ จากการเคลื่อนตัวของไมโครฟิลาเมนต์ (microfilament) หรือเส้นใยโปรตีนที่อยู่ใต้เยื่อหุ้มเซลล์ ทำการแบ่งไซโทพลาซึมของเซลล์สัตว์ออกเป็น 2 ส่วน สุดท้ายเกิดเป็นเซลล์ใหม่ขึ้นจำนวน 2 เซลล์



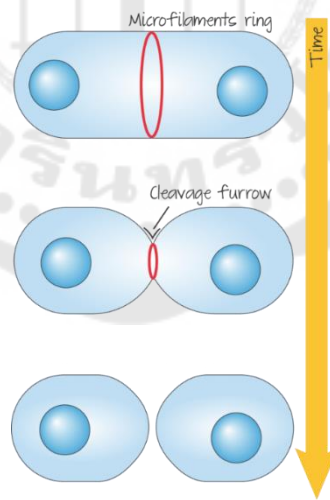
ภาพประกอบ 9 การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส

ที่มา: <https://karimedalla.wordpress.com/2013/01/30/4-210-1-meiosis/>



ภาพประกอบ 10 การแบ่งเซลล์แบบไมโอซิส และแบบไมโทซิส

ที่มา: <https://www.trueplookpanya.com/knowledge/content/65617/-scibio-sci->



ภาพประกอบ 11 การเกิดร่องแบ่งในเซลล์สัตว์

ที่มา: <https://ngthai.com/science/28058/cell-division>

5.3 การตายของเซลล์

การเปลี่ยนแปลงของเซลล์ที่ได้รับอันตรายนั้น อาจจะสามารถกลับคืนสู่สภาพปกติได้ หรืออาจจะเกิดการตายของเซลล์ (cell death) แล้วแต่ความรุนแรงของอันตรายที่ได้รับ และความสามารถในการปรับตัวของเซลล์นั้นๆ รูปแบบของการเกิดการตายของเซลล์มีอยู่ 2 รูปแบบหลักๆ คือ นิโครซิส (Necrosis) และอะพอพโทซิส (apoptosis) โดยทั้งสองมีความแตกต่างกันคือ

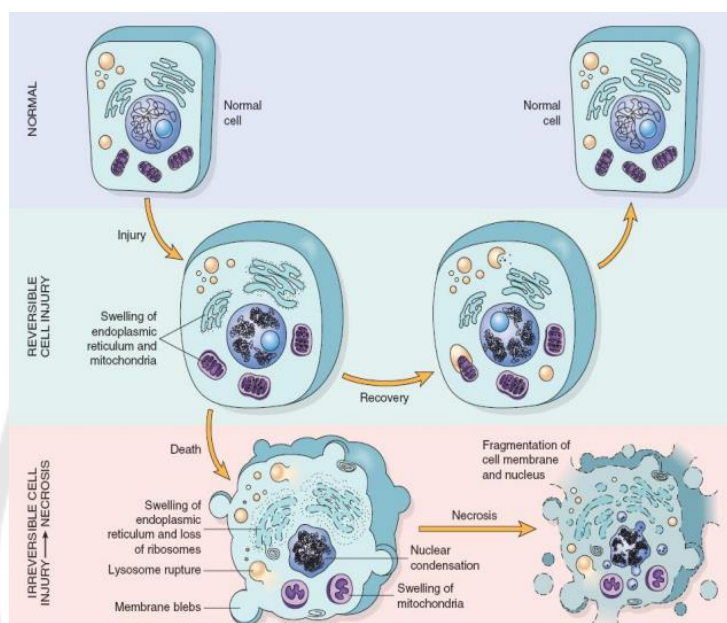
1. นิโครซิส (necrosis) เป็นการตายของเซลล์ที่ไม่มีแบบแผน สาเหตุมีได้หลายสาเหตุ เช่น เกิดจากการติดเชื้อ การขาดเลือดมาเลี้ยงเซลล์ หรือการได้รับสารเคมีที่ทำให้เซลล์ขาดเลือดไปเลี้ยงจนเกิดพยาธิสภาพขึ้น ลักษณะที่สังเกตได้คือเซลล์จะบวมและแตกเหมือนลูกโป่งน้ำที่เติมน้ำจนแตกออก ทำให้สิ่งที่อยู่ภายในไหลกระจัดกระจายออกมาภายนอก มักจะทำให้ร่างกายเกิดการแพ้ หรืออักเสบขึ้น

2. อะพอพโทซิส (apoptosis) มีสาเหตุเกิดจากภายในเซลล์ที่เป็นผู้กำหนดเอง โดยเหนี่ยวนำให้เกิดการตายของเซลล์ขึ้น (suicide program) เป็นการตายแบบมีแบบแผนที่ชัดเจน ซึ่งกระบวนการเกิดอะพอพโทซิสนี้สามารถพบได้ในภาวะปกติของร่างกายด้วยทั้งนี้เพื่อกำจัดเซลล์ที่ไม่ต้องการ โดยจะไม่ทำให้ร่างกายเกิดการอักเสบหรือตอบสนองในรูปแบบการแพ้ ลักษณะที่เห็นได้ชัดคือการเกิดกระเปาะขึ้นเรื่อยๆ ของเซลล์กระจายออกมา

5.3.1 การตายแบบนิโครซิส (Necrosis)

การตายแบบนิโครซิส เป็นการตายของเซลล์ที่เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงในนิวเคลียสเป็นหลัก จึงเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ถาวร บางครั้งอาจเป็นภาวะที่เซลล์ไม่สามารถฟื้นกลับเป็นปกติได้ (Irreversible cell injury) นอกจากนี้แล้ว นิโครซิสยังอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไซโทพลาซึม (cytoplasm) การเปลี่ยนแปลงนี้ เซลล์สามารถกลับเป็นเซลล์ปกติได้ ส่วนใหญ่เกิดจากการขาดออกซิเจน ซึ่งจะทำให้ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) สร้าง ATP (adenosine triphosphate: ATP) ไม่ได้ การขาดพลังงานทำให้การขับแร่ธาตุต่างๆ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ผิดปกติ ทำให้เกิดการคั่งของโซเดียม และแคลเซียมอยู่ภายในเซลล์มาก โซเดียมจะดึงน้ำเข้าเซลล์ทำให้เกิดเซลล์บวม ส่วนแคลเซียมจะค้างอยู่ในไมโทคอนเดรีย ทำให้การสร้าง ATP ยากมากขึ้น เซลล์จึงต้องสร้าง ATP จากกระบวนการไม่ต้องใช้ออกซิเจน (Anaerobic pathway) ทำให้ได้กรดแลคติกมากขึ้น ค่า pH (Potential of Hydrogen ion: pH) ในเซลล์ลดลง จากภาวะต่างๆ เหล่านี้จะทำให้เกิดเซลล์บวม และภาวะความเป็นกรดที่มากขึ้น อาจทำให้เกิดการรั่วของน้ำย่อยไลโซโซม (Lysosomal enzyme) มาทำลายเซลล์ได้ ส่วนการเปลี่ยนแปลงชนิดที่มีผลต่อนิวเคลียส เป็นการเปลี่ยนแปลงถาวรที่เซลล์ไม่สามารถกลับเป็นเซลล์ปกติได้ หรือเกิดการขาดออกซิเจนอย่างต่อเนื่องไมโทคอนเดรียจะเกิดการบวมของเยื่อหุ้มเซลล์ จะมีรอยแยกส่วนประกอบ

ของเซลล์ที่เป็นไขมัน และโปรตีน นิวเคลียส และเอนโดพลาสมิกเรติคูลัม (endoplasmic reticulum: ER) จะหมดสภาพไป โดยการแยกตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ จัดเป็นภาวะวิกฤติที่เซลล์ไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้ดังแสดงในภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 12 การตายแบบนิโครซิส

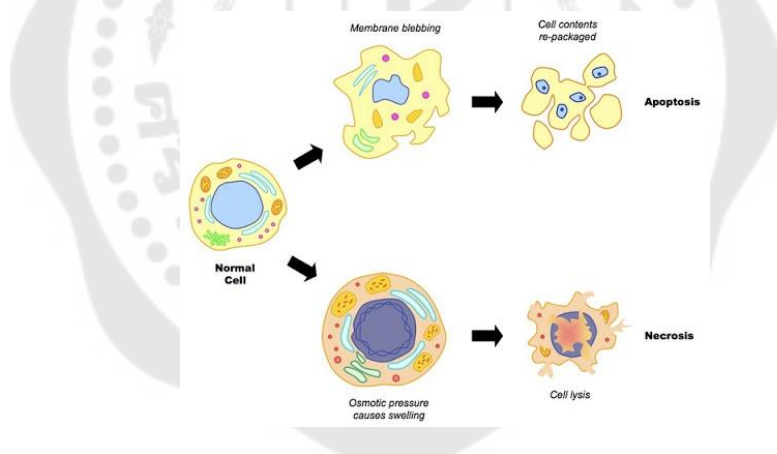
ที่ มา : [http://www.kpi.msu.ac.th/upload/ag_tor_ref_byval/ag_16_in_1.2.4_634\(2555\).pdf](http://www.kpi.msu.ac.th/upload/ag_tor_ref_byval/ag_16_in_1.2.4_634(2555).pdf)

5.3.2 การตายแบบอะพอพโทซิส (apoptosis)

การเนี่ยวนำให้เกิดการตายของเซลล์ หรืออะพอพโทซิส (apoptosis) บางครั้งจะเรียกว่าแบบแผนการตายของเซลล์ (programmed cell death) เป็นการควบคุมสมดุลระหว่างการแบ่งตัวของเซลล์ และการตายของเซลล์ที่จำเป็นสำหรับพัฒนาการของสิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ ปัจจุบันมีข้อมูลที่ทำให้สามารถอธิบายการเกิดอะพอพโทซิสได้มากขึ้น โดยพบว่าอะพอพโทซิสสามารถถูกกระตุ้นจากปัจจัยภายนอกเซลล์ได้จากสาเหตุต่างๆ เช่น การกลายพันธุ์ โรคมะเร็ง การติดเชื้อไวรัส โรคทางระบบภูมิคุ้มกัน และโรคทางระบบประสาท เป็นต้น ส่งผลให้เกิดโรคต่างๆ ในมนุษย์ได้

รูปแบบการตายของเซลล์แบบอะพอพโทซิส เนื่องจากอะพอพโทซิสเป็นรูปแบบการตายที่มีการควบคุม ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมจำนวนเซลล์ ในการพัฒนาการเจริญทางสรีรวิทยาของสิ่งมีชีวิตไม่ว่าจะเป็นกระบวนการพัฒนาการของเซลล์ในการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ (differentiation) ในขั้นตอนของการเกิดอะพอพโทซิสนั้นจะมีการหดของเซลล์ โครมาตินจับกันแน่น (chromatin condensation) ทำให้เกิดการแยกสลายของเซลล์เป็นรูปแบบที่เรียกว่า อะพอพโทติกบอดี (apoptotic bodies) ซึ่งจะถูกเก็บกิน และย่อยสลายอย่างรวดเร็วโดยเซลล์แมคโครเฟจ (macrophage) หรือเซลล์ข้างเคียง

การตายของเซลล์เป็นขบวนการพื้นฐานต่อพัฒนาการที่ปกติ และสำคัญต่อการควบคุมสมดุลของเนื้อเยื่อ (tissue homeostasis) ของสิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ สำหรับมนุษย์เองก็มีการควบคุมระหว่างการเจริญของเซลล์ และการตายของเซลล์โดยจะมีการตายของเซลล์ถึง 10^9 เซลล์ต่อวัน ซึ่งการเกิดอะพอพโทซิสเป็นรูปแบบการตายที่ต้องใช้พลังงาน (แบบนิโครซิสไม่ต้องใช้พลังงาน) โดยจะใช้พลังงานในขบวนการตายดังแสดงในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 การตายของเซลล์แบบอะพอพโทซิส และแบบนิโครซิส

ที่มา: www.vce.bioninja.com.au/aos-3-heredity/cell-reproduction/cell-death.html

5.4 วิธีการเพาะเลี้ยงเซลล์หรือเนื้อเยื่อ

วิธีการเพาะเลี้ยงเซลล์หรือเนื้อเยื่อเป็นวิธีการศึกษาโดยการนำเซลล์ หรือชิ้นส่วนเนื้อเยื่อชนิดใดชนิดหนึ่ง หรือมากกว่าหนึ่งชนิดจากตัวอ่อนเพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการภายใต้สภาพแวดล้อมพื้นฐานที่ถูกจัดขึ้น เพื่อให้เซลล์หรือเนื้อเยื่อนำออกมาเพาะเลี้ยงสามารถเจริญเติบโตได้ โดยนำเซลล์หรือชิ้นส่วนเนื้อเยื่อมาเพาะเลี้ยงในงานเพาะเลี้ยงภายในตู้บัพที่มีการ

ควบคุมอุณหภูมิให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิร่างกายของสิ่งมีชีวิตคือ 37 องศาเซลเซียส มีระดับคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 5 และมีความชื้นที่เหมาะสม โดยทั่วไปเซลล์ และเนื้อเยื่อจะถูกเลี้ยงอยู่ในอาหารเลี้ยงเซลล์ ซึ่งมีอาหารที่จำเป็นต่อเซลล์ในการเจริญเติบโต ได้แก่ น้ำตาล กลูโคส กรดอะมิโน เกลือแร่ และวิตามิน นอกจากนี้ยังมีการเติมซีรัม (serum) จากสัตว์ ลงไปในอาหารเลี้ยงเซลล์เพื่อเพิ่ม สารบางชนิดซึ่งไม่มีอยู่ในอาหารเลี้ยงเซลล์แต่มีความจำเป็นในการเจริญเติบโตของเซลล์ เช่น โปรตีน ไขมัน และโกรทแฟกเตอร์ (growth factor) รวมทั้งมีการใส่สารซึ่งมีคุณสมบัติในการบ่งชี้สภาวะความเป็นกรด-ด่าง เนื่องจากเซลล์ส่วนใหญ่ สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่ระดับ 7.4

เซลล์จากตัวอ่อนที่นำมาเพาะเลี้ยงได้มาจากการย่อยเนื้อเยื่อด้วยเอนไซม์ แล้วปั่นแยกเซลล์เพื่อนำมาเพาะเลี้ยง หรือนำชิ้นส่วนเนื้อเยื่อ ซึ่งมีเซลล์ที่ต้องการศึกษามาวางในจานเพาะเลี้ยง ทำการเพาะเลี้ยงกระทั่งมีเซลล์เจริญ และคลานออกมาจากชิ้นส่วนเนื้อเยื่อ เรียกว่า การเพาะเลี้ยงเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell culture) เซลล์ที่ได้สามารถนำไปเพาะเลี้ยง และศึกษาต่อสำหรับเซลล์ที่อยู่ในเนื้อเยื่อที่มีลักษณะเป็นของเหลว เช่น เลือด หรือไขกระดูก การนำเซลล์ออกมาเพาะเลี้ยงสามารถทำได้โดยการล้างเนื้อเยื่อนั้นด้วยสารละลายบัฟเฟอร์หรืออาหารเลี้ยงเซลล์ นำเซลล์ที่ได้ไปปั่นแยก ก่อนนำมาเพาะเลี้ยงในจานเพาะเลี้ยง โดยบางเซลล์จะถูกคัดเลือกเพื่อเป็นเซลล์ไลน์ (cell line) สำหรับเก็บไว้ใช้ในการศึกษาในอนาคต



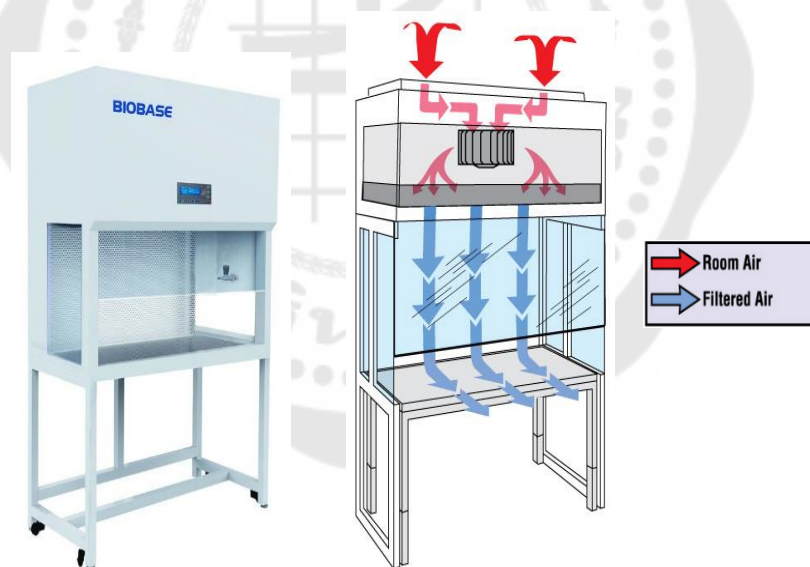
ภาพประกอบ 14 การเพาะเลี้ยงเซลล์ภายในเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์

ที่มา: <https://www.benchmarkscientific.com/product/h3551-45p>

การศึกษาด้วยวิธีการเพาะเลี้ยงเซลล์หรือเนื้อเยื่อ นิยมใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของเซลล์หรือเนื้อเยื่อในด้านการเจริญเติบโต การเพิ่มจำนวน และการเปลี่ยนแปลงสภาพเซลล์ โดยทำการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเซลล์ และสามารถเพาะเลี้ยงร่วมกับสารที่ต้องการศึกษา เช่น โกรทแฟคเตอร์ (growth factor) หรือโปรตีนต่างๆ สารดังกล่าวอาจใส่ลงไป ในอาหารเลี้ยงเซลล์โดยตรง หรือใช้ตัวนำพา เช่น เม็ดอะกาโรส (Agarose bead) เป็นตัวพาสารนั้นๆ การศึกษาด้วยวิธีการนี้เป็นประโยชน์ และเหมาะสำหรับใช้ในการศึกษาคุณสมบัติของเซลล์ต้นกำเนิด ได้แก่ ความสามารถในการคงสภาพความเป็นเซลล์ต้นกำเนิด ความสามารถในการเพิ่มจำนวนเซลล์ และความสามารถในการเปลี่ยนแปลงสภาพเซลล์

5.5 เครื่องมือ และอุปกรณ์พื้นฐานในการเพาะเลี้ยงเซลล์

1. ตู้ปลอดเชื้อ (laminar flow cabinet) เป็นเครื่องมือพื้นฐานจำเป็นสำหรับห้องปฏิบัติการโดยเฉพาะห้องปฏิบัติการทางชีววิทยา ตู้ปลอดเชื้อมักใช้กับงานที่ต้องการความปลอดภัยทางชีววิทยาสูง เช่น การเลี้ยงเชื้อ และการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ



ภาพประกอบ 15 ตู้ปลอดเชื้อ

ที่มา: <https://www.nanasupplier.com/greentech/p-112485>

2. เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuges) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเพิ่มแรงโน้มถ่วงให้กับสารที่แขวนลอยในสารละลาย หรือใช้ในการแยกสารตัวอย่างที่ไม่ละลาย หรือแยกตะกอนออกจากสารละลาย โดยอาศัยการเคลื่อนที่ของสารตัวอย่างรอบแกน หรือภายใต้สนามการหมุนเหวี่ยง (centrifugal field)



ภาพประกอบ 16 เครื่องปั่นเหวี่ยง

ที่มา: www.overstocklabequipment.com/Hermle-Z206-A-Centrifuge-p/z206a.html

3. เครื่องบ่มเซลล์เพาะเลี้ยง (CO₂ incubator) เป็นเครื่องที่ใช้ควบคุมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิให้คงที่ โดยให้ทำงานที่ 5 เปอร์เซ็นต์ และ 37 องศาเซลเซียสตามลำดับ



ภาพประกอบ 17 เครื่องบ่มเซลล์เพาะเลี้ยง

ที่มา: <https://tritechinc.com/product/benchmark-co2-incubators/>

4. กล้องจุลทรรศน์ (microscopes) เพื่อใช้ในการตรวจสอบคุณภาพเซลล์ที่เพาะเลี้ยงในขวดเพาะเลี้ยงเซลล์ (flask) หรือ ถาดเลี้ยงเซลล์ (plates) ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็น และเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากที่สามารถรับรู้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ในระหว่างเพาะเลี้ยงเซลล์ เนื่องจากเป็นข้อบ่งชี้แรกของการเสื่อมสภาพของการเพาะเลี้ยงเซลล์



ภาพประกอบ 18 กล้องจุลทรรศน์

ที่มา: <https://www.spachoptics.com/OLYMPUS-CKX41-p/olympus-ckx41.html>

5. ภาชนะสำหรับเพาะเลี้ยง (culture vessels) เป็นภาชนะที่ใช้เลี้ยงเซลล์ จะมี 2 ชนิด คือ ถาดเลี้ยงเซลล์ (plates) และขวดเพาะเลี้ยงเซลล์ (flask)



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 19 ภาชนะที่ใช้เลี้ยงเซลล์

(ก) ถาดเลี้ยงเซลล์ (plates) (ข) ขวดเพาะเลี้ยงเซลล์ (flask)

ที่มา: <https://www.labmanager.com/product-focus/what-to-look-for-in-cell-culture-vessels-3878>

6. ออโตปิเปต (auto-pipette) อุปกรณ์ที่ใช้ดูดสารละลาย ใช้สำหรับดูดของเหลวที่มีปริมาณน้อยในระดับไมโครลิตร และมิลลิลิตร เป็นอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูง ลักษณะเป็นด้ามดูดใช้คู่กับส่วนที่ดูด



ภาพประกอบ 20 ออโตปิเปต

ที่มา: <https://www.rpicorp.com/products/laboratory-equipment/liquid-handling/biopette-plus-0-2-2ul.html>

7. หลอดไมโครเซนติฟิวก์ (microcentrifuge tube หรือ eppendorf tube) ทำจากพลาสติกชนิด Polypropylene (PP) สามารถนำเข้าหม้อนึ่งฆ่าเชื้อได้ (Autoclavable) ที่อุณหภูมิ 121°C แช่แข็งได้ (Freezable) ถึง -80°C และทนแรงปั่นเหวี่ยงสูงสุดได้ถึง 16,000 กรัม



ภาพประกอบ 21 หลอดไมโครเซนติฟิวก์

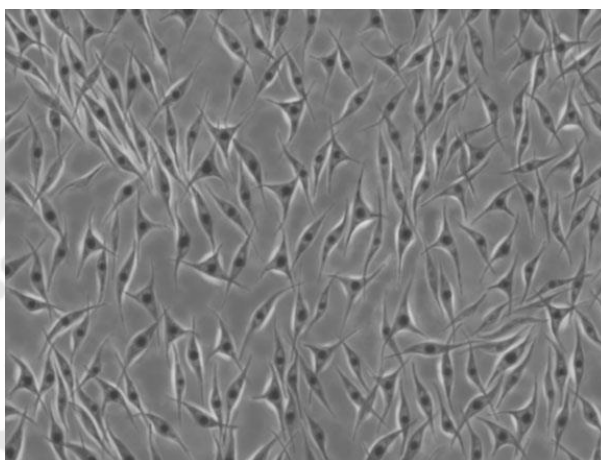
ที่มา: <https://www.monotaro.co.th/g/01486478/>

5.6 สัณฐานวิทยาของเซลล์

การศึกษาการสัณฐานวิทยาของเซลล์ คือการศึกษาถึงรูปร่างโครงสร้าง ลักษณะภายนอก และคุณสมบัติเฉพาะของโครงสร้าง โดยปกติแล้วการเพาะเลี้ยงเซลล์จะต้องมีการตรวจสอบสัณฐานวิทยาของเซลล์เพื่อที่จะสามารถยืนยันสถานะของเซลล์ ความผิดปกติ การปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมการมีอยู่ของเชื้อรา แบคทีเรีย หรือเซลล์ที่ไม่ได้มีความต้องการ จึงจะสามารถบอกได้ว่าการเพาะเลี้ยงเซลล์นั้นความสมบูรณ์ (Invitrogen G.Cell culture basics. life

technologies, 2014). สามารถที่จะนำไปเพาะเลี้ยงหรือนำไปใช้งานต่อไปได้ โดยลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์ โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม สามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะหลัก คือ

1. เซลล์รูปกระสวย (fibroblast-like cells) เป็นเซลล์ที่มีลักษณะยาวเรียวมีปลายแหลม 2 ข้าง (bipolar) หรือมากกว่า (multi polar) ซึ่งโดยจะเรียงตัวเกาะกับพื้นผิว แสดงดังภาพประกอบ 22

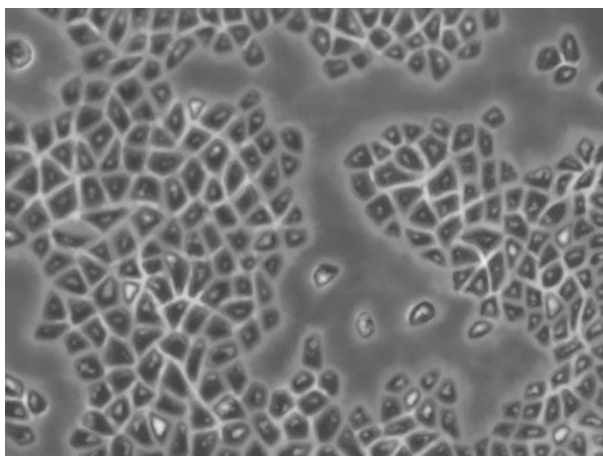


ภาพประกอบ 22 เซลล์รูปกระสวย (fibroblast-like cells)

ที่มา: <https://handling-solutions.eppendorf.com/cell-handling/reproducibility/scientific-background/identification/>

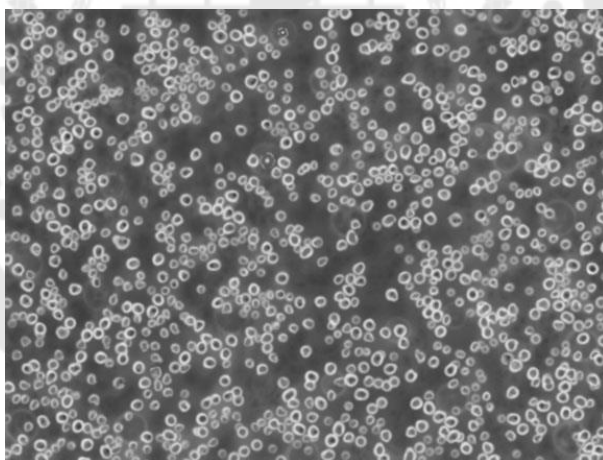
2. เซลล์เยื่อบุผิว (epithelial-like cells) เป็นเซลล์ที่มีหลายมุม (polygonal) เรียงตัวเป็นชั้นเดียวเกาะกับพื้นผิว แสดงดังภาพประกอบ 23

3. เซลล์ทรงกลม (lymphoblast – like cells) เป็นเซลล์ลักษณะทรงกลม มักเจริญในรูปแบบเซลล์แขวนลอยที่ไม่เกาะกับพื้นผิว แสดงดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 23 เซลล์เยื่อเมือ (epithelial-like cells)

ที่มา: <https://handling-solutions.eppendorf.com/cell-handling/reproducibility/scientific-background/identification/>



ภาพประกอบ 24 เซลล์ชนิดทรงกลม (lymphoblast – like cells)

ที่มา: <https://handling-solutions.eppendorf.com/cell-handling/reproducibility/scientific-background/identification/>

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณวิทยุ 6 ต่อเซลล์มนุษย์ ซึ่งมีแนวคิดมาจากงานวิจัยต่างๆ ดังนี้

6.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

จากงานวิจัย ในหัวข้อเรื่อง การสร้างเครื่อง CO₂ incubator อย่างง่ายสำหรับการศึกษาระดับเซลล์มนุษย์ ได้ทำการออกแบบ และสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อที่จะนำไปใช้ในการทดลองศึกษาผลกระทบของสนามไฟฟ้าต่อเซลล์มนุษย์ ซึ่งได้มีการพัฒนาปรับให้ตัวเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์นั้น มีความยืดหยุ่นต่อการนำไปใช้ต่อ ยอดในการทดลอง โดยมีราคาต้นทุนที่ต่ำลง วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ ที่นำมาสร้างเครื่องนี้ สามารถจัดหาซื้อได้ง่าย ผลการทดสอบสรุปได้ว่า เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์นี้ ทำงานได้ตรงตามมาตรฐาน สามารถรักษาระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้อยู่ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส เมื่อนำเซลล์ไปเลี้ยงในเครื่อง พบว่า เครื่องนี้สามารถทำการเลี้ยงเซลล์ได้จริง และมีอัตราการเจริญเติบโตที่ใกล้เคียงกับเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน(Nunchuen et al., 2019)

จากงานวิจัย ในหัวข้อเรื่อง Do It Yourself CO₂ Incubator with Adjustable Static Magnetic Field for Biological Research Laboratories ได้ทำการออกแบบ และสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำการต่อยอดจากงานวิจัยที่กล่าวไปโดยทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายนอกเครื่องและความเสถียรของเครื่อง CO₂ incubator อย่างง่าย ร่วมกับติดตั้งอุปกรณ์ปล่อยสนามแม่เหล็กเพื่อใช้ในการศึกษาผลกระทบของสนามแม่เหล็กโดยจากการทดลองนั้นสามารถยอมรับได้ว่าเครื่อง CO₂ incubator สามารถทำการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ได้จริง ในช่วงเวลา 36 ชั่วโมงเมื่อเปรียบเทียบกับ CO₂ incubator ที่มีในห้องทดลองและระบบสร้างสนามแม่เหล็กนั้นสามารถทำงานได้จริง (Songsiri et al., 2020)

6.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของสัญญาณวิทยุ

งานวิจัยในหัวข้อเรื่อง In situ detection of gliosis and apoptosis in brains of young rats exposed in utero to a Wi-Fi signal ได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ต่อหนูขาวที่กำลังท้องและยังมีชีวิตโดยทดลองในช่วงก่อนคลอดเป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อวันในช่วงท้องแก่ใกล้คลอด 2 สัปดาห์ (5 วันต่อสัปดาห์) สูดถ่าย และทดลองหลังคลอดต่อเป็นเวลา 5 สัปดาห์โดยใช้ระยะเวลาต่อวันเท่าเดิม โดยสนใจการวิเคราะห์ในเนื้อเยื่อสมองเพื่อค้นหาการเกิด gliosis หรือรอยแผลที่อาจจะเกิดขึ้นในสมองและการเกิดการตายของเซลล์แบบ apoptosis โดยหลังจากทำการทดลองไม่พบถึงความแตกต่างของลักษณะสมองของ

ลูกหนูและไม่พบการตายของเซลล์ ผู้วิจัยได้สรุปไว้ว่าไม่พบความเสียหายที่เกิดขึ้นจากสัญญาณวิทยุ (Ait-Aïssa et al., 2010)

งานวิจัยในหัวข้อเรื่อง Biological Effects of Wi-Fi Electromagnetic Radiation ได้ทำการศึกษาดังผลกระทบบของสัญญาณ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ต่อหนูขาวที่ยังมีชีวิต เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมงต่อวัน เป็นเวลา 6 เดือน โดยสนใจในส่วนของการวิเคราะห์เลือดเป็นหลัก ผลการทดลองแสดงถึงระดับค่าของเลือดมีจำนวนลดลงเช่น ระดับของ ฮีโมโกลบิน เม็ดเลือดแดง และยังมีภาวะโลหิตจาง พบว่าหลัง 3 เดือน พบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อในบางอวัยวะ เช่น หัวใจ สมอง ปอด ตับ เป็นต้น จากผลการทดลองซึ่งงานวิจัยนี้สรุปว่า สัญญาณ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์สามารถส่งผลกระทบต่อหนูขาว (Ishak et al., 2011)

งานวิจัยในหัวข้อเรื่อง Immunohistopathologic demonstration of deleterious effects on growing rat testes of radiofrequency waves emitted from conventional Wi-Fi devices เป็นการศึกษาดังผลกระทบบของสัญญาณ Wi-Fi ที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ต่ออวัยวะของหนู ด้วยการทดลองให้หนูสัมผัสต่อสัญญาณ Wi-Fi เป็นระยะเวลาต่อเนื่อง 20 สัปดาห์ แล้วนำเนื้อเยื่ออวัยวะของหนูมาวิเคราะห์ หลังจากการทดลองพบว่าเนื้อเยื่ออวัยวะของหนูนั้นมีการเสียหายของ DNA ที่ขึ้นอยู่กับการทำงานของเอนไซม์ที่เปลี่ยนไปงานวิจัยนี้จึงสรุปว่าสัญญาณ Wi-Fi นั้นมีผลกระทบต่อเนื้อเยื่ออวัยวะของหนูจากการสัมผัสกับสัญญาณ Wi-Fi ในระยะยาว (Atasoy et al., 2012)

งานวิจัยในหัวข้อเรื่อง Influence of Smartphone Wi-Fi Signals on Adipose-Derived Stem Cells ได้ศึกษาดังผลกระทบบของสัญญาณวิทยุ (Wi-Fi) ที่มาจากโทรศัพท์มือถือต่อเซลล์ต้นกำเนิดไขมัน (Adipose-Derived Stem Cells) การทดลองจะใช้วิธีทดลองในจานเพาะเชื้อภายนอกร่างกาย (in vitro) โดยทำการเลี้ยงเซลล์ในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO2 incubator) ภายใต้สัญญาณวิทยุที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งได้ทำการปล่อยสัญญาณจากโทรศัพท์มือถือที่อยู่ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 10 ชั่วโมงต่อวัน ต่อเนื่องกัน 5 วัน ผลที่ได้จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ไม่พบผลกระทบบของสัญญาณวิทยุที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ จากโทรศัพท์มือถือ ถึงจะมีการเพิ่มจำนวนของเซลล์แต่สาเหตุคาดว่ามาจากผลกระทบบด้านความร้อนของอุปกรณ์ (Lee et al., 2014)

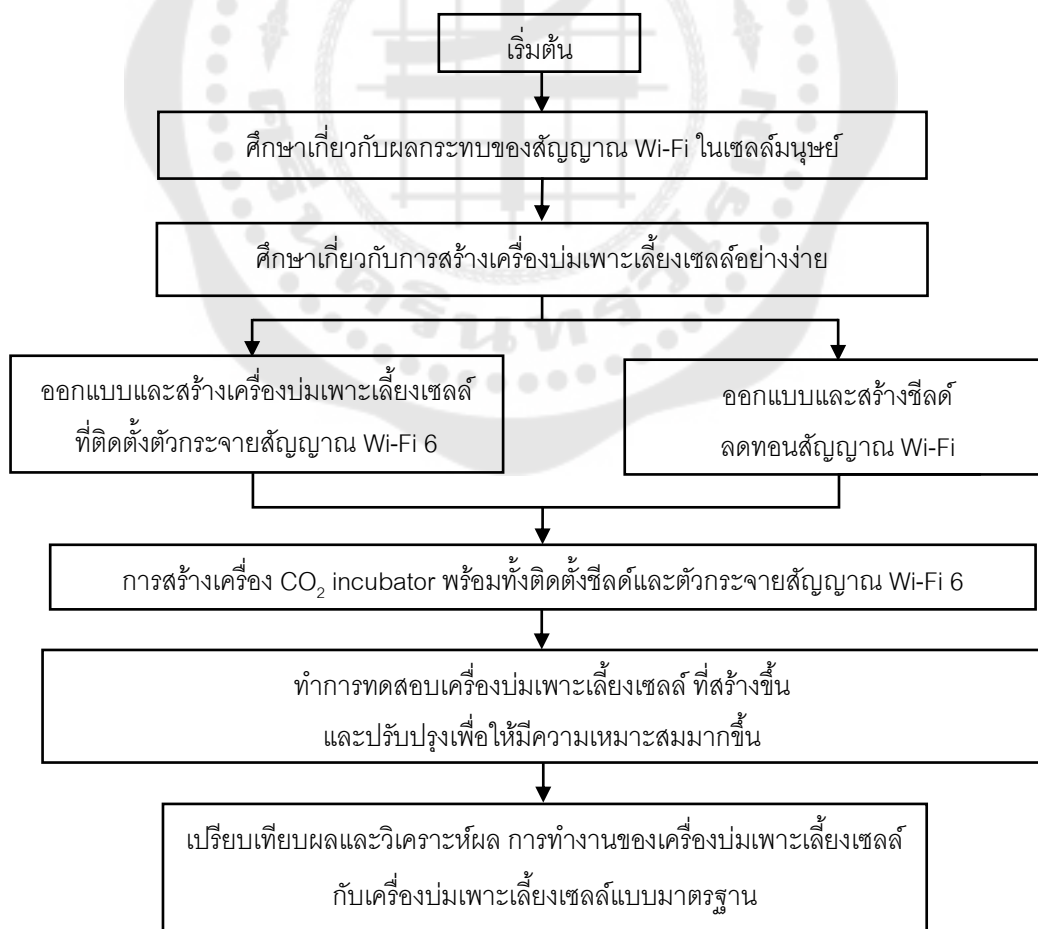
งานวิจัยในหัวข้อเรื่อง Effect of a 2.45 GHz radiofrequency electromagnetic field on neutrophil chemotaxis and phagocytosis in differentiated human HL-60 cells ได้ทำการศึกษาดังผลกระทบบของคลื่นสัญญาณแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ โดยทำการ

ทดลองกับเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาว HL-60 การทดลองนี้ได้ทำการทดลองเลี้ยงเซลล์ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่มีการปล่อยสัญญาณ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมงตามลำดับ กำหนดให้ระดับพลังงานไม่เกินภายใต้มาตรฐานของ ICNIRP(SAR 2W/Kg) ผลที่ได้จากการทดลอง คือ ไม่พบการตายของเซลล์ที่ผิดปกติ (phagocytosis หรือ chemotaxis) ที่แสดงถึงผลกระทบของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์(Koyama et al., 2015)

งานวิจัยในหัวข้อเรื่อง Low-power density radiations emitted from common Wi-Fi routers influence sperm concentration and sperm histomorphometric parameters: a new horizon on male infertility treatment ได้ศึกษาถึงผลกระทบของสัญญาณวิทยุเพื่อศึกษาถึงข้อดีทางชีวภาพที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยทำการทดลองกับหนูขาวเพศผู้กับสัญญาณวิทยุที่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ เป็นเวลา 2 ชั่วโมงต่อวัน 4 วันต่อเนื่องกัน โดยทำทั้งหมดรวม 35 วัน ผลการทดลองที่ได้พบว่ามีคามเข้มข้นของระดับสเปิร์มที่สูงขึ้นอีกทั้งยังพบถึงการพัฒนาส่วนของตัวสเปิร์มเช่น สเปิร์มมาติด ผู้วิจัยได้สรุปเอาไว้ว่าสัญญาณวิทยุนั้นส่งผลดีต่อความเข้มข้นของสเปิร์มและลักษณะภายนอกบางอย่างของสเปิร์ม (Delavarifar et al., 2020)

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

การสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายที่มีตัวกระจายสัญญาณไวฟาย โดยเริ่มจากศึกษาเกี่ยวกับการสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายที่มีตัวกระจายสัญญาณและซีลด์ลดทอนสัญญาณไวฟายจากภายนอก จากนั้นออกแบบเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายพร้อมๆ กับการออกแบบและติดตั้งซีลด์ลดสัญญาณไวฟายจากภายนอก จากนั้นทำการสร้างเครื่อง CO₂ incubator อย่างง่ายพร้อมทั้งติดตั้งซีลด์ตามที่ออกแบบ แล้วทดสอบการเพาะเลี้ยงเซลล์เทียบกับเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐานที่มีในห้องตลาด และทำการแก้ปัญหาและปรับปรุง แล้วจึงวิเคราะห์ความสามารถในการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ให้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาถึงผลกระทบของสัญญาณ Wi-Fi 6 ต่อเซลล์มนุษย์ต่อไปได้ แผนผังการทำงานโดยรวมของของงานวิจัย แสดงดังภาพประกอบ 25



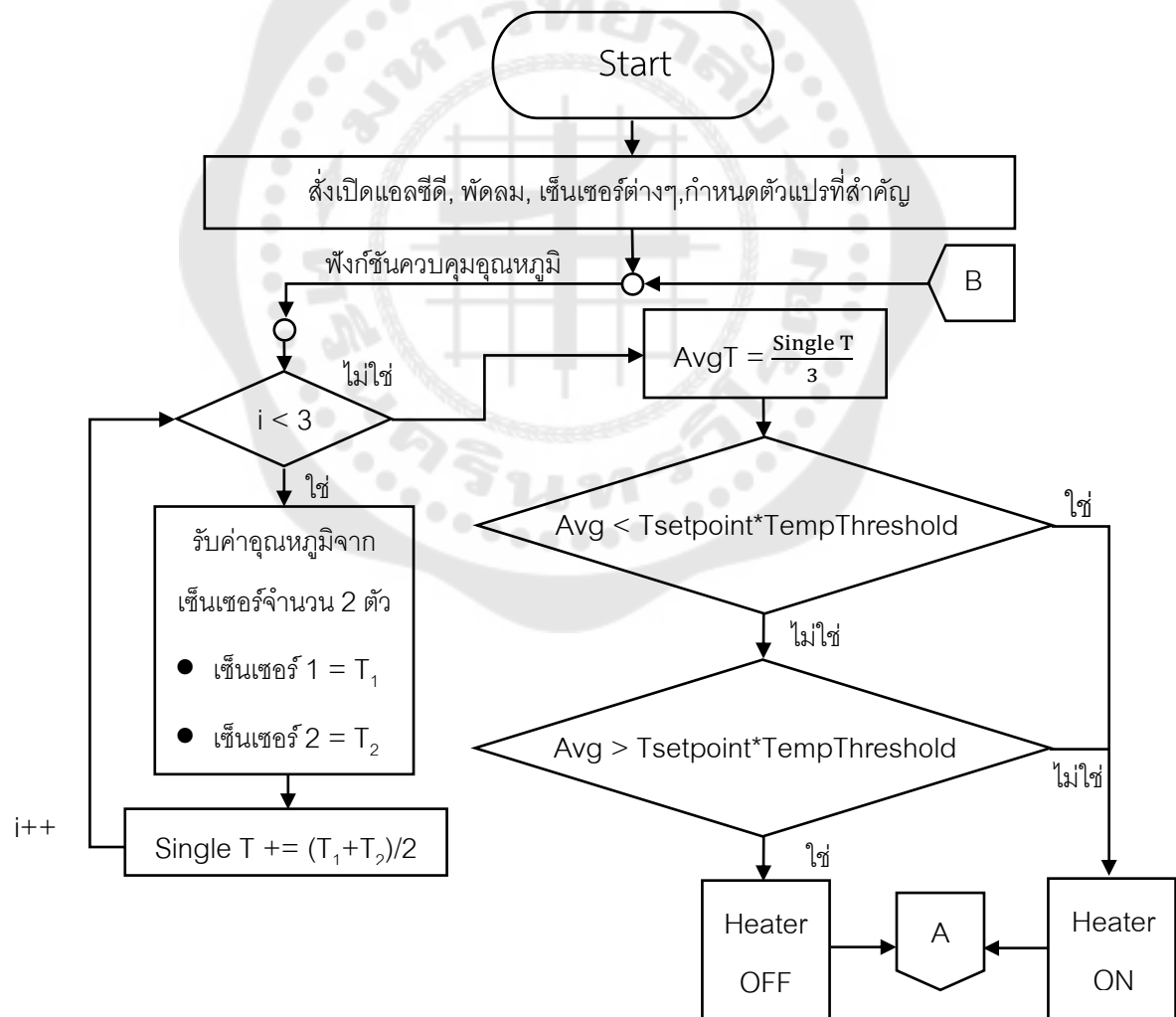
ภาพประกอบ 25 แผนผังการทำงานโดยรวมของของงานวิจัย

1. การออกแบบเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์

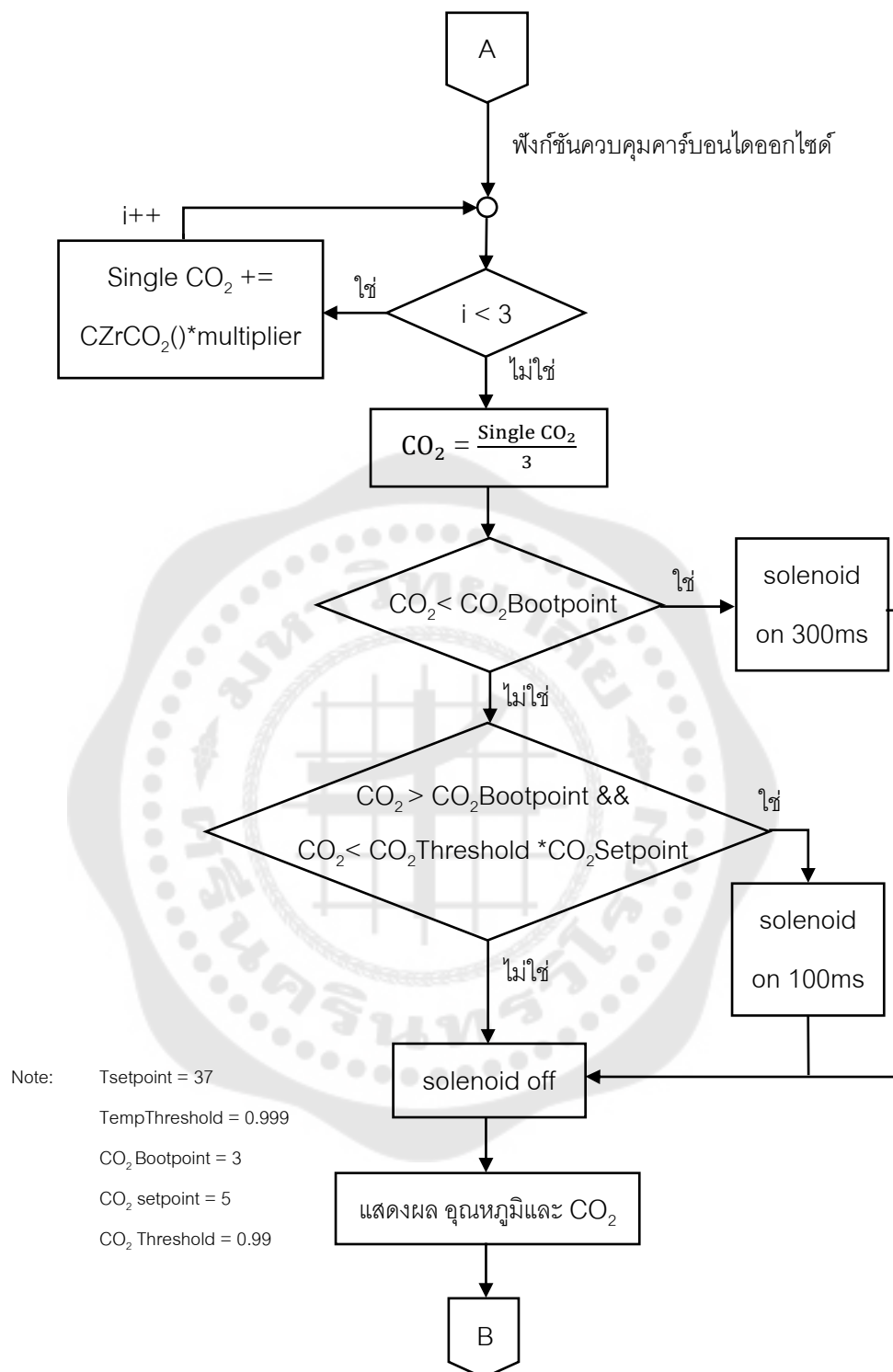
เครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์คือสิ่งสำคัญที่ใช้สำหรับจำลองสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเซลล์ภายในห้องปฏิบัติการ ซึ่งจะมีหน้าที่ควบคุมปัจจัยต่างๆของสภาพแวดล้อม และการไหลเวียนของอากาศให้เหมาะสมกับการเติบโตของเซลล์ โดยเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบง่ายที่ออกแบบจะต้องควบคุมปัจจัยสภาพแวดล้อมภายในเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงให้ได้ ดังนี้

1. อุณหภูมิ 37 ± 0.2 องศาเซลเซียส
2. ปริมาณก๊าซ 5 ± 0.2 เปอร์เซ็นต์
3. ความชื้น 95 เปอร์เซ็นต์

1.1 แผนผังการทำงานของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์



ภาพประกอบ 26 แผนผังการทำงานของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์



ภาพประกอบ 27 แผนผังการทำงานของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ (ต่อ)

อธิบายแผนผังการทำงานของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

1. การทำงานทั้งหมดจะควบคุมและประมวลผลผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น UNO R3 เริ่มต้นจากสั่งเริ่มการทำงานจอแอลซีดี, พัดลม, เซ็นเซอร์ต่างๆ แล้วระบบการสร้างตัวแปรต่างๆเพื่อทำการรองรับค่าจะใช้ในการพิจารณาหรือเพื่อนำไปแสดงผล การรับค่าต่างๆจากเซ็นเซอร์นั้นจะทำการบันทึกเป็นผลรวม 3 ครั้ง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย แบ่งเป็นค่าที่ได้จากวงจรเซ็นเซอร์อุณหภูมิ และวงจรเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ผ่านการคำนวณแปลงให้เป็นองศาเซลเซียสและหนึ่งในล้านส่วน (ppm) ตามลำดับแล้วนำค่าที่ได้ส่งผ่านตัวแปรไปแสดงที่จอแอลซีดี

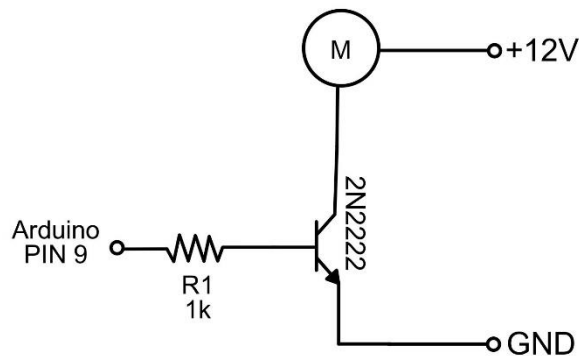
2. การควบคุมอุณหภูมิ จะกำหนดจากค่า Tsetpoint หรืออุณหภูมิที่ต้องการ กำหนดไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส โดยต้องใช้ร่วมกับค่า temp threshold ที่ 0.99 เพื่อให้อุณหภูมียู่ในเงื่อนไขที่ต้องการ ป้องกันความร้อนสะสมในแผ่นทำความร้อนและแผ่นระบายความร้อนทำให้อุณหภูมิเกินระดับที่ต้องการ มีเงื่อนไขการทำงานหากอุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้นั้นน้อยกว่า Tsetpoint คูณกับ TempThreshold ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino จะสั่งการให้แผ่นทำความร้อนทำงานเพื่อปรับอุณหภูมิให้ได้ตามเงื่อนไข ถ้าอุณหภูมิเฉลี่ยนั้นมากกว่า Tsetpoint คูณกับ TempThreshold ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino จะสั่งงานให้แผ่นทำความร้อนหยุดทำงาน

3. การควบคุมระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะกำหนดจากค่า CO₂ setpoint หรือระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ในอากาศ โดยกำหนดไว้ที่ 5 เปอร์เซ็นต์ ค่า CO₂ Threshold กำหนดไว้ที่ 3 เปอร์เซ็นต์ และ ค่า CO₂ Threshold ที่ 0.99 โดยวงจรเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะรับค่าจากเซ็นเซอร์ แล้วผ่านการแปลงจากค่าเฉพาะของตัวเซ็นเซอร์ คูณกับ multiplier ที่เซ็นเซอร์กำหนด เพื่อให้ได้ออกมาในหน่วยเปอร์เซ็นต์ มีเงื่อนไขการทำงานคือหากระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำกว่า CO₂ Bootpoint ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino จะสั่งงานให้รีเลย์ที่ควบคุมโซลินอยด์วาล์วเปิดเป็นเวลา 300ms เพื่อลดเวลาการเพิ่มระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้ถึงตามเงื่อนไข หากระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ระหว่างค่า CO₂ Bootpoint และ CO₂ setpoint คูณกับ CO₂ Threshold ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino จะสั่งงานให้รีเลย์ที่ควบคุมโซลินอยด์วาล์วเปิดเป็นเวลา 100ms เพื่อเป็นเพิ่มระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้มีค่าความละเอียดมากขึ้น และเมื่อระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า CO₂ setpoint คูณกับ CO₂ Threshold หรือได้ตามที่กำหนดไว้แล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino จะสั่งหยุดการทำงานของรีเลย์ที่ควบคุมโซลินอยด์วาล์ว

1.2 การทำงานอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

1.2.1 วงจรควบคุมพัดลม

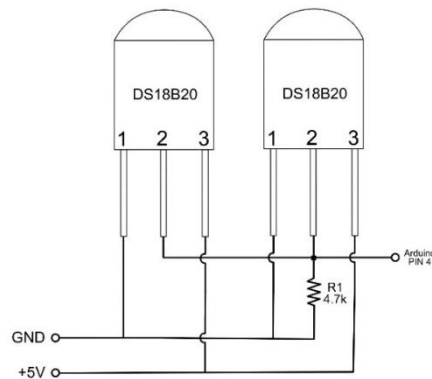
วงจรควบคุมพัดลม ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ TIP120 ทำงานในโหมดอิ่มตัว (saturation mode) ทำให้มอเตอร์ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และจากใช้ไดโอด 1N4007 เพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับ เนื่องจากทรานซิสเตอร์ไม่สามารถทนต่อกระแสไหลย้อนกลับได้ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 วงจรควบคุมพัดลม

1.2.2 เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

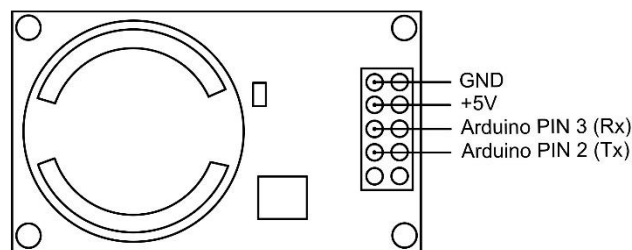
วงจรเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิประกอบด้วยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 ต่ออนุกรมกันจำนวน 2 ตัว สื่อสารข้อมูลดิจิทัลผ่านขาที่ 4 ของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ในรูปแบบ Pull-Up ด้วยตัวต้านทาน 4.7 กิโลโอห์ม ที่ขาที่ 2 ของเซ็นเซอร์ ไฟเลี้ยงสำหรับเซ็นเซอร์เป็นไฟเลี้ยงกระแสตรง 5 โวลต์ จากแหล่งจ่ายภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ผ่านขาที่ 1 ของเซ็นเซอร์ และเชื่อมต่อ ขา 3 ของเซ็นเซอร์เข้ากับ GND ของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 การเชื่อมต่อวงจรเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ

1.2.3 เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

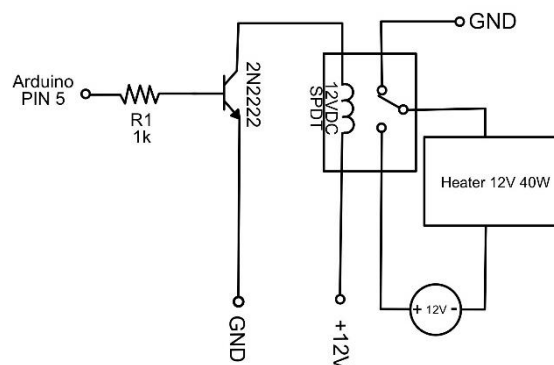
การต่อเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นไปตามภาพประกอบ 30 เลือกใช้เซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยี่ห้อ SprintIR™ รุ่น SprintIR -W 20% โมเดล GC-0017 โดยเซ็นเซอร์ใช้ไฟ ฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ จากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เซ็นเซอร์ทำงานโดยการอ่านค่าคาร์บอนไดออกไซด์จากการคำสั่งอ่านค่าของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ผ่านขา 2(Tx) แล้วส่งข้อมูลเป็นข้อมูลแบบดิจิตอลผ่านขา 3(Rx) กลับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เพื่อใช้งานค่าตามแผนผังการทำงาน



ภาพประกอบ 30 วงจรเซ็นเซอร์วัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

1.2.4 แผ่นทำความร้อน

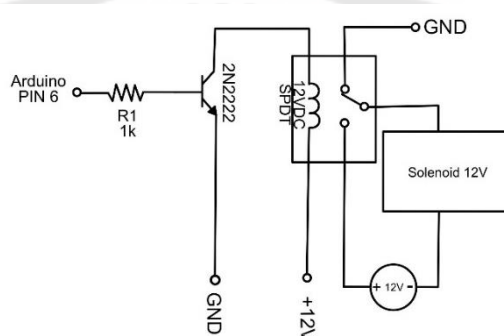
วงจรควบคุมแผ่นทำความร้อนเป็นไปตามภาพประกอบ 31 มีไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวควบคุมการทำงานของรีเลย์ SPDT 12 โวลต์ ตามแผนผังการทำงานของโปรแกรมที่ป้อนแก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รีเลย์รับไฟ 12 โวลต์ เพื่อให้ขดลวดคอยล์ทำงานแล้วเกิดสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ ทำให้สวิตช์ทำงาน และเกิดการครบวงจร ทำให้มีการจ่ายไฟ 12 โวลต์ ให้กับแผ่นทำความร้อนที่มีขนาด 12โวลต์ 40 วัตต์



ภาพประกอบ 31 วงจรควบคุมแผ่นทำความร้อน

1.2.5 วงจรควบคุมโซลินอยด์

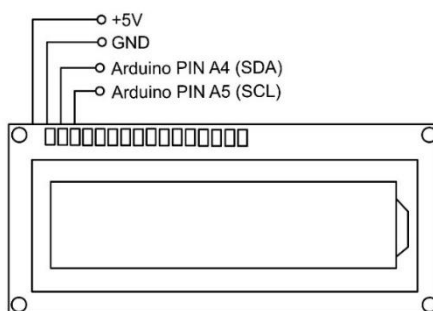
วงจรควบคุมโซลินอยด์เป็นไปตามภาพประกอบ 32 มีหลักการทำงาน ของวงจรที่เหมือนกับวงจรควบคุมแผ่นทำความร้อน โดยทำงานตามเงื่อนไขจากแผนผังการทำงานของโปรแกรมที่ป้อนแก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เช่นเดียวกัน โซลินอยด์ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ ในการทำงาน โดยโซลินอยด์มีการทำงานคล้ายกับรีเลย์ คือมีขดลวดคอยล์ที่พันอยู่รอบแท่งเหล็กที่ภายใน ประกอบด้วยแม่เหล็กชุดบนกับชุดล่าง เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดที่พันรอบแท่งเหล็ก ทำให้แท่งเหล็กถูกสนามแม่เหล็กดึงแท่งเหล็กชุดบนลงมาสัมผัสกันทำให้ครบวงจรทำงาน เมื่อวงจรถูกตัดกระแสไฟฟ้าทำให้แท่งเหล็กส่วนล่างไม่มีสนามแม่เหล็ก สปริงก็จะดันแท่งเหล็กส่วนบนกลับสู่ตำแหน่งปกติ



ภาพประกอบ 32 วงจรควบคุมโซลินอยด์

1.2.6 วงจรแสดงผลแอลซีดี

การต่อจอแสดงผลแอลซีดีแสดงตามภาพประกอบ 33 ประกอบด้วย LCD แบบมีวงจร I²C ขนาดยาว 16 ตัวอักษร กว้าง 2 ตัวอักษร โดยหน้าจอลซีดีรับไฟ 5 โวลต์ จากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ส่งข้อมูลผ่านทางขา SCL และ SDA ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวควบคุม ซึ่งควบคุมด้วยการเขียนโปรแกรมแสดงผลกับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino



ภาพประกอบ 33 วงจรแสดงผลแอลซีดี

1.3 วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

ตาราง 2 วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ	จำนวน
ส่วนที่ 1 ส่วนควบคุมการทำงานและแสดงผล	
1. แผ่นปริ๊นวงจร (PCB)	
1.1 ทรานซิสเตอร์ เบอร์ TIP 120	1 ตัว
1.2 ทรานซิสเตอร์ เบอร์ 2N2222	2 ตัว
1.3 ตัวต้านทาน ขนาด 1 กิโลโอห์ม	2 ตัว
1.4 ตัวต้านทาน ขนาด 4.7 กิโลโอห์ม	3 ตัว
1.5 ตัวเก็บประจุ ขนาด 100 ไมโครฟารัด	3 ตัว
1.6 ไดโอด เบอร์ 1N4007	1 ตัว
1.7 รีเลย์ ชนิด SPDT	2 ตัว
1.8 ตัวเชื่อมต่อแบบสกรูหมุน 2 ขา	13 ตัว
1.9 ตัวเชื่อมต่อแบบสกรูหมุน 3 ขา	3 ตัว
2. บอร์ดมาตรฐานไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO Revision 3	1 บอร์ด
3. โมดูลจอแสดงผล Liquid crystal พร้อมวงจร I ² C ขนาด 16 X 2 ช่อง	1 ชิ้น
4. พัดลมดีซี 12 โวลต์ ขนาด 9 X 9 เซนติเมตร	1 ตัว
5. พัดลมดีซี 12 โวลต์ ขนาด 6 X 6 เซนติเมตร	1 ตัว
6. ตัวกรองฝุ่นละออง (vent filter) 0.2 ไมครอน	1 ชิ้น
7. สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย (switching power supply) 12 โวลต์ 10 แอมป์	1 เครื่อง
8. สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย (switching power supply) 12 โวลต์ 2 แอมป์	2 เครื่อง
9. หัวแจ็คดีซีตัวเมีย	1 ชิ้น
10. หัว USB type B ตัวเมีย	1 ชิ้น
11. สวิตช์กดติด-ปล่อยดับ ชนิดเหล็ก 2 ขา กลม 16 มิลลิเมตร	1 ชิ้น
12. ท่อใส่ฟิยู (PU) ขนาด 8 มิลลิเมตร	3 เมตร
13. เทอร์มินัลบล็อก (Terminals blocks) 600 โวลต์ 25 แอมป์ 8 ช่อง	1 ชิ้น
14. วาล์วปรับอัตราการไหลแบบข้อต่อสายลม 2 ทาง	1 ชิ้น

ตาราง 2 (ต่อ)

วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ	จำนวน
15. ข้อต่อสายลม 8 มิลลิเมตร 2 ทาง ชนิดตรง	1 ชิ้น
16. ข้อต่อสายลม 8 มิลลิเมตรเกลียว 4 หุน ชนิด 90 องศา	1 ชิ้น
17. ข้อต่อสายลม 8 มิลลิเมตรเกลียว 2 หุน ชนิดตรง	2 ชิ้น
18. วาล์วปรับแรงดันพร้อมเกจวัดแรงดันก๊าซ (CO ₂ regulator)	1 ชิ้น
19. ท่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ขนาดบรรจ 40 ลิตร	1 ท่อ
ส่วนที่ 2 ส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์	
20. พัดลมดีซี 12 โวลต์ ขนาด 9 × 9 เซนติเมตร	3 ตัว
21. แผ่นทำความร้อน (Heater) 12 โวลต์ 40 วัตต์	1 ชิ้น
22. แผ่นระบายความร้อน (Heat sinks)	2 ชิ้น
23. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ DS18B20 แบบกันน้ำ	2 ตัว
24. เซ็นเซอร์ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ยี่ห้อ SprintIR [®] -W 20%	1 ตัว
25. ชั้นตะแกรงเหล็กสำหรับวางถาดเลี้ยงเซลล์	1 ชุด
26. กล่องพลาสติก PE ขนาด 1000 มิลลิลิตร	1 ชิ้น
27. ยาง EPDM เส้นทรงรูปตัวดี ขนาด 10 มิลลิเมตร	5 เมตร
ส่วนที่ 3 ส่วนระบบระบายความร้อน	
28. แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC1-12706SR	1 ชิ้น
29. สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย (switching power supply) 12 โวลต์ 10 แอมป์	1 เครื่อง
30. กล่องพลาสติก PETใสขนาด 1000 มิลลิลิตร พร้อมฝาปิด	1 กล่อง
31. ลูกยางกันบาดร้อยสายตู้สายไฟ ขนาด 3/4 นิ้ว และ 1 3/4 นิ้ว	1 ชิ้น
32. ท่อใส่ฟิยู (PU) ขนาด 12 มิลลิเมตร	1 เมตร
33. บล็อกน้ำระบายความร้อนอลูมิเนียม ขนาด 40 × 40 มิลลิเมตร	1 ชิ้น
34. หม้อน้ำขนาด 120 × 120 มิลลิเมตร	1 ชิ้น
35. ปั้มน้ำ 12 โวลต์ 3.6 วัตต์	2 ตัว
36. พัดลมดีซี 12 โวลต์ ขนาด 120 × 120 มิลลิเมตร	3 ตัว
37. พัดลมดีซี 12 โวลต์ ขนาด 9 × 9 เซนติเมตร	1 ตัว
38. พัดลมดีซี 12 โวลต์ ขนาด 40 × 40 มิลลิเมตรพร้อมแผ่นระบายความร้อน	1 ชุด

ตาราง 2 (ต่อ)

วัสดุ และอุปกรณ์ต่างๆ	จำนวน
39. ถูงใส่πίสสวาระสำหรับผู้ป่วย ชนิดช่องเทด้านล่าง	1 ชุด

1.4 การออกแบบโครงสร้าง

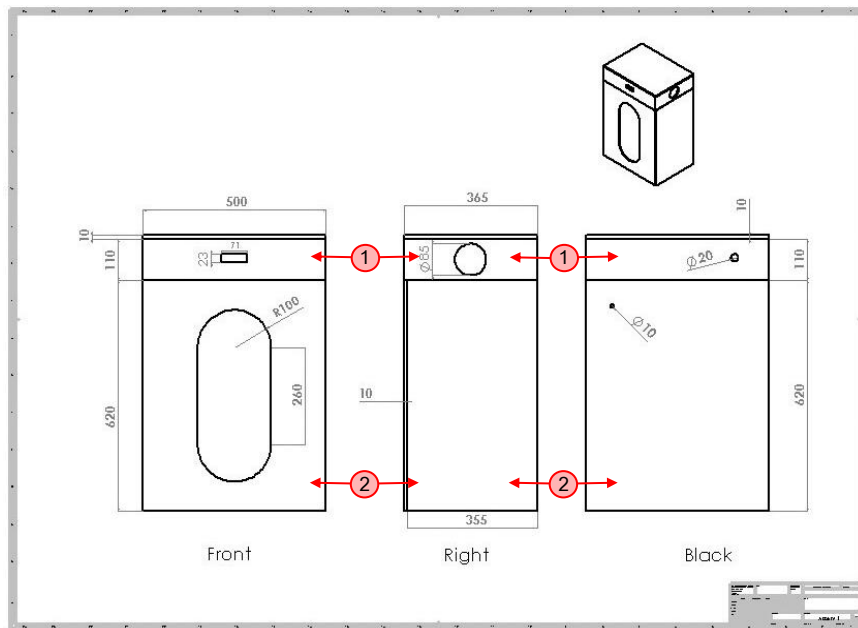
1.4.1 แบบต้นแบบ

การออกแบบโครงสร้างของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายตัวต้นแบบ โครงสร้างหลักจะสร้างจากไม้ MDF เคลือบเมลามีน โดยถูกออกแบบเป็น 2 ส่วนใหญ่ เป็นไปตาม ภาพประกอบ 34 และ 35 คือ

ส่วนที่ 1 เป็นส่วนบรรจุแผงวงจรควบคุมการทำงานอุปกรณ์ทั้งหมด โดย ออกแบบให้มีขนาด 500x365x110 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

ส่วนที่ 2 เป็นส่วนเพาะเลี้ยงเซลล์ ออกแบบภายนอกให้มีขนาด 500x365x620 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ภายในจะติดตั้งซีลด์ลดทอนสัญญาณที่คำนวณหาความหนา ของวัสดุซีลด์จากสมการที่ 5 โดย กำหนดค่าการลดทอนสัญญาณ ไว้ที่ 10 เดซิเบล ในย่าน 2.4 และ 14 เดซิเบล ในย่าน 5 กิกะเฮิร์ตซ์ หากคิดแค่ส่วนการสูญเสียจากการดูดซับของวัสดุตาม สมการที่ 6.2 กับค่าความลึกผิวตามสมการที่ 7 และเลือกใช้อลูมิเนียมอ่อนที่มีค่าความขาบซึม สัมพันธ์เท่ากับ 1 เฮนรีต่อเมตรและค่าความนำสัมพัทธ์อยู่ที่ 0.61 ซีเมนต์ต่อเมตรจะได้ความหนา ชั้นต่ำอยู่ที่ 2 ไมโครเมตร และ 1.4 ไมโครเมตร ในย่านความถี่ 2.4 และ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกสร้างขึ้นจากแผ่นอลูมิเนียมความหนา 1 มิลลิเมตรซึ่งมากกว่าค่าชั้นต่ำที่คำนวณ ออกมาได้ ตามภาพประกอบ 36 ก่อนจะถึงภายใน ภายใต้ซีลด์ลดทอนสัญญาณพื้นที่ด้านในจะ ถูกแบ่งด้วยแผ่นไม้ MDF ขนาด 460x320x100 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ยึดเข้ากับโครงสร้างของเครื่อง สูงจากพื้นผิวซีลด์ด้านล่าง 25 เซนติเมตร แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง เซลล์(ส่วนบน)และส่วนที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟาย 6(ส่วนล่าง)ตาม ภาพประกอบ 36ข

ส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์นั้นจะเสริมด้วยแผ่นโฟม EPS (Expanded Polystyrene Foam) ความหนา 5 เซนติเมตรปิดผิวด้านหน้าด้วยฉนวนโพลีเอทีลิน แล้วจึงแบ่ง ออกเป็นสองด้าน ด้านขวานั้นจะเป็นที่ติดตั้งแผ่นทำความร้อน และเซ็นเซอร์วัดระดับความเข้มข้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้านซ้ายจะใช้เพื่อเป็นพื้นที่เลี้ยงเซลล์มีการปิดผิวด้านในด้วยแผ่น อะคริลิกสีขาวเพื่อให้ง่ายต่อการทำความสะอาด และมีเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิติดตั้งอยู่ทั้งด้านซ้าย และขวาตามภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 34 การออกแบบขนาดของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 35 แบบจำลองเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์

(ก) ด้านหน้าของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ (ข) ส่วนบรรจุของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 36 ภายในส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์

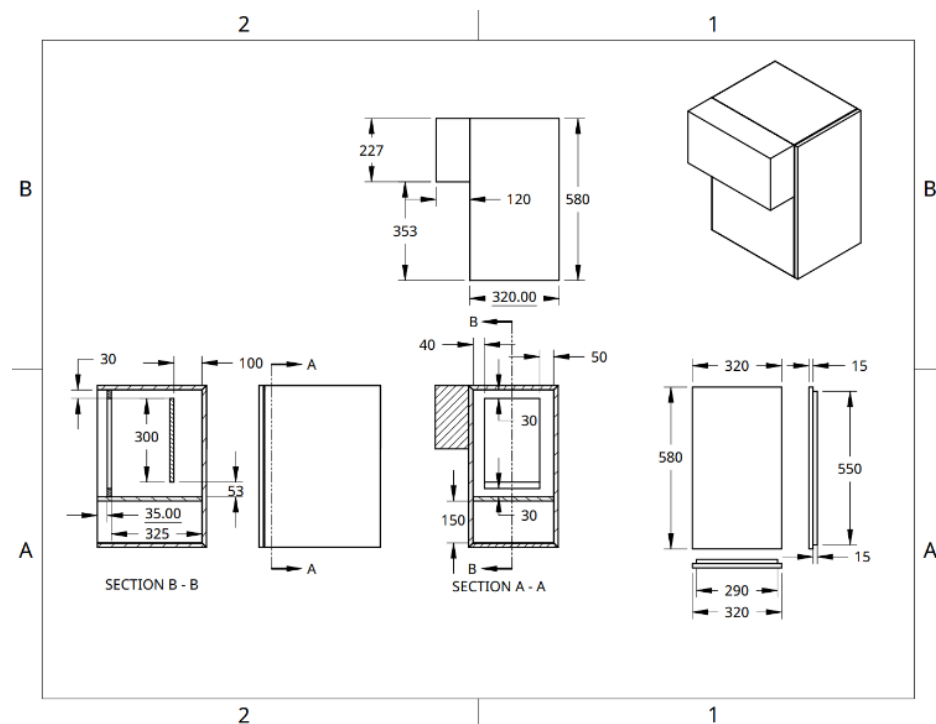
(ก) ซีดต์ด้านหน้าภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ (ข) การแบ่งส่วนเพาะเลี้ยงเซลล์และติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณวิทยุ



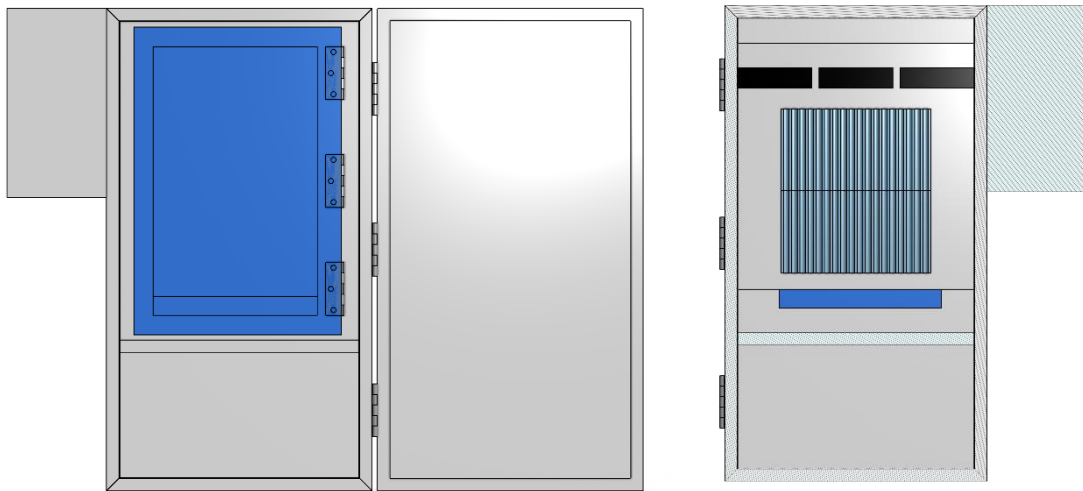
ภาพประกอบ 37 ส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์(ส่วนบน)

1.4.2 แบบปรับปรุง

การออกแบบเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายแบบปรับปรุงนั้น เป็นตามภาพประกอบ 38 โดยมีภาพตัดขวางแบบจำลองด้านหน้าและด้านหลัง ตามภาพประกอบ 39 และแบบจำลองการออกแบบโดยรวมของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายแบบปรับปรุงแสดงตามภาพประกอบ 40 ตัวเครื่องนั้นถูกออกแบบเป็น 3 ส่วน คือ



ภาพประกอบ 38 การออกแบบขนาดของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

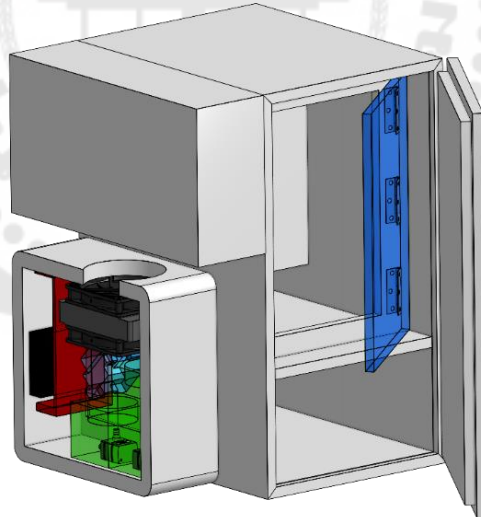


(ก)

(ข)

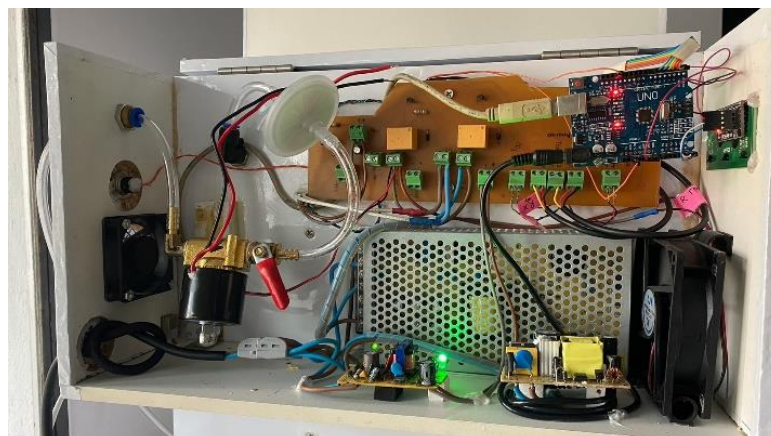
ภาพประกอบ 39 ภาพตัดขวางแบบจำลองเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง



ภาพประกอบ 40 แบบจำลองโดยรวมของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์อย่างง่ายแบบปรับปรุง

ส่วนที่ 1 สร้างจากไม้ MDF ความหนา 10 มิลลิเมตร เป็นส่วนที่ใช้บรรจุแผงวงจรควบคุมการทำงานอุปกรณ์ทั้งหมดและจอแสดงผล ส่วนนี้ออกแบบให้มีขนาด 120x420x220 ลูกบาศก์มิลลิเมตร รูปภายในหลังจากติดตั้งวงจรควบคุมระบบต่างๆ แสดงตามภาพประกอบ 41



ภาพประกอบ 41 ชิ้นงานจริงส่วนแผงวงจรควบคุมการทำงานอุปกรณ์ทั้งหมด

ส่วนที่ 2 สร้างจากแผ่นพลาสติก ความหนา 15 มิลลิเมตร ที่นำมาปิดผิวด้วยแผ่นสติ๊กเกอร์พีวีซีด้านนอกเพื่อให้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย เป็นส่วนที่ใช้บรรจุส่วนเพาะเลี้ยงเซลล์ และเครื่องจะจ่ายสัญญาณ Wi-Fi โดยออกแบบให้มีขนาด 320x440x580 ลูกบาศก์ มิลลิเมตร แสดงตามภาพประกอบ 42 โดยบริเวณขอบประตูจะถูกติดด้วยซีลยาง EPDM ทรงรูปตัวดี ความหนา 10 มิลลิเมตรเพื่อป้องกันการเล็ดลอดของอากาศภายในตัวเครื่อง ลดโอกาสการเกิดการปนเปื้อนหรือการรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก ภายในส่วนนี้จะถูกบุด้วยแผ่นซีลด์ เช่นเดียวกับในแบบต้นแบบ แบ่งส่วนนี้ด้วยวัสดุชนิดเดียวกับโครงสร้างเครื่องที่ระยะจากผิวซีลด์ ด้านล่าง 15 เซนติเมตร ได้ออกมา 2 ส่วนดังนี้



ภาพประกอบ 42 ชิ้นงานจริงส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์และการติดตั้งตัวกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย

1. ส่วนด้านล่าง ใช้เพื่อติดตั้งเครื่องกระจายสัญญาณ Wi-Fi และระบบทำความเย็นเพื่อระบายความร้อนของอุปกรณ์กระจายสัญญาณวิทยุ 6 แสดงตามภาพประกอบ 43



ภาพประกอบ 43 ชิ้นงานจริงส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์และการติดตั้งตัวกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบไร้สาย

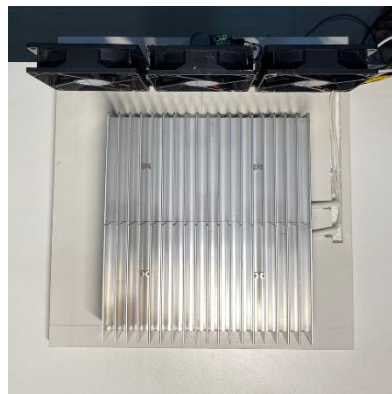
2. ส่วนด้านบน คือส่วนที่ใช้ในการเพาะเลี้ยงเซลล์ เป็นส่วนที่ต้องการรักษาสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมและมีการควบคุม ภายในส่วนนี้มีประตูภายในที่ทำจาก แผ่นอะคริลิกใส ความหนา 10 มิลลิเมตร เพื่อให้สามารถสังเกตการณ์ขณะที่เลี้ยงเซลล์เบื้องต้นได้โดยไม่ต้องเปิดประตูส่วนที่ใช้เลี้ยงเซลล์ ที่มีซีลยาง EPDM ชนิดรูปตัวดี หนา 10 มิลลิเมตรป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ความชื้นและอุณหภูมิภายใน โดยแสดงตามภาพประกอบ 44 ส่วนเซ็นเซอร์ต่างๆ ระบบทำความร้อน และหมุนเวียนอากาศจะอยู่ด้านหลัง ฉากกั้นภายในแสดงดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 44 ส่วนด้านบนและด้านล่างของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 45 การติดตั้ง เซ็นเซอร์ ระบบทำความร้อน และหมუნเวียนอากาศ ของฉากกั้น

(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง

ส่วนที่ 3 เป็นตู้กันน้ำพลาสติกขนาด 328x322x160 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ที่ดัดแปลงเพื่อบรรจุชุดทำความเย็นเพื่อลดความร้อนอุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ โดยจะเจาะเชื่อมระหว่างกล่องของส่วนนี้ทะลุเข้ากับส่วนล่างในส่วนที่ 2 เพื่อให้สามารถติดตั้งส่วนทำความเย็นเพื่อไปวางบนอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟาย 6 เพื่อควบคุมอุณหภูมิ ระบบทำความเย็นที่ถูกเพิ่มเข้ามานั้นทำงานโดยใช้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริก รุ่น TEC1-12706SR ในการสร้างความเย็นส่งผ่านบล็อกน้ำระบายความร้อนไปยังฝั่งเย็นที่เป็นน้ำหล่อเย็นที่หมุนเวียนด้วยปั้ม 12 โวลต์ไปที่ถูกเก็บปั้สวาระสำหรับผู้ป่วยเพื่อใช้เป็นหน้าสัมผัสทำความเย็นให้กับอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟาย 6 แล้วเวียนกลับมาผ่านบล็อกน้ำระบายความร้อนอีกครั้ง ในส่วนด้านที่ต้องระบายความร้อนของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกจะใช้หลักการเวียนน้ำยาหล่อเย็นด้วยปั้มเช่นเดียวกัน โดยจะผ่านไปที่ยหม้อน้ำระบายความร้อนที่ติดตั้งพัดลมดีซี 12 โวลต์เพื่อลดอุณหภูมิแล้วไปเก็บในถังพักที่ทำมาจากกล่องพลาสติก PET ขนาด 1000 มิลลิลิตรแล้วเวียนในระบบฝั่งร้อนต่อไป ภาพของระบบที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แสดงตามภาพประกอบ 46



(ก)



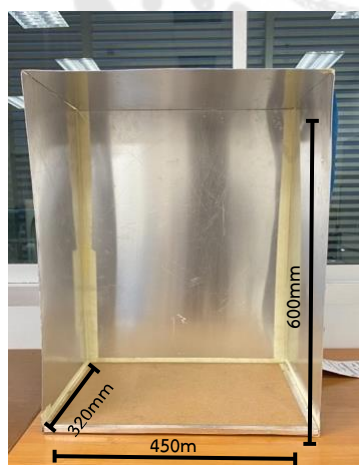
(ข)

ภาพประกอบ 46 ภาพรวมระบบทำความเย็น

(ก) กล่องควบคุมอุณหภูมิภายนอก (ข) ส่วนที่ใช้ติดตั้งกับอุปกรณ์กระจายสัญญาณวิทยุ

1.5 การออกแบบชิลด์ลดทอนสัญญาณภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

การออกแบบชิลด์นั้นต้องการความสามารถในการลดทอนสัญญาณ Wi-Fi ให้ได้อย่างน้อย 10 dB การออกแบบของชิลด์นั้น จะทำจากวัสดุคือแผ่นอลูมิเนียมที่มีความหนาอยู่ที่ 1 มิลลิเมตร โดยการออกแบบชิลด์จะออกแบบให้มีขนาด 460x300x600 ลูกบาศก์มิลลิเมตร โดยออกแบบทำให้เป็นทรงลูกบาศก์ ตามภาพประกอบ 47 ติดตั้งซ่อนไว้ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 47 การออกแบบชิลด์ด้วยแผ่นอลูมิเนียม

(ก) ก่อนแบ่งส่วน (ข) หลังแบ่งส่วน

2. การออกแบบการติดตั้งเครื่องกระจายสัญญาณ Wi-Fi

2.1 อุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi 6

อุปกรณ์กระจายสัญญาณที่นำมาใช้ติดตั้งภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อใช้การกระจายสัญญาณไวไฟ 6 เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณไวไฟ 6 เซลล์มนุษย์นั้นจะต้องสามารถใช้กระจายสัญญาณในมาตรฐาน IEEE802.11ax ได้

อุปกรณ์กระจายสัญญาณที่นำมาใช้ คือ Access point ยี่ห้อ Huawei™ รุ่น AP7060DN โดยมีรูปของอุปกรณ์ตามภาพประกอบ 48 และมีคุณสมบัติทางเทคนิคดังตารางที่ 3



ภาพประกอบ 48 Access point ยี่ห้อ Huawei™ รุ่น AP7060DN

ที่มา <https://e.huawei.com/th/products/enterprise-networking/wlan/indoor-access-points/ap7060dn>

ตาราง 3 คุณสมบัติทางเทคนิค Access point ยี่ห้อ Huawei™ รุ่น AP7060DN

Technical specifications	
Dimensions (H x W x D)	57 mm x 220 mm x 220 mm
Weight	1.8 kg
Interface type	1x10/100/1000M self-adaptive Ethernet interface (RJ45) 1 x 100/1000M/2.5G/5G/10G self-adaptive Ethernet interface (RJ45) 1 x management console port (RJ45) 1 x USB interface
External IoT module	1 x External IoT module (supporting ZigBee and RFID)
Built-in Bluetooth	BLE5.0
LED indicator	Indicates the power-on, startup, running, alarm, and fault states of the system.

ตาราง 3 (ต่อ)

Technical specifications	
Power specifications	
Power input	DC:42.5Vto57V PoE power supply: Incompliance with802.3at/bt
Maximum power consumption	25.4W (excludingUSBandIoT)
Environmental specifications	
Operating temperature	-10°C to +50°C
Storage temperature	-40°C to +70°C
Operating humidity	5% to 95% (non-condensing)
Dustproof and waterproof grade	IP41
Altitude	-60 m to +5000 m
Atmospheric pressure	53 kPa to 106 kPa
Radio specifications	
Antenna type	Built-in dual-band omnidirectional antennas
Antenna gain	2.4GHz: 4.6dBi 5GHz: 5.6dBi
Maximum number of SSIDs for each radio	≤ 16
Maximum number of users	≤ 512
Maximum transmit power	2.4G: 24 dBm (combined power) 5G: 27 dBm (combined power)
Power increment	1 dBm 2.4 GHz (2.412 GHz to 2.472 GHz)
Maximum number of non-overlapping channels	802.11b/g 20 MHz: 3 802.11n

ตาราง 3 (ต่อ)

Technical specifications

20 MHz: 3

40 MHz: 1

802.11ax

20 MHz: 3

40 MHz: 1

5 GHz (5.18 GHz to 5.825 GHz)

802.11a

20 MHz: 13

802.11n

20 MHz: 13

40 MHz: 6

802.11ac

20 MHz: 13

40 MHz: 6

80 MHz: 3

160 MHz: 1

802.11ax

40 MHz: 6

80 MHz: 3

160 MHz: 1

20 MHz: 13

2.2 การติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

การวางอุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi 6 ไว้ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์นั้น จะติดตั้งไว้ภายในส่วนล่าง ของส่วนที่ 2 ของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ โดยจะจัดวางไว้บริเวณตรงกลางของพื้นด้านล่าง และวางส่วนทำความเย็นสัมผัสไว้ที่บริเวณด้านบนบนผิวของอุปกรณ์กระจายสัญญาณ Wi-Fi 6 แสดงตามภาพประกอบ 49



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 49 การวางอุปกรณ์กระจายสัญญาณ

(ก) การวางแบบปกติ (ข) การวางพร้อมส่วนทำความเย็น

3. ออกแบบการทดสอบเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์

3.1 การทดสอบส่วนที่ใช้ปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์

3.1.1 อุณหภูมิ ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การบันทึกระดับอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์นั้นจะทำผ่านทางช่องยูเอสบีของไมโครคอนโทรลเลอร์ของ Arduino รุ่น UNO R3 เชื่อมเข้ากับคอมพิวเตอร์และบันทึกค่าผ่านโปรแกรม Arduino โดยจะทำการบันทึกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อยืนยันการทำงานของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ว่าสามารถควบคุมระดับอุณหภูมิและ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ได้ตามที่ต้องการจึงจะสามารถทดสอบในขั้นตอนการเพาะเลี้ยงเซลล์ต่อไปได้

3.1.2 การทดสอบการเพาะเลี้ยงเซลล์

เมื่อทำการทดสอบการควบคุมระดับอุณหภูมิและความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ได้แล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปจะต้องทำการทดลองเพื่อพิสูจน์การเพาะเลี้ยงเซลล์ของเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่ทำการสร้างขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน โดยจะแบ่งขั้นเป็นขั้นตอนดังนี้

1. การเตรียมเซลล์สำหรับการทดสอบปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์

1. เซลล์ที่ใช้ในการทดลอง

เซลล์ที่ใช้ในการทดลองคือเซลล์ผิวหนัง WS-1 ตารางรายละเอียดของข้อมูลเซลล์ดังกล่าวจะแสดงตาม ตาราง 4

ตาราง 4 คุณลักษณะของเซลล์ผิวหนัง WS-1

ประเภท	รายละเอียด
Organism	Homo sapiens, human
Tissue	skin
Cell Type	fibroblast
Product Format	frozen
Morphology	fibroblast
Culture Properties	adherent
Biosafety Level	1
Disease	normal
Age	12 weeks gestation
Gender	female
Ethnicity	Black
Storage Conditions	liquid nitrogen vapor phase

ที่มา: <https://www.atcc.org/products/all/CRL-1502.aspx>

2. การเตรียมเซลล์จากที่จัดเก็บเพื่อใช้ในการทดลอง

การเตรียมเซลล์ทั้ง 2 ชนิดที่ต้องการใช้ในการทดลองนั้นจะเตรียมในวิธีแบบเดียวกัน โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มจากการนำเซลล์ที่อยู่ภายใต้สภาวะแช่แข็งภายในตู้แช่แข็งหรือถังเก็บไนโตรเจนเหลวมาละลายภายในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียสตามภาพประกอบ 50 และ 51

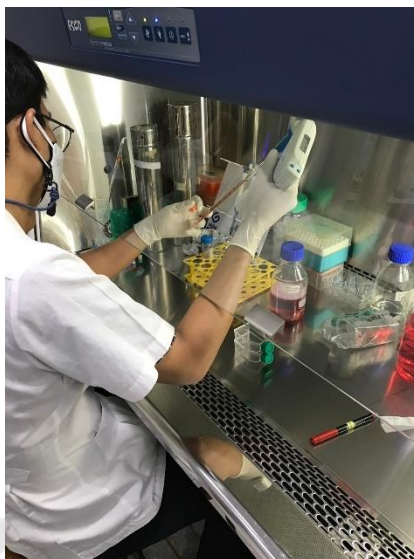


ภาพประกอบ 50 การนำเซลล์ออกจากที่จัดเก็บ



ภาพประกอบ 51 การละลายเซลล์จากสภาวะแช่แข็ง

2. เซลล์ที่ละลายแล้วนั้นจะถูกดูดมา 1 มิลลิลิตรนำมาละลายเข้ากับ มีเดียสำหรับเพาะเลี้ยงเซลล์ 5 มิลลิลิตรในทันทีได้มาจากการเตรียมมีเดียสำหรับเพาะเลี้ยงเซลล์ สำเร็จรูปชนิดผง ยี่ห้อ gibco™ ชนิด MEM (Minimum Essential Medium) ผสมเข้ากับ Fetal Bovine Serum (FBS) 10% เป็นสารอาหารและเพื่อเร่งการเจริญเติบโต และ Pen-strep 1% เพื่อฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่เรียกว่าไม่พึงประสงค์ ตามภาพประกอบ 52



ภาพประกอบ 52 รูปจำลองการลงเซลล์เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยง

3. นำเข้าเครื่องเหวี่ยง Benchmark Z206-A เป็นที่ 2000 รอบ/นาที เพื่อตกตะกอนแยกเซลล์ตามภาพประกอบ 53 เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้ายเซลล์ได้ แล้วจึงย้ายลงในขวดเพาะเลี้ยงเซลล์ แล้วนำไปไว้ในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อรอให้เซลล์มีการเจริญเติบโต และแบ่งเซลล์จนสามารถนำไปใช้งานขั้นต่อไปได้ซึ่งใช้เวลาประมาณ 7 วัน



ภาพประกอบ 53 การปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกตกตะกอนเซลล์

3. การ Sub culture หรือ Pass cell ด้วยวิธีการ Trypsinization

1. นำอาหารเลี้ยงเซลล์เดิมที่มีอยู่ออกโดยใช้ Pipet Controller แล้วล้างภายในขวดเพาะเลี้ยงเซลล์ด้วย Phosphate Buffered Saline (PBS) เพื่อทำการล้าง Fetal bovine serum (FBS) ที่ได้ผสมไว้ในมีเดียเพาะเลี้ยงเซลล์ และเซลล์ที่ตายหรือไม่เจริญเติบโตที่

ล่อยอยู่ในสารละลายออกให้หมด โดยใช้ pipette ล้างอย่างเบามือ ป้องกันการหลุดของเซลล์ที่เจริญเติบโตและเกาะอยู่ด้านล่างของขวดเพาะเลี้ยงเซลล์แล้วทำการดูด PBS ออก

2. เติม 0.25% Trypsin-EDTA หรือ เอนไซม์ Trypsin ลงไปให้สารละลายกระจายทั่วพื้นที่ที่ใช้เลี้ยงเซลล์ภายในขวดเพาะเลี้ยงเซลล์แล้วนำไปเพาะเลี้ยงเซลล์ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ เป็นเวลา 2-5 นาที เพื่อให้เอนไซม์ดังกล่าวย่อยส่วนยึดเกาะของเซลล์ทำให้เซลล์นั้นหลุดออกจากผิวของขวดเพาะเลี้ยงเซลล์

3. เมื่อครบเวลา 2-5 นาที นำขวดเพาะเลี้ยงเซลล์ที่เติมเอนไซม์ไว้แล้ว นำมาเติมด้วยมีเดียเลี้ยงเลี้ยงเซลล์ลงไป โดยใช้ pipette ดูดผสมสารละลายภายในขวดเพาะเลี้ยงเซลล์ เพื่อทำการหยุดการทำงานของเอนไซม์ Trypsin แล้วย้ายสารละลายเซลล์ไปที่หลอดเซ้นติฟิว (Centrifuge Tube) โดยใช้ pipette

4. นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้เซลล์ตกตะกอนแล้วดูดส่วนของเหลวที่ใส่ออกให้ได้มากที่สุด จากนั้นเติมมีเดียสำหรับเพาะเลี้ยงเซลล์ลงไปผสมอีกครั้งด้วย pipette เพื่อให้เซลล์กระจายตัวจากที่ถูกเหวี่ยงให้นอนกันด้านล่าง ถือว่าเสร็จสิ้นขั้นตอนการ Trypsinization พร้อมทั้งจะนำไปนับจำนวนหรือนำไปทดลองต่อไปได้

4. การนับจำนวนเซลล์ด้วย Hemocytometer หรือ Cell counting chamber

1. นำเซลล์ที่ผ่านกระบวนการ Trypsinization มาแล้ว นำมา 10 ไมโครลิตร เจือจางในสีย้อม Trypan blue 0.4% ผสมให้เข้ากัน เพื่อให้สามารถแยกสภาวะการดำรงชีวิตของเซลล์ได้ด้วยตา จากนั้นดูดสารละลายเซลล์ที่ผสมสีย้อมแล้วด้วยออตปิเปตแล้วนำมาหยดลงในช่องตรวจของ Hemocytometer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการนับจำนวนเซลล์ แสดงดังภาพประกอบ 54



(ก)

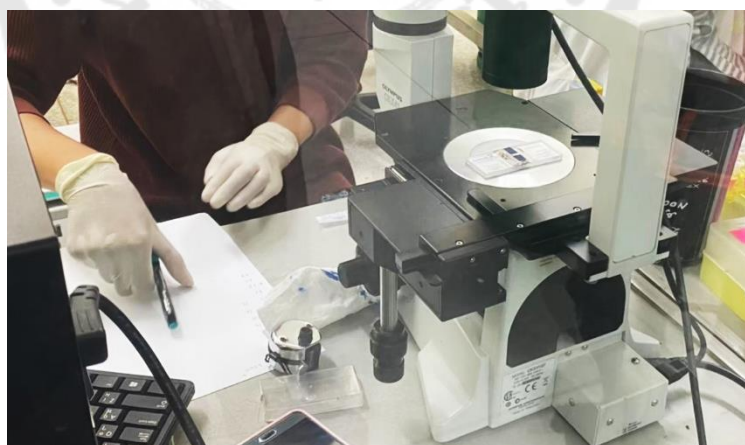


(ข)

ภาพประกอบ 54 รูปขณะทำการนับจำนวนเซลล์

(ก) Hemocytometer (ข) การใช้งาน Hemocytometer

2. นำ Hemocytometer ที่เติมสารละลายเซลล์เรียบร้อยแล้ว นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์เพื่อนับเซลล์ดังภาพประกอบ 55 โดยจะเลือกนับเซลล์เฉพาะเซลล์ที่ยังมีชีวิตอยู่ภายในช่องวัดของ Hemocytometer แล้วจึงนำมาคำนวณปริมาณเซลล์เพื่อทำให้ทราบจำนวนเซลล์ทั้งหมดจากตัวอย่างที่นำออกมาได้



ภาพประกอบ 55 รูปการส่อง Hemocytometer ผ่านกล้องจุลทรรศน์

3. การคำนวณจำนวนเซลล์ที่มีทั้งหมดจากตัวอย่างสารละลายเซลล์ภายใน Hemocytometer สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 10

$$N_{total} = \frac{N_{tc} \times Df \times 10^4}{N_{sc}} \quad (10)$$

โดย N_{total} (Total Viable cell) คือ ผลลัพธ์จำนวนเซลล์ทั้งหมดที่สามารถคำนวณออกมาได้มีหน่วยคือเซลล์ต่อมิลลิลิตร [Cells/ml] N_{tc} (Total cells counted) คือ จำนวนเซลล์ที่มีชีวิตที่นับได้ภายในช่องที่พิจารณา N_{sc} (squares counted) คือ จำนวนช่องสี่เหลี่ยมภายใน Hemocytometer ที่ใช้ในการพิจารณา Df (Dilution factor) คือ ค่าคงตัวเจือจาง

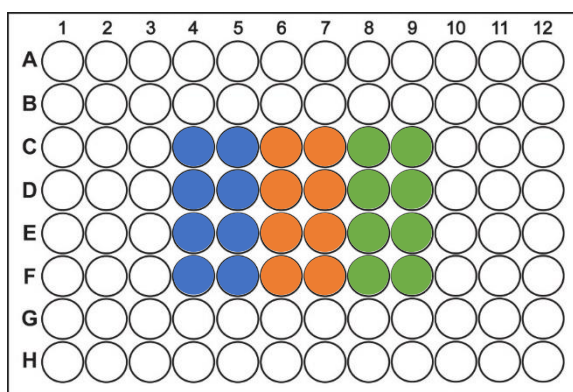
5. หลังจากทำการนับเซลล์และคำนวณปริมาณเซลล์ที่มีในสารละลายเซลล์ทั้งหมดโดยใช้ hemocytometer จะสามารถเตรียมกำหนดจำนวนเซลล์ที่ใช้ในการทดลองได้จากสมการ 11

$$C_1 V_1 = C_2 V_2 \quad (11)$$

โดยจะกำหนดให้ C_1 คือจำนวนของเซลล์ที่ยังมีชีวิตในสารละลายเซลล์ที่ทราบหรือผ่านการนับมาแล้วมีหน่วยเป็นจำนวนเซลล์ต่อมิลลิลิตร [Cells/ml] V_1 คือ ปริมาตรของสารละลายเซลล์ที่นำมาจะสารละลายเซลล์ที่ทราบจำนวนเซลล์ก่อนหน้า (จากสารละลายเซลล์ C_1) ในหน่วยมิลลิลิตร [ml] C_2 คือจำนวนของเซลล์ที่ยังมีชีวิตในสารละลายเซลล์ที่ต้องการนำไปใช้งานมีหน่วยเป็นจำนวนเซลล์ต่อมิลลิลิตร [Cells/ml] และ V_2 คือปริมาตรสุทธิของสารละลายเซลล์ที่ต้องการนำไปใช้งานในหน่วยมิลลิลิตร [ml]

6. การ plate หรือ seed เซลล์เพื่อนำไปทดลอง

หลังจากที่สามารถทราบและคำนวณจำนวนเซลล์ที่ต้องการใช้งานได้แล้ว การย้ายเซลล์ใส่ภาชนะสำหรับเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อใช้งานในการทดลองจะเรียกว่า การ plate หรือ seed เซลล์ วิธีการคือย้ายเซลล์จากภาชนะใดๆที่บรรจุสารละลายเซลล์ด้วยออตปิเปิดไปยังภาชนะสำหรับเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อนำไปใช้ทดลอง ในที่นี้ใช้ถาดเลี้ยงเซลล์ชนิด 96 หลุม โดยเติมเซลล์จำนวน 15000 เซลล์ ต่อ 100 ไมโครลิตรต่อหลุมโดยจะมีรูปแบบการเติมภายในถาดเลี้ยงเซลล์ชนิด 96 หลุม แสดงดังภาพประกอบ 56



ภาพประกอบ 56 รูปจำลองการลงเซลล์เพื่อใช้ในการเพาะเลี้ยง

2. MTT Assay

การทำขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบและวิเคราะห์การมีชีวิตอยู่ของเซลล์ (viability) หรือการเพิ่มจำนวนของเซลล์ (proliferation) โดยจะมีขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มจากการนำเซลล์ที่ต้องการทำ MTT Assay มาผ่านขั้นตอน Trypsinization แต่ไม่ต้องย้ายสารละลายเซลล์ไปที่หลอดเหวี่ยง (Centrifuge Tube) และไม่ต้องใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงในขั้นตอนสุดท้าย

2. เติมสารละลาย MTT (3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide) ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยเติมเป็นปริมาตร 10 ไมโครลิตรต่อหลุม แล้วนำไปไว้ในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 1.5-2 ชั่วโมง เพื่อให้ทำให้เกิดผลึก formazan ที่มีสีม่วงภายในเซลล์ที่มีชีวิต จากเอนไซม์ succinate dehydrogenase จากการ reductase ในไมโทคอนเดรีย

3. เมื่อครบเวลาจึงนำออกมาดูอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มี MTT ผสมอยู่ ออกด้วยการใช้ออโตปิเปต แล้วจึงเติมสารละลายไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethyl Sulfoxide (DMSO)) เป็นปริมาตร 200 ไมโครลิตร ต่อหลุม เพื่อละลายผลึก formazan แล้วนำไปผสมให้เข้ากันด้วยการใช้เครื่องเขย่า ที่ความเร็ว 450 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที บนเครื่อง shaker

4. นำไปวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง (Optical density (OD)) ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นแสงที่ 570 นาโนเมตร เพื่อสามารถนำไปเปรียบเทียบหาเปอร์เซ็นต์การมีชีวิตรอด (% Viability) ตามสมการที่ 12 ต่อไปนี้

$$Viability(\%)_1 = \frac{OD_{treated}}{OD_{control}} \times 100 \quad (12)$$

เมื่อ Viability คือ ปริมาณเซลล์ที่มีชีวิตรอดทั้งหมดในหน่วยเปอร์เซ็นต์ $OD_{treated}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของเซลล์ที่ทดสอบการเพาะเลี้ยงภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่สร้างขึ้น ในกรณีทดสอบการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ หรือเซลล์ที่ได้สัมผัสสัญญาณวายฟายในกรณีการศึกษาผลกระทบของสัญญาณวายฟาย และ $OD_{control}$ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของกลุ่มเซลล์ที่ควบคุม ในกรณีทดสอบการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์คือ การเพาะเลี้ยงภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน หรือเซลล์ที่ไม่ได้สัมผัสสัญญาณวายฟายในกรณีการศึกษาผลกระทบของสัญญาณวายฟาย

3. การเลี้ยงเซลล์เปรียบเทียบกับเครื่องแบบมาตรฐาน

หลังจากที่ผ่านขั้นตอนการ plate เซลล์ลงในภาชนะเลี้ยงเซลล์แบบ 96 หลุมตามรูปแบบดังภาพประกอบ 56 โดยจะแบ่งภาชนะเซลล์ออกเป็น 2 ภาชนะ โดยภาชนะแรกจะนำไปใช้ทดลองบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน และภาชนะที่เหลือนำไปใช้ทดลองบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่สร้างขึ้น โดยจะบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปสังเกตและเก็บภาพทางสัญญาณวิทยา แล้วนำไปผ่านขั้นตอน MTT Assay เพื่อตรวจสอบการเจริญเติบโต ทำการเลี้ยงเซลล์ทั้งหมดจำนวน 3 รอบการทดลองแล้วเปรียบเทียบผลระหว่างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่สร้างขึ้นกับแบบมาตรฐาน วิเคราะห์โดยใช้วิธีทางสถิติคือ Two-way ANOVA โดยให้ผลจากเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐานนั้นเป็นผลควบคุมที่ 100 เปอร์เซ็นต์

3.2 การทดสอบซีลด์ลดทอนสัญญาณ

ทดสอบการลดทอนสัญญาณที่ทำได้หลังจากเสริมซีลด์ลดทอนสัญญาณให้กับเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์โดยนำเครื่องคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ apple MacBook รุ่น air โมเดล A2337 วัดระดับสัญญาณวายฟายในพื้นที่ที่ย่านความถี่ 2.4 และ 5 กะเฮิรตซ์ ด้วยซอฟต์แวร์ชื่อ NetSpot™ เป็นเวลา 15 นาทีดังภาพประกอบ 57



ภาพประกอบ 57 รูปแสดงตำแหน่งขณะวัดระดับสัญญาณ

3.3 การทดสอบระบบทำความเย็น

หลังจากที่ติดตั้งระบบทำความเย็นเสร็จแล้วทำการทดสอบว่าระบบทำความเย็นนั้นสามารถควบคุมอุณหภูมิในส่วนที่ติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟายให้ไม่รบกวนส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์จนมีอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมโดยจะเปิดอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟายพร้อมกับระบบทำความเย็นอุณหภูมิแล้วทำการวัดอุณหภูมิในตำแหน่งดังภาพประกอบ 58 โดยจะวัดด้วยเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ ds18b20 แบบเดียวกับที่ใช้ในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์หลังจากครบเวลา 24 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 58 รูปบริเวณที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิในส่วนที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณ

บทที่ 4

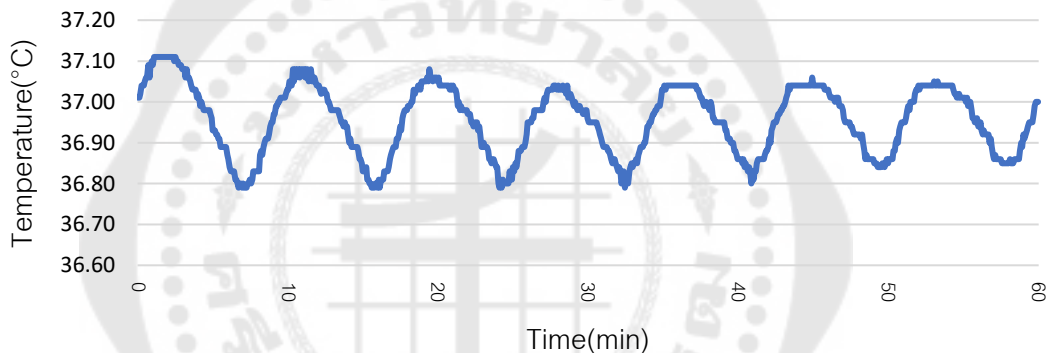
ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 การทดสอบส่วนที่ใช้บ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

4.1.1 แบบต้นแบบ

1. ระดับอุณหภูมิ

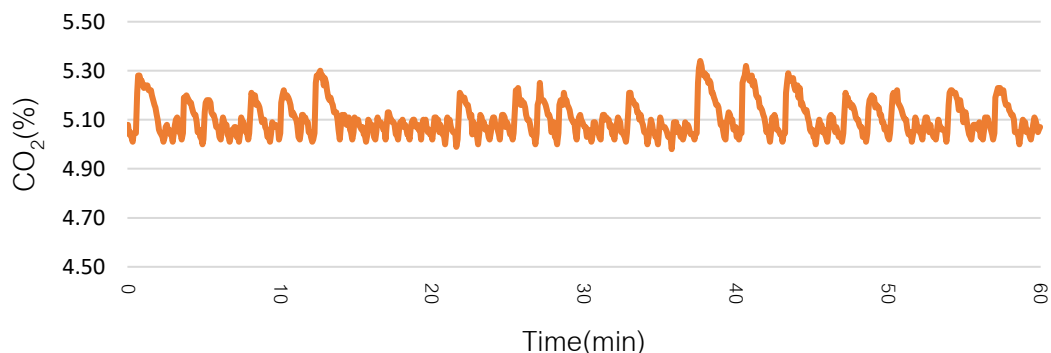
หลังจากที่บันทึกระดับของอุณหภูมิที่ได้จากเซนเซอร์ภายในส่วนที่ใช้ในการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ จะเห็นได้ว่าผลของระดับอุณหภูมิในส่วนที่ใช้บ่มเพาะเลี้ยงเซลล์นั้นสามารถรักษาระดับอุณหภูมิต่ำสุดไม่เกิน 36.8 องศาเซลเซียส และสูงสุดไม่เกิน 37.1 องศาเซลเซียส ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม หรือ 37 ± 0.2 องศาเซลเซียส ดังกราฟดังภาพประกอบ 59



ภาพประกอบ 59 กราฟบันทึกที่ระดับอุณหภูมิของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ

2. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

หลังจากที่บันทึกระดับของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากเซนเซอร์ภายในส่วนที่ใช้ในการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ จะเห็นได้ว่าผลของระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วนที่ใช้บ่มเพาะเลี้ยงเซลล์นั้นสามารถรักษาระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์และสูงสุดไม่เกิน 5.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากการเฉลี่ยตลอดช่วงเวลายังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม หรือ 5 ± 0.2 เปอร์เซ็นต์ดังกราฟดังภาพประกอบ 60



ภาพประกอบ 60 กราฟบันทึกระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ

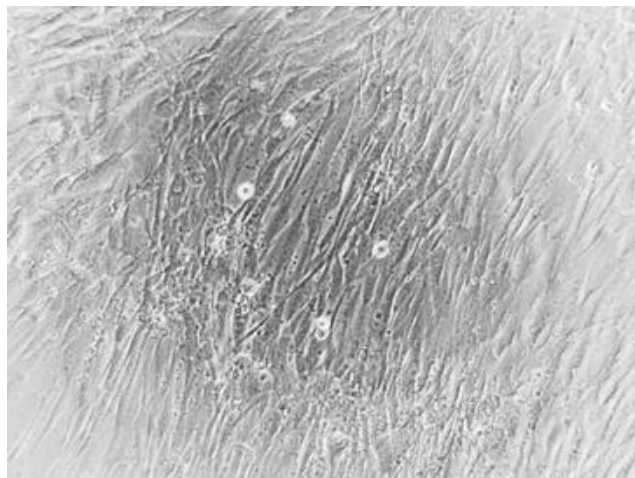
3. การเพาะเลี้ยงเซลล์

1. สันฐานวิทยาของเซลล์

หลังจากที่ทำการเพาะเลี้ยงเซลล์ WS-1 ครบ 24 ชั่วโมงสามารถบันทึกภาพสันฐานวิทยา ที่อัตราขยายของภาพเท่ากับ 100 ไมโครเมตร ของเซลล์จากเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐานและแบบอย่างง่ายที่สร้างขึ้นได้ดังภาพประกอบ 61 และ 62 พบว่าเซลล์ WS-1 นั้นมีการเจริญเติบโตยึดยาวออกตามลักษณะของเซลล์แบบรูปกระสวย (fibroblast) โดยมีการเกาะกับพื้นผิวของจานที่ใช้ในการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ตามลักษณะเซลล์ที่ต้องการ การเลี้ยงแบบ adherent ซึ่งเมื่อเทียบกันแล้วนั้นพบว่าลักษณะทางสันฐานวิทยาของเซลล์จากเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ทั้งสองนั้นมีการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนได้เหมือนกันและรูปร่างของเซลล์มีความใกล้เคียงกันไม่เกิดความผิดปกติ การตาย หรือหยุดเจริญเติบโตขึ้น



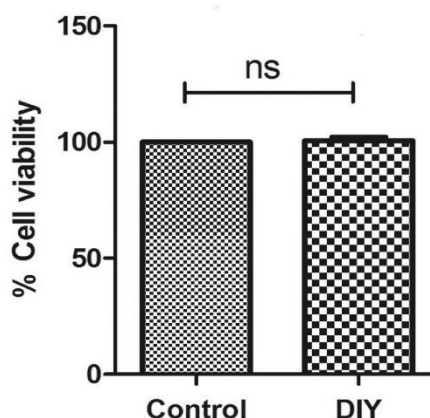
ภาพประกอบ 61 ภาพเซลล์ WS-1 จากเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ หลังจากเพาะเลี้ยง 24 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 62 ภาพเซลล์ WS-1 จากเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน หลังจากเพาะเลี้ยง 24 ชั่วโมง

2. ผล Viability ที่ได้จากการทำ MTT Assay

หลังจากเซลล์ได้รับการปั๊มเพาะจนครบ 24 ชั่วโมงแล้วนั้นผลของเซลล์ที่มีชีวิตจากการทำ MTT assay นั้นเมื่อเทียบกับเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐานพบว่าเครื่องที่สร้างขึ้นนั้นมีเปอร์เซ็นต์การมีชีวิตรอดของเซลล์ที่ไม่แตกต่างกับเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพประกอบ 63 นั้นหมายความว่าเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบต้นแบบนั้นสามารถใช้ในการเลี้ยงเซลล์ได้เทียบเคียงกับเครื่องปั๊มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐานได้จริงตามข้อมูลที่ยืนยันจากทั้งหลักฐานวิทยาและจำนวนการมีชีวิตรอด

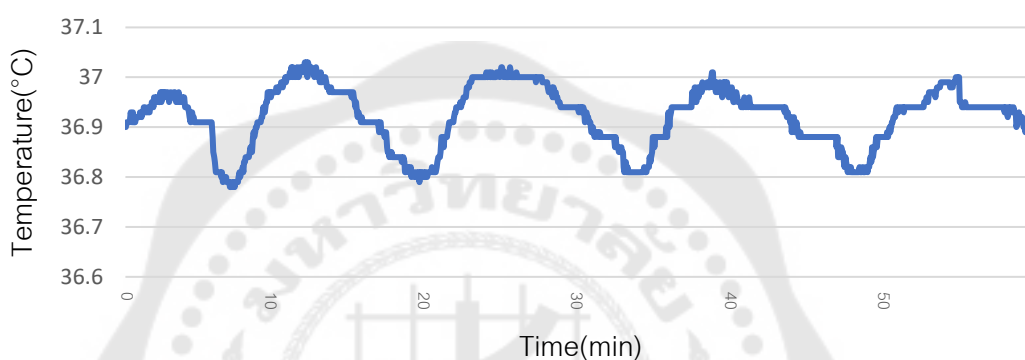


ภาพประกอบ 63 กราฟแสดงผลเปอร์เซ็นต์ความมีชีวิตรอดหลังจากเพาะเลี้ยงเซลล์มาแล้ว 24 ชั่วโมง

4.1.2 แบบปรับปรุง

1. ระดับอุณหภูมิ

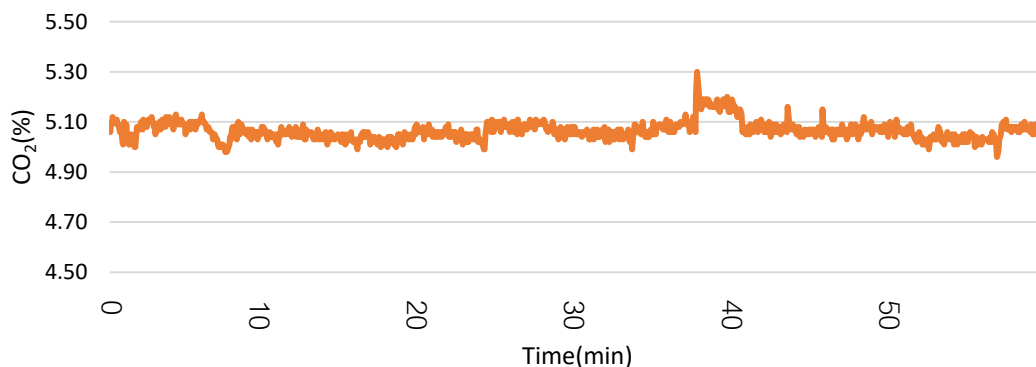
หลังจากที่บันทึกระดับของอุณหภูมิที่ได้จากเซนเซอร์ภายในส่วนที่ใช้ในการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ จะเห็นได้ว่าผลของระดับอุณหภูมิในส่วนที่ใช้บ่มเพาะเลี้ยงเซลล์นั้นยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม หรือ 37 ± 0.2 องศาเซลเซียสสามารถรักษาระดับอุณหภูมิต่ำสุดไม่เกิน 36.8 องศาเซลเซียส และสูงสุดไม่เกิน 37 องศาเซลเซียส สามารถทำให้ระดับค่าสูงสุดอยู่ไม่เกิน 37 องศาเซลเซียสเหมือนกับเครื่องต้นแบบ ดังกราฟดังภาพประกอบ 64



ภาพประกอบ 64 กราฟบันทึกระดับอุณหภูมิของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุง

2. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

หลังจากที่บันทึกระดับของความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากเซนเซอร์ภายในส่วนที่ใช้ในการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ จะเห็นได้ว่าผลของระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในส่วนที่ใช้บ่มเพาะเลี้ยงเซลล์นั้นยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสม หรือ 5 ± 0.2 เปอร์เซ็นต์ สามารถรักษาระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ และสูงสุดไม่เกิน 5.3 เปอร์เซ็นต์ โดยสามารถลดระดับการแกว่งของระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีขึ้นกว่าในแบบต้นแบบดังกราฟดังภาพประกอบ 65

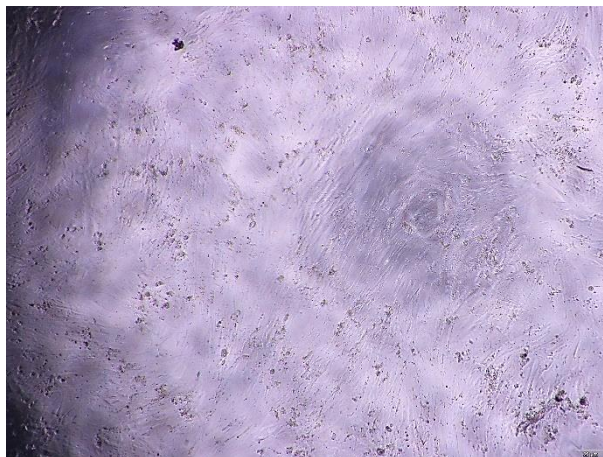


ภาพประกอบ 65 กราฟบันทึกระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุง

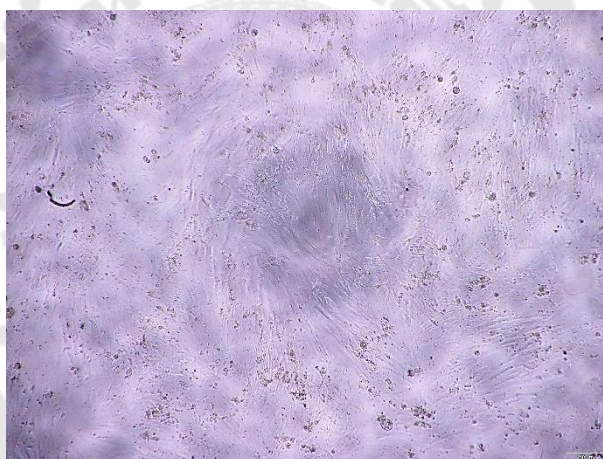
3. การเพาะเลี้ยงเซลล์

1. สัณฐานวิทยาของเซลล์

เช่นเดียวกับเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบต้นแบบในหลังจากที่ทำการเพาะเลี้ยงเซลล์ WS-1 เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงแบบปรับปรุง จนครบ 24 ชั่วโมงสามารถบันทึกภาพสัณฐานวิทยา ที่อัตราขยายของภาพเท่ากับ 200 μm ของเซลล์จากเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐานและแบบปรับปรุงที่สร้างขึ้นได้ดังภาพประกอบ 66 และ 67 พบว่าเซลล์ WS-1 นั้นมีการเจริญเติบโตยืดยาวออกตามลักษณะของเซลล์แบบรูปร่างกระสวย (fibroblast) โดยมีการเกาะกับพื้นผิวของจานที่ใช้ในการบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ตามลักษณะเซลล์ที่ต้องการ การเลี้ยงแบบ adherent ซึ่งเมื่อเทียบกันแล้วนั้นพบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเซลล์จากเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ทั้งสองนั้นมีการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนได้เหมือนกันและรูปร่างของเซลล์มีความใกล้เคียงกันไม่เกิดความผิดปกติ การตาย หรือหยุดเจริญเติบโตขึ้น



ภาพประกอบ 66 ภาพเซลล์ WS-1 จากเครื่องบ่มเพาะด้วยเซลล์แบบปรับปรุง หลังจากเพาะเลี้ยง 24 ชั่วโมง

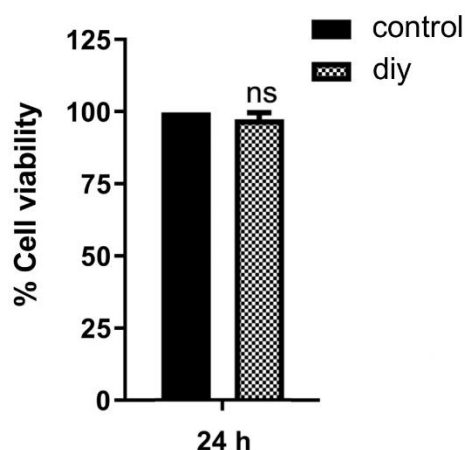


ภาพประกอบ 67 ภาพเซลล์ WS-1 จากเครื่องบ่มเพาะด้วยเซลล์แบบมาตรฐาน หลังจากเพาะเลี้ยง 24 ชั่วโมง

2. ผล Viability ที่ได้จากการทำ MTT Assay

หลังจากเซลล์ได้รับการบ่มเพาะจนครบ 24 ชั่วโมงแล้วนั้น ผลของเซลล์ที่มีชีวิตจากการทำ MTT assay นั้นเมื่อเทียบผลที่ได้จากเครื่องบ่มเพาะด้วยเซลล์แบบปรับปรุงกับเครื่องบ่มเพาะด้วยเซลล์แบบมาตรฐานพบว่าเครื่องบ่มเพาะด้วยเซลล์แบบปรับปรุงนั้นมีเปอร์เซ็นต์การมีชีวิตรอดของเซลล์ที่ไม่แตกต่างกับเครื่องบ่มเพาะด้วยเซลล์แบบมาตรฐานอย่างมีนัยสำคัญ ดังภาพประกอบ 68 นั้นหมายความว่าเครื่องบ่มเพาะด้วยเซลล์แบบปรับปรุงนั้น

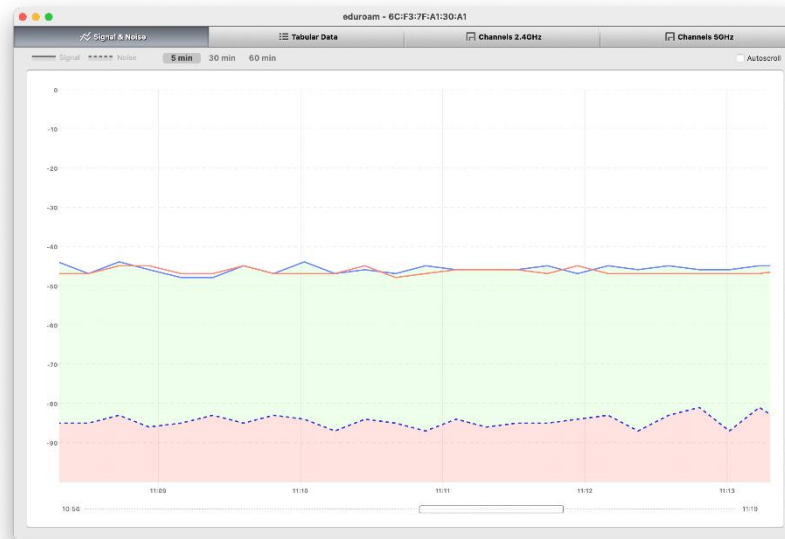
สามารถใช้ในการเลี้ยงเซลล์ได้เทียบเคียงกับเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐานได้จริงตาม ข้อมูลที่ยืนยันจากทั้งสัณฐานวิทยาและจำนวนการมีชีวิตรอด



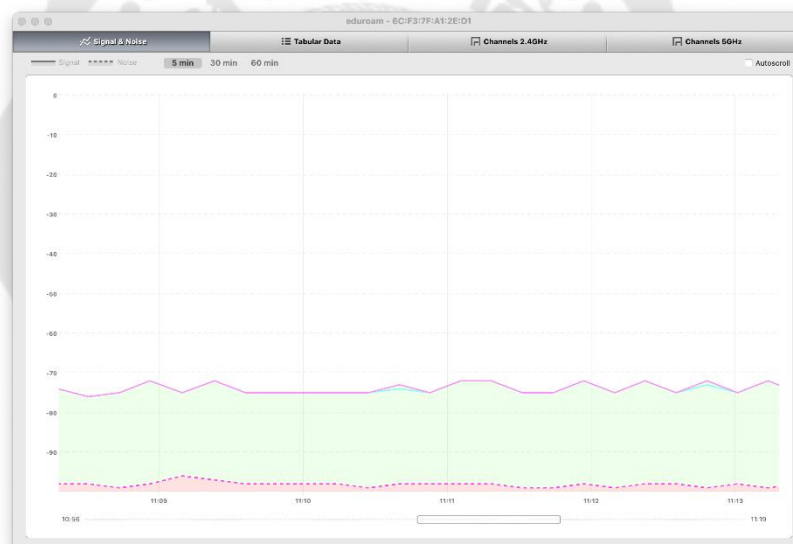
ภาพประกอบ 68 กราฟแสดงผลความมีชีวิตรอดหลังจากเพาะเลี้ยงเซลล์มาแล้ว 24 ชั่วโมง

4.2 การทดสอบซีลด์ลดทอนสัญญาณ

เมื่อทำการวัดระดับของระดับสัญญาณวายวายในพื้นที่ที่ใช้ในการทดลองในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่สร้างขึ้นในตัวต้นแบบ โดยทำการวัดในย่านความถี่ 2.4 และ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ได้ผลคือในย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ก่อนและหลังการใส่ซีลด์นั้นสามารถลดทอนระดับสัญญาณลงไปได้ประมาณ 10 เดซิเบล และย่าน 5 กิกะเฮิร์ตซ์สามารถลดทอนลงไปได้ประมาณ 14 เดซิเบลซึ่งสามารถได้ค่าถึงในระดับที่คำนวณไว้ในตอนแรก โดยกราฟผลของระดับสัญญาณที่วัดได้ ก่อนและหลังติดตั้งซีลด์ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แสดงดังภาพประกอบ 69 และ 70



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 69 ผลการวัดระดับสัญญาณวิทยุในพื้นที่ทดลองในย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์

(ก) ก่อนติดตั้ง (ข) หลังติดตั้ง



(ก)



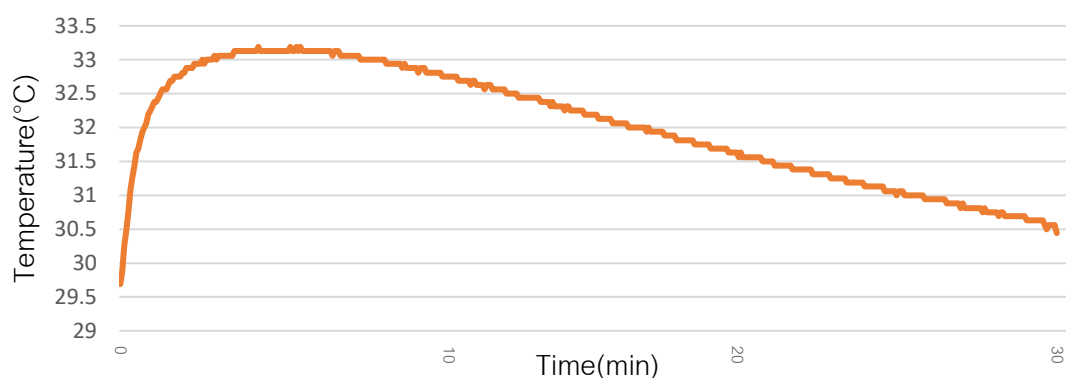
(ข)

ภาพประกอบ 70 ผลการวัดระดับสัญญาณวิทยุในพื้นที่ทดลองในย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์

(ก) ก่อนติดตั้ง (ข) หลังติดตั้ง

4.3 การทดสอบระบบทำความเย็น

หลังจากที่บันทึกระดับของอุณหภูมิที่ได้จากเซนเซอร์ภายในส่วนที่ใช้ติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณเป็นเวลา 30 นาที ได้ผลออกมาดังกราฟดังภาพประกอบ 71 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมระดับอุณหภูมิของอุปกรณ์กระจายสัญญาณนั้น สามารถควบคุมระดับความร้อนไว้ได้ไม่เกิน 33 องศาเซลเซียสทำให้ไม่เกิดการรบกวนส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์ ซึ่งต่างจากก่อนใช้ระบบทำความเย็นที่ความร้อนสูงถึง 45-60 องศาเซลเซียสจนรบกวนส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์



ภาพประกอบ 71 ระดับอุณหภูมิภายในส่วนที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณวางฟาย

4.4 การทดลองศึกษาผลกระทบของสัญญาณวางฟายต่อเซลล์มนุษย์

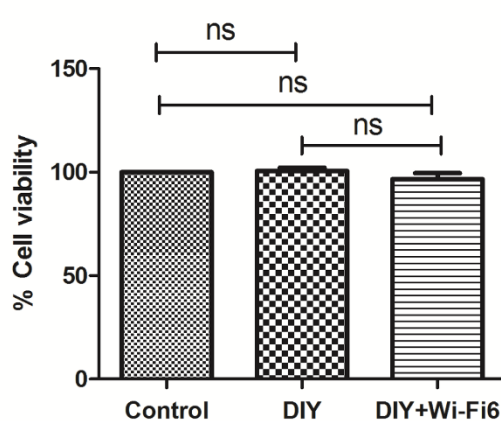
การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณวางฟายต่อเซลล์มนุษย์จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ และในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุง ทั้งสองแบบจะวิเคราะห์ผลด้านการเจริญเติบโตและแนวโน้มการเพิ่มจำนวนของเซลล์โดยใช้วิธีวิเคราะห์ด้วย MTT assay เช่นเดียวกับในการทดลองทดสอบการเพาะเลี้ยงเซลล์ของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ โดยเปรียบเทียบผลของเซลล์ระหว่างเซลล์ที่ไม่ได้รับสัญญาณวางฟาย และได้รับสัญญาณวางฟาย โดยมีผลการทดลองเป็นเวลา 24 ชั่วโมงในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ ดังภาพประกอบ 72 และผลการทดลองเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุง ดังภาพประกอบ 73

ผลที่ได้จากการทดลองในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบต้นแบบนั้นพบว่าผล MTT assay ที่ได้มาจากการทดลองนั้น เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ไม่ได้รับสัญญาณวางฟายนั้น เซลล์ที่ได้รับสัญญาณวางฟายเป็นเวลา 24 ชั่วโมงนั้นมีอัตราการรอดชีวิตอยู่ที่ 97 ± 0.92 % เมื่อเทียบและวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-way ANOVA แล้วนั้นไม่พบถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 24 ชั่วโมง

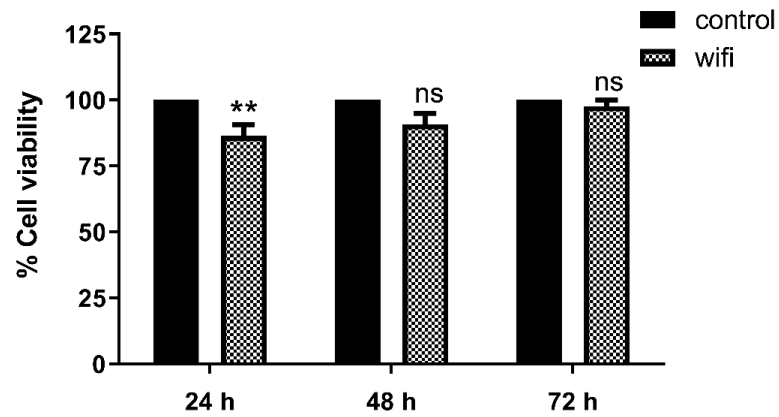
ผลที่ได้จากการทดลองในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุงนั้นพบว่าผล MTT assay ที่ได้มาจากการทดลองนั้น เมื่อเทียบกับเซลล์ที่ไม่ได้รับสัญญาณวิทยุฟายนั้น เซลล์ที่ได้รับสัญญาณวิทยุฟายเป็นเวลา 24 ชั่วโมงนั้นมีอัตราการรอดชีวิตอยู่ที่ 86.41 ± 2.45 % เมื่อเปรียบเทียบวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-way ANOVA พบถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนเซลล์ที่ได้รับสัญญาณวิทยุฟายเป็นเวลา 48 และ 72 ชั่วโมงนั้นมีอัตราการรอดชีวิตอยู่ที่ 90.76 ± 2.44 % และ 97.71 ± 1.32 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบวิเคราะห์ทางสถิติด้วย Two-way ANOVA แล้วนั้นไม่พบถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในช่วง 48 และ 72 ชั่วโมง

จากผลของเซลล์ที่ได้รับสัญญาณวิทยุฟายเป็นเวลา 24 ชั่วโมงของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุงนั้นพบว่ามีความแตกต่างจากเซลล์ที่ไม่ได้รับสัญญาณอย่างมีนัยสำคัญโดยมีความเป็นไปได้ว่าจะเกิดการหยุดการเจริญและการแบ่งตัว หรือ cell cycle arrest แต่เซลล์นั้นไม่เกิดความเสียหายหรือสามารถฟื้นฟูตัวเองและกลับมาสู่สภาวะปกติ สังเกตได้จากในช่วง 48 และ 72 ชั่วโมงนั้นเซลล์มีการฟื้นฟูกลับมาจนทำให้เซลล์ที่ได้รับสัญญาณวิทยุฟายนั้นไม่มีความต่างกับเซลล์ที่ไม่ได้รับสัญญาณในระดับที่มีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ในส่วนของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุงจะมีการวิเคราะห์ผลด้วยการ Fluorescence microscopy ผ่านการย้อม Hoechst stain เพื่อศึกษาผลในทางสัณฐานวิทยาเพิ่มเติมดังภาพประกอบ 74 จากผลที่ได้พบว่าทั้งในช่วง 24 48 และ 72 ชั่วโมงนั้นมีลักษณะเซลล์ที่ไม่แตกต่างกันหรือสามารถบอกได้ว่า เซลล์ที่ได้รับสัญญาณวิทยุฟายในทุกช่วงเวลานั้นไม่เกิดร่องรอยการตายของเซลล์ขึ้น ทั้งการตายในรูปแบบของ Apoptosis หรือ Necrosis

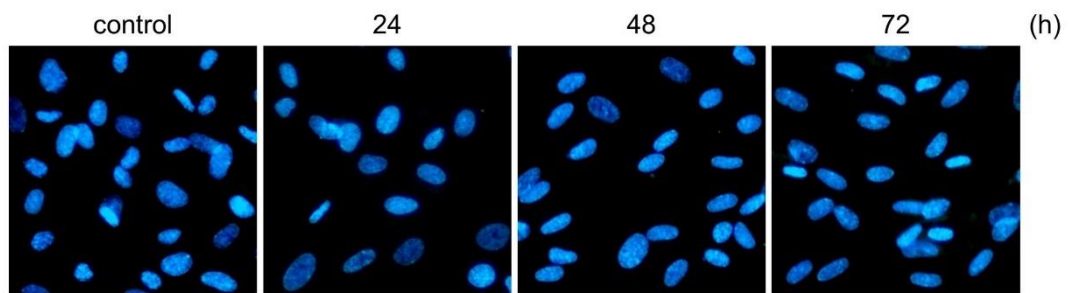


ภาพประกอบ 74 ผลการเจริญเติบโตของเซลล์ WS-1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมงจากการทดลองภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ต้นแบบ



ภาพประกอบ 73 ผลการเจริญเติบโตของเซลล์ WS-1 เป็นเวลา 72 ชั่วโมงจากการทดลอง
ภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุ่

WIFI incubation times



ภาพประกอบ 74 ผล Fluorescence microscopy ของเซลล์ WS-1 เป็นเวลา 72 ชั่วโมงจากการ
ทดลองภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบปรับปรุ่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการดำเนินงาน

การวิจัยในเรื่องการสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อศึกษาผลกระทบของสัญญาณวายฟาย 6 สามารถออกแบบและสร้างเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์เพื่อนำมาใช้เพาะเลี้ยงเซลล์ซึ่งใช้ในการศึกษาถึงผลกระทบของสัญญาณวายฟาย 6 ได้ โดยหลังจากที่ได้บันทึกและประเมินความสามารถในการรักษาในระดับอนุภูมิภาค และระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์พบว่าสามารถควบคุมได้ในระดับที่ต้องการ

หลังจากการนำมาทดสอบเปรียบเทียบบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์กับเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน สามารถสรุปได้ว่า เครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ที่สร้างขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพในการเพาะเลี้ยงเซลล์ได้จริงเทียบเท่ากับเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์แบบมาตรฐาน และสามารถติดตั้งอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟาย 6 ไว้ภายในซึ่งสามารถเปิดการทำงานควบคู่ไปกับการเพาะเลี้ยงเซลล์ภายในส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีระบบทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิของอุปกรณ์กระจายสัญญาณวายฟาย 6 ไม่ให้รบกวนส่วนที่ใช้เพาะเลี้ยงเซลล์ นอกจากนี้การทดสอบวัดระดับสัญญาณวายฟายที่ลดทอนได้จากซีลด์ที่ติดตั้งภายในเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ แสดงให้เห็นว่าสามารถลดทอนสัญญาณวายฟายในพื้นที่ทำการทดลอง เพื่อลดผลกระทบของสัญญาณวายฟายจากภายนอกเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์ในขณะที่ทำการทดลองได้ อย่างน้อย 10 dB ในย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ และ 15 dB ในย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์

จากการทดลองของผลกระทบของสัญญาณวายฟาย 6 ต่อเซลล์มนุษย์นั้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อทดลองกับเซลล์ผิวหนังของมนุษย์ (WS-1) ด้วยสัญญาณวายฟาย 6 ในย่านความถี่ 5 กิกะเฮิรตซ์นั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ว่าถึงแม้ช่วง 24 ชั่วโมงนั้นอาจจะมีการเกิดขึ้นของ Cell cycle arrest ทำให้จำนวนเซลล์ที่มีชีวิตรอดนั้นแตกต่างจากเซลล์ที่ไม่ได้รับสัญญาณวายฟายแต่ภายหลังจาก 48 ชั่วโมง ไปจนกระทั่ง 72 ชั่วโมงนั้นเซลล์นั้นมีการฟื้นฟูตัวเองสามารถเพิ่มจำนวนกลับมาได้เป็นระดับปกติ และจากผล Fluorescence microscopy ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่แสดงถึงความผิดปกติของรูปร่างเซลล์หรือการตาย ในผลทดลองจนครบ 72 ชั่วโมง ทำให้สามารถสรุปได้เบื้องต้นว่าเซลล์ของมนุษย์นั้นไม่ได้รับผลกระทบต่อสัญญาณวายฟาย 6 ในระดับที่มีนัยสำคัญแต่ยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาข้อมูลที่มีความละเอียดเพิ่มเติมหรือผลกระทบของสัญญาณวายฟายในด้านอื่นๆต่อเซลล์มนุษย์

ข้อเสนอแนะ

จากศึกษาในงานวิจัยนี้ นั้น สามารถเห็นได้ถึงปัญหาและข้อบกพร่องต่างที่สามารถนำไปแก้ไขได้ในอนาคต ดังนี้

1. การควบคุมระบบทำความร้อนและระดับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นควรเลือกอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูงมากกว่าที่เป็นอยู่ หรือเพิ่มจำนวนจุดติดตั้งหรือชนิดอุปกรณ์ทำความร้อนแบบอื่น เช่น แบบขดลวดเพื่อลดการเกิดไอน้ำในผิวภายในส่วนเพาะเลี้ยงเซลล์ บางครั้งจากอุณหภูมิผิววัสดุที่แตกต่างกัน รวมถึงซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมควรปรับปรุงเพื่อให้สามารถลดระยะเวลาในการรักษาระดับค่า หรือช่วงระดับค่าการโอเวอร์ชูต (Overshoot) ได้ดีกว่าปัจจุบัน
2. ระบบควบคุมความเย็นนั้นควรที่จะมีการเสริมการควบคุมเพื่อให้สามารถรองรับช่วงอุณหภูมิที่หลากหลายมากกว่านี้ และไม่ทำให้อุณหภูมินั้นต่ำจนทำให้เกิดการก่อตัวของหยดน้ำขึ้นในกรณีที่อุณหภูมิภายนอกนั้นมีระดับที่ต่ำกว่าปกติหรืออยู่ในห้องที่มีการควบคุมอุณหภูมิ
3. สามารถใช้วัสดุซิลด์ที่สามารถลดทอนสัญญาณได้เพื่อสามารถลดผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นได้จากสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ได้มากขึ้นตามการประยุกต์ใช้หรืองบประมาณ
4. การศึกษาผลกระทบของสัญญาณวายฟาย 6 ต่อเซลล์ควรมีการศึกษาที่มีความหลากหลายของลักษณะของสัญญาณเช่น มีการใช้งานส่งข้อมูล ที่ความเร็ว จำนวนผู้ใช้หรือปริมาณข้อมูล เพื่อให้มีผลที่ครอบคลุมมากขึ้น

บรรณานุกรม

- Aït-Aïssa, S., Billaudel, B., Gannes, F. P. D., Hurtier, A., Haro, E., Taxile, M., . . . Lagroye, I. (2010). In situ detection of gliosis and apoptosis in the brains of young rats exposed in utero to a Wi-Fi signal. *Comptes Rendus Physique*, 11(9-10), 592-601.
- Atasoy, H. I., Gunal, M. Y., Atasoy, P., d, S. E., & Bugdayci, G. (2012). Immunohistopathologic demonstration of deleterious effects on growing rat testes of radiofrequency waves emitted from conventional Wi-Fi devices. *Journal of Pediatric Urology Company*, 9(2), 223-229.
- Delavarifar, S., Razi, Z., Tamadon, A., Rahmanifar, F., Mehrabani, D., Owjfar, M., . . . Abasali, S. Z. (2020). Low-power Density Radiations Emitted from Common Wi-Fi Routers Influence Sperm Concentration and Sperm Histomorphometric Parameters: A New Horizon on Male Infertility Treatment. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 10(2), 167-176.
- Invitrogen G.Cell culture basics. life technologies.* (2014).
- Ishak, N. H., Ariffin, R., Ali, A., Sagiruddin, M. A., & Tawi, F. M. T. (2011). *Biological Effects of WiFi Electromagnetic Radiation*. Paper presented at the IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering.
- Koyama, S., Narita, E., Suzuki, Y., Taki, M., Shinohara, N., & Miyakoshi, J. (2015). Effect of a 2.45-GHz radiofrequency electromagnetic field on neutrophil chemotaxis and phagocytosis in differentiated human HL-60 cells. *J Radiat Res*, 56(1), 30-36.
- Lee, S. S., Kim, H. R., Kim, M. S., Park, S., Yoon, E. S., Park, S. H., & Kim, D. W. (2014). Influence of smartphone Wi-Fi signals on adipose-derived stem cells. *J Craniofac Surg*, 25(5), 1902-1907.
- Nunchuen, S., Punpai, S., Tanechpongamb, W., & Tarateeraseth, V. (2019). *Creating a simple CO2 incubator for studying the human cells*. Paper presented at the Elect. Eng. Conf 2019 (EECON). Thailand.
- Songsiri, S., Tarateeraseth, V., & Tanechpongamb, W. (2020). *Do-It-Yourself CO2 Incubator with Adjustable Static Magnetic Field for Biological Research*

Laboratories. Paper presented at the 17th Int. Conf. Elect. Eng. Electron. Comp.,
Telecommun. Inf. Tech. (ECTI-CON), Phuket, Thailand, 2020.

ธรรชาติร์เศรษฐ์, ว. ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า.

ธรรชาติร์เศรษฐ์, ว. (2557). สนามแม่เหล็กไฟฟ้า 18 ซอยประชาอุทิศ 33 แยก 25 แขวงบางมด เขต
ทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140: โรงพิมพ์อักษรสัมพันธ์ (1987).

อัครเอกมาลิน, ป. (2564). การสื่อสารเคลื่อนที่ 5G และสายอากาศ. วารสารวิชาการพระจอมเกล้า
พระนครเหนือ.





ตาราง 5 ชุดคำสั่งโปรแกรม Arduino ควบคุมการทำงานของเครื่องบ่มเพาะเลี้ยงเซลล์

คำสั่ง

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <avr/wdt.h>
#include "SoftwareSerial.h"
#include "cozir.h"
//float T,h = 0;
//unsigned long ElapsedTime,StartTime,CurrentTime;
float TSetpoint = 37;
float TempThreshold = 0.995

float CO2Setpoint = 5;
float CO2Threshold = 0.99;
float CO2Bootpoint = 2;
int SolenoidOnTime = 200;

int Heater = 5;
int Solenoid = 6;
int fan = 7;

#define ONE_WIRE_BUS 4
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
float T1, T2, AvgT, SingleT = 0;
```

ตาราง 6 (ต่อ)

คำสั่ง

```
SoftwareSerial nss(2, 3);
COZIR czr(nss);
float SingleCO2, CO2 = 0;
float multiplier = 0.001;
float reading = 0;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  czr.SetOperatingMode(CZR_POLLING);
  sensors.begin();
  lcd.begin();
  lcd.backlight();
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  pinMode(Solenoid, OUTPUT);
  pinMode(fan, OUTPUT);
  pinMode(Heater, OUTPUT);
  digitalWrite(Heater, LOW);
  digitalWrite(Solenoid, LOW);
  analogWrite(fan, 255);
  SingleCO2 = czr.CO2() * multiplier;
  wdt_enable(WDTO_4S);
}
```

ตาราง 6 (ต่อ)

คำสั่ง

```
void loop()
{
//   StartTime = millis();
   Temp();
   Carbon();
   Monitor();
   LCD();
   wdt_reset();
//   CurrentTime = millis();
//   ElapsedTime = CurrentTime - StartTime;
//   Cozир();
}

void Temp()
{
for (int i = 0; i < 3; i++)
{
   sensors.requestTemperatures();
   T1 = sensors.getTempCByIndex(0);
   T2 = sensors.getTempCByIndex(1);
   SingleT += (T1 + T2)/2;
}
AvgT = SingleT/3;
SingleT = 0;           // Turn on/off heater based on temperature reading
```

ตาราง 6 (ต่อ)

คำสั่ง

```
if (AvgT < TempThreshold*TSetpoint)
{
    digitalWrite(Heater, HIGH);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH);
}
else if (AvgT > TempThreshold*TSetpoint)
{
    digitalWrite(Heater,LOW);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
}
else
{
    digitalWrite(Heater, LOW);
    digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW);
}
}

void Carbon()
{
    for (int i = 0; i < 3; i++)
    {
        SingleCO2 += czr.CO2() * multiplier;
    }
    CO2 = SingleCO2 / 3;
    SingleCO2 = 0;
```

ตาราง 6 (ต่อ)

คำสั่ง

```
if (CO2 < CO2Bootpoint )
{
    digitalWrite(Solenoid, HIGH);
    delay(SolenoidOnTime*3);
    digitalWrite(Solenoid, LOW);
}
else if (CO2 > CO2Bootpoint && CO2 < CO2Threshold * CO2Setpoint)
{
    digitalWrite(Solenoid, HIGH);
    delay(SolenoidOnTime);
    digitalWrite(Solenoid, LOW);
}
else
{
    digitalWrite(Solenoid, LOW);
}
}

//void Cozir()
//{
// t = czr.Celsius();
// h = czr.Humidity();
//
// Serial.print("Celcius : ");Serial.println(T);
// Serial.print("Humidity : ");Serial.println(h);
//}
```

ตาราง 6 (ต่อ)

คำสั่ง

```
void LCD()
{
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(F("Temp = "));
  lcd.print(AvgT);
  lcd.print(F(" "));
  lcd.print(char(223));
  lcd.print(F("C"));
  //////////////////////////////////////
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(F("CO2 = "));
  lcd.print(CO2);
  lcd.print(F(" %"));
}
```

```
void Monitor()
{
  // Serial.print(T1); //left
  // Serial.print(" ");
  // Serial.print(T2); //right
  // Serial.print(" ");
  // Serial.print(AvgT);
  // Serial.print(" ");
  // Serial.println(CO2);
  // Serial.print("TL ");
  // Serial.println(T1);
}
```

ตาราง 6 (ต่อ)

คำสั่ง

```
// Serial.print("TR ");
// Serial.println(T2);
// Serial.println("- -----");

// Serial.print(0);
// Serial.print(" ");
// Serial.print(1000);
// Serial.print(" ");

Serial.print("T:");
Serial.print(AvgT);
Serial.print(",");
Serial.print("CO2:");
Serial.println(CO2);
// Serial.print(",");
// Serial.print("D:");
// Serial.println(ElapsedTime);
// Serial.println("_____");
}
```

ประวัติผู้เขียน

