

การประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับการเรียนการสอน

ศรัณย์รัชย์ เสนาสุธรรม^{1*}, ศุภกานต์ พรรษาไพบุลย์², ประจักษ์ บุญโสภณ¹ และ ธเนศ พรหมนิม¹

¹ภาควิชาวิทยาการเภสัชกรรมและเภสัชอุตสาหกรรม คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

²ศูนย์เครื่องมือวิจัยทางเภสัชศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: Raweewan.s@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับการเรียนการสอน มีวัตถุประสงค์เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับการเรียนการสอน ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานและเพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคเอนแคปซูเลต โดยประดิษฐ์จากวัสดุที่เหลือใช้หรืออะไหล่จากเครื่องมือต่างๆที่ชำรุด ไม่ได้ใช้งานแล้ว เพื่อลดข้อจำกัดด้านงบประมาณในการจัดหาเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการออกแบบโครงสร้าง การจัดหาวัสดุ การประกอบโครงสร้าง และการทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน ผลการวิจัยพบว่า ขนาดของอนุภาคเอนแคปซูเลตที่เตรียมด้วยมือ อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องในท้องตลาด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $2,430.08 \pm 140.86$ ไมโครเมตร, $1,951.33 \pm 116.60$ ไมโครเมตร และ $1,917.24 \pm 34.71$ ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งอนุภาค ที่เตรียมได้จากอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์เองมีลักษณะทางกายภาพ ทั้งในด้านรูปร่างและขนาดของอนุภาค อยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p\text{-value} = 0.653$) เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่เตรียมจากเครื่องเอนแคปซูเลชันเชิงพาณิชย์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถควบคุมกระบวนการผลิตอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพสอดคล้องกับมาตรฐานที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานด้านการเรียนการสอน

คำสำคัญ: เอนแคปซูเลชัน, อนุภาคเอนแคปซูเลต, ประสิทธิภาพ, อุปกรณ์กึ่งอัตโนมัติ, วัสดุเหลือใช้

Development of a Semi-Automatic Microencapsulation Production Device for Educational Purposes

Sarunrus Senasuthum^{1*}, Supakarn Hansapaiboon², Prajuk Boonsopa¹ and Tanet Promnim¹

¹*Department of Pharmaceutic and Industrial Pharmacy, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand*

²*Pharmaceutical Research Instrument Center, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Chulalongkorn University, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand*

*Corresponding author's e-mail: Raweevan.s@chula.ac.th

Abstract

Development of a Semi-Automatic Encapsulation Particle Production Device for Teaching and Learning. This study aimed to develop a semi-automatic encapsulation particle production device for teaching and learning purposes, to evaluate its operational performance, and to investigate the physical properties of the encapsulated particles produced. The device was constructed primarily from recycled materials and components salvaged from damaged or obsolete scientific instruments, with the objective of reducing the budgetary constraints associated with purchasing commercial scientific equipment. The research process consisted of device design, material procurement, structural assembly, and performance evaluation. The results demonstrated that the mean particle sizes of encapsulated particles prepared manually, using the fabricated semi-automatic device, and using a commercially available encapsulation system were $2,430.08 \pm 140.86 \mu\text{m}$, $1,951.33 \pm 116.60 \mu\text{m}$, and $1,917.24 \pm 34.71 \mu\text{m}$, respectively. The encapsulated particles produced by the fabricated device exhibited physical characteristics, including particle shape and size, that were comparable to those produced by the commercial encapsulation system, with no statistically significant differences ($p\text{-value} = 0.653$). These findings indicate that the developed semi-automatic device can effectively control the particle production process and produce encapsulated particles of acceptable quality that are consistent with commercial standards. Therefore, the device is suitable for use as a cost-effective teaching and learning tool in pharmaceutical and related laboratory education.

Keywords: Encapsulation, Encapsulated Beads, Efficiency, Semi-automatic Device, Waste Materials

บทนำ

ภาควิชาวิทยาการเกษตรกรรมและเกษตรอุตสาหกรรม เป็นภาควิชาหนึ่งของคณะเกษตรศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีจัดการการเรียนการสอน และการบริการวิชาการ ความเชี่ยวชาญของคณาจารย์ในภาควิชามีความหลากหลายของความเชี่ยวชาญ ด้านบุคลากรสายปฏิบัติการมีบุคลากรที่มีความชำนาญและความรู้ในการปฏิบัติงานทั้งมีความรู้ด้านออกแบบการประดิษฐ์และพัฒนา เครื่องมือสำหรับการเรียนการสอนและงานวิจัย ซึ่งเป็นแนวทางสนับสนุนการเรียนการสอน การผลิตงานวิจัยที่มีคุณภาพอีกทั้งสามารถ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงถึงงานวิจัยและการพัฒนาเกษตรกรรมในระดับอุตสาหกรรมได้

ที่ผ่านมาภาควิชาจัดการเรียนการสอนในวิชาปฏิบัติการ ปฏิบัติการไอออนิกเจลชัน (Ionic Gelation) เป็นส่วนหนึ่งของการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการ ปฏิบัติการไอออนิกเจลชัน เป็นกระบวนการเตรียมอนุภาคเอนแคปซูลเลต (Encapsulated beads) วิธีไอออนิกเจลชัน (Ionic Gelation) วรี (2557) เป็นวิธีการหนึ่งในกระบวนการผลิตอนุภาคที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี มีข้อดีคือสามารถเตรียมได้ง่าย ไม่ต้องใช้เครื่องมือเชิงกลที่ทำให้เกิดความรุนแรงขณะเตรียม ไม่ใช้สารละลายอินทรีย์ ไม่ใช้ความร้อน และเหมาะสำหรับสารที่ไวต่อความร้อนและสลายตัวได้ง่าย Goh et al (2012); Chan (2011) นอกจากนี้แอลจินเนตยังสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับการห่อหุ้มสารเพื่อเพิ่มความคงตัวและควบคุมการปลดปล่อยสาร Guan et al (2011) แต่เนื่องจากการเรียนการสอน ในการทำปฏิบัติการนี้นิสิตจะทำปฏิบัติการทดลองเตรียมด้วยมือ ซึ่งมีจำนวนนิสิตที่ทำการทดลองปีการศึกษาละไม่ต่ำกว่า 80 คน โดยทำการทดลองแบ่งเป็นกลุ่ม จึงอาจทำให้ผลการทดลองไม่แม่นยำ อนุภาคที่ได้มีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน อีกทั้งเครื่องเอนแคปซูลเลชันที่มีขายอยู่ในท้องตลาดในปัจจุบันมีมูลค่าสูง ประมาณ 1.3 ล้านบาท นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่ค่อนข้างสูง จึงทำให้ผู้วิจัยเกิดความคิดประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูลเลตแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับการเรียนการสอนจากวัสดุที่เหลือใช้หรืออะไหล่จากเครื่องมือต่างๆที่ชำรุด ไม่ได้ใช้งานแล้วเป็นการประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์เพื่อสร้างมูลค่าให้กับวัสดุ พัฒนา และสัณฐาน (2562) ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูลเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้จะเป็แนวทางในการแก้ปัญหาในการทดลองพัฒนาการเรียนการสอนให้นิสิตมีความรู้และทักษะพื้นฐานเชิงหลักการและเหตุผลจากการลงมือปฏิบัติจริง อีกทั้งสามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยง อาจจะพัฒนาเป็นเกษตรภัณฑ์สู่เชิงพาณิชย์ในระดับอุตสาหกรรมได้ นอกจากนี้ยังสามารถสนับสนุนในงานบริการวิชาการอื่นๆ ตลอดจนสามารถนำมาทำงานวิจัยการผลิตเกษตรภัณฑ์และเครื่องสำอางของภาควิชาฯ ด้วย

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูลเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นของเครื่องมือที่ใช้ในการเรียนการสอนและงานวิจัย ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคที่ได้จากการเตรียมด้วยมือ อุปกรณ์การผลิตไม่เอนแคปซูลเลชันแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องที่มีในท้องตลาดโดยได้รับความร่วมมือการสนับสนุนจากศูนย์เครื่องมือวิจัยทางเกษตรศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งถือว่ามีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน นำพ่นพินิพอยล์ และคณะ (2556) ดังนั้นทำให้มั่นใจได้ว่าเครื่องที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นมีศักยภาพ สามารถนำมาสนับสนุนงานด้านการเรียนการสอน งานบริการวิชาการ ตลอดจนงานวิจัยการผลิตเกษตรภัณฑ์และเครื่องสำอางได้ในอนาคต

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูลเลตแบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับการเรียนการสอน
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูลเลตแบบกึ่งอัตโนมัติ
3. เพื่อทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคเอนแคปซูลเลต

ระเบียบวิธีวิจัย

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากร: อนุภาคเอนแคปซูลเลตทั้งหมดที่ได้จากการเตรียมด้วยมือ, อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูลเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องเอนแคปซูลเลชันในท้องตลาด

กลุ่มตัวอย่าง: อนุภาคเอนแคปซูลเลตที่สุ่มเก็บจากแต่ละการทดลองเพื่อนำมาศึกษารูปร่างลักษณะและวัดขนาดภายใต้กล้องจุลทรรศน์

2. เครื่องมือวิจัย

2.1 การออกแบบโครงสร้าง

ผู้วิจัยได้ออกแบบส่วนประกอบของเครื่อง โครงสร้างชิ้นส่วน รูปแบบลักษณะการทำงาน รวมถึงจัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการประกอบตัวเครื่อง โดยใช้วัสดุเหลือใช้ หรืออะไหล่เครื่องมือที่ชำรุดไม่ได้ใช้งานแล้ว นำมาดัดแปลงเพื่อลดงบประมาณในการจัดซื้อวัสดุ

2.2 ประกอบโครงสร้างและชิ้นส่วนต่างๆ

ผู้วิจัยดำเนินการประกอบโครงสร้างของอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบโครงสร้างไว้

2.3 การเตรียมสารละลายและอุปกรณ์

2.3.1. เตรียมสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ (Ajax Finechem, ประเทศออสเตรเลีย) ความเข้มข้น ร้อยละ 3 ของน้ำหนักโดยปริมาตร

2.3.2. เตรียมสารละลายโซเดียมอัลจิเนต (Algogel, ประเทศไทย) ความเข้มข้น ร้อยละ 3 ของน้ำหนักโดยปริมาตร

2.3.3 เตรียมหัวจ่าย (Needle) ขนาด Diameter 1.2x2.5 มิลลิเมตร

2.4. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาค

ผู้วิจัยทำการทดสอบศักยภาพของอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ขึ้น เพื่อตรวจสอบว่าสามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ โดยทดสอบการเตรียมอนุภาคเอนแคปซูเลตเปรียบเทียบกับระหว่างการเตรียมด้วยมือ (Manual), อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องเอนแคปซูเลชันในท้องตลาด (B390, Buchi, เมืองฟลาวิล, ประเทศสวิตเซอร์แลนด์) ทำการเตรียมด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 1 นาที จำนวน 3 ครั้ง จากนั้นสุ่มเก็บตัวอย่างจำนวนครั้งละ 3 ตัวอย่าง เพื่อนำมาวิเคราะห์รูปร่างลักษณะ และวัดขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Ti2, Nikon, เมืองโตเกียว, ประเทศญี่ปุ่น)

3. สถิติที่ใช้ในการวิจัย

การประมวลผลการวิจัยโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Microsoft Excel และการอธิบายข้อมูลจะใช้สถิติเชิงพรรณนา นำเสนอข้อมูลลักษณะพื้นฐานของกลุ่มตัวอย่างในรูปแบบดังนี้

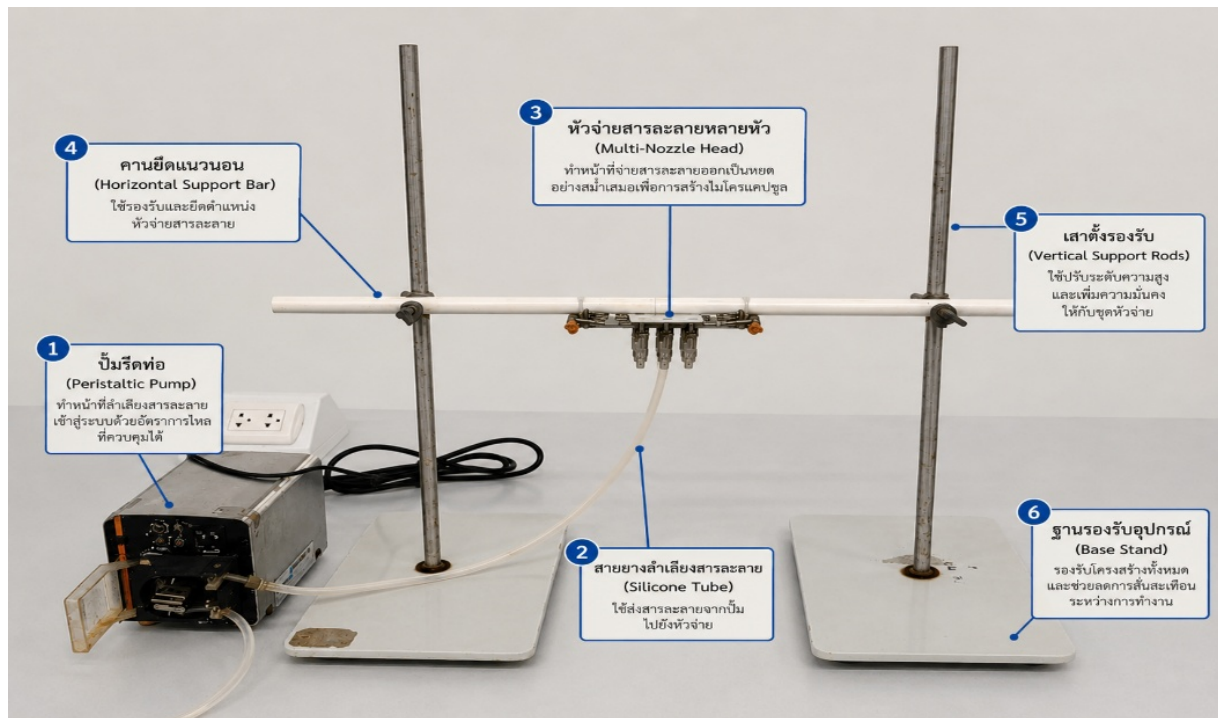
- ค่าเฉลี่ย (Mean)
- ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD)
- การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

ผลการวิจัย

1. การออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการออกแบบโครงสร้าง รูปแบบลักษณะการทำงาน จัดหาวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็นในการประกอบเครื่องจากวัสดุเหลือใช้ เช่น วัสดุอุปกรณ์ หรืออะไหล่เครื่องมือที่ชำรุดไม่ได้ใช้งานแล้ว นำมาดัดแปลงเพื่อลดงบประมาณในการจัดซื้อเครื่องมือประกอบเป็นโครงสร้างของอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้โดยโครงสร้างของอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ มีองค์ประกอบ ดังภาพที่ 1

- คานยึด เสา และฐานรองรับอุปกรณ์ สามารถปรับขึ้น-ลง ได้
- ชุดหัวจ่าย มีวาล์ว สามารถเปิด ปิด ควบคุมการจ่ายสารละลาย โดยเป็นแบบแยกอิสระแบ่งออกเป็น 3 ช่อง ทนทานสามารถถอดล้างได้
- ปั๊ม (Peristaltic Pump) ทำหน้าที่ ลำเลียงของเหลวเข้าสู่หัวจ่ายสารละลาย ซึ่งจะถูกนำมาประกอบเป็นโครงสร้างที่ออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานประเภทต่างๆ (ปิยมณ พัวพงศกร, 2561)



ภาพที่ 1 แสดงการออกแบบอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติ

จากภาพที่ 1 สำหรับการทำงานของอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์จะมีลักษณะการทำงานเป็นการออกแบบมาเพื่อจ่ายของเหลวได้อย่างแม่นยำ โครงสร้างเรียบง่าย แข็งแรง ทนทานและถอดออกทำความสะอาดได้ง่ายสามารถรองรับสารละลายได้หลายชนิด

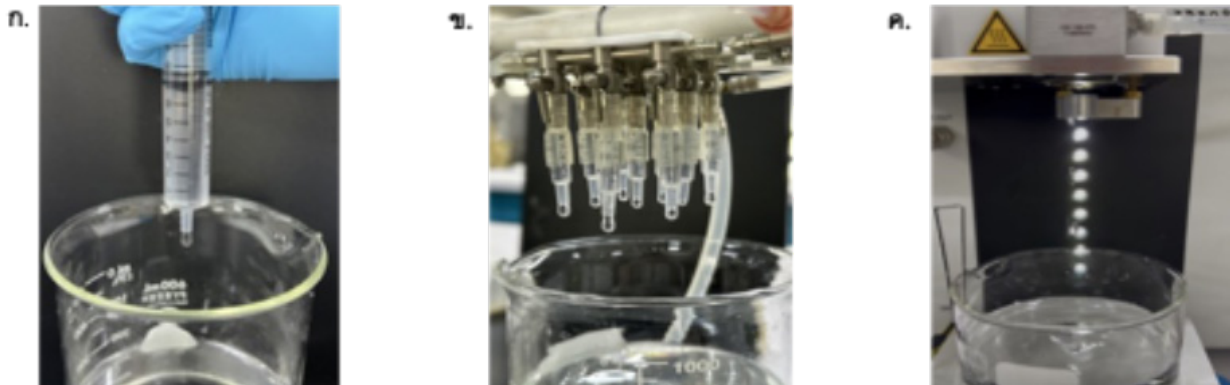
ในส่วนการทำงานของเครื่องเอนแคปซูเลชันในห้องทดลอง จากภาพที่ 2 จะอาศัยหลักการแตกตัวของสายของเหลวแบบลามินาร์ โดยสารละลายพอลิเมอร์หรือสารหล่อหุ้มจะถูกป้อนผ่านหัวฉีดที่สามารถปรับขนาดได้ด้วยอัตราการไหลที่คงที่สารละลายที่ไหลจะผ่านตัวกำเนิดการสั่น ซึ่งสามารถควบคุมความถี่และแอมพลิจูดสายของสารละลาย ส่งผลให้สายของเหลวแตกตัวออกเป็นหยด และตกลงสู่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ เกิดการก่อตัวเป็นเจลแบบไอออนิกเจลชัน (Ionic Gelation) จนได้อนุภาคเอนแคปซูเลตทรงกลมที่มีขนาดสม่ำเสมอ (Whelehan & Marison, 2011)



ภาพที่ 2 แสดงเครื่องเอนแคปซูเลชันในห้องทดลอง

2. ทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติ

ผู้วิจัยทำการทดลองเตรียมอนุภาคเอนแคปซูเลตด้วยมือ (Manual), อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ขึ้น และเครื่องเอนแคปซูเลชันที่มีในท้องตลาด โดยแต่ละการทดลองจะเตรียมอนุภาคเอนแคปซูเลต อัตราการไหลเท่ากับ 1 มิลลิลิตรต่อหน้าที่ เป็นเวลา 1 นาที จำนวน 3 ครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 3 และสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคที่ได้

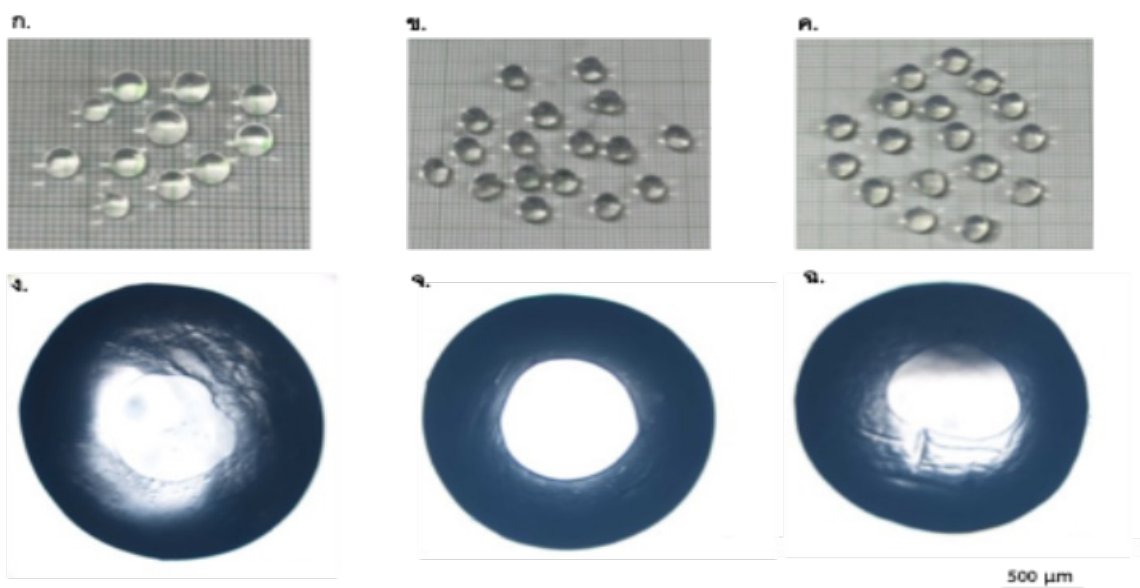


ภาพที่ 3 แสดงเตรียมอนุภาคเอนแคปซูเลตด้วยมือ (ก), อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ขึ้น (ข) และเครื่องเอนแคปซูเลชันในท้องตลาด (ค)

3. ทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคเอนแคปซูเลต

3.1 การวิเคราะห์รูปร่างลักษณะ

สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่าง ผู้วิจัยจะทำการสุ่มเก็บกลุ่มตัวอย่างของอนุภาคเอนแคปซูเลตที่ได้จากการเตรียมด้วยมือ (Manual), อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ขึ้น และเครื่องเอนแคปซูเลชันในท้องตลาด นำมาวิเคราะห์รูปร่างลักษณะด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 อนุภาคเอนแคปซูเลตที่ได้จากการเตรียมด้วยมือ (ก,ง), อุปกรณ์การผลิตไมโครเอนแคปซูเลชันแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ (ข,จ) และเครื่องเอนแคปซูเลชันในท้องตลาด (ค,ฉ)

จากภาพที่ 4(ก) - 4(ค) แสดงให้เห็นถึงกลุ่มตัวอย่างของอนุภาคเอนแคปซูเลตที่ได้จากการเตรียมด้วยมือ อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องเอนแคปซูเลชันในท้องตลาด ตามลำดับ พบว่าอนุภาคจากการเตรียมด้วยมือมีขนาดที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากแรงกดบนกระบอกฉีดของผู้วิจัย ซึ่งมีความเร็วไม่คงที่ ทำให้อนุภาคมีหลายขนาดในกลุ่มตัวอย่างที่เตรียมได้ ขณะที่อนุภาคจากอุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ขึ้นและเครื่องในท้องตลาด ทั้งสองมีขนาดใกล้เคียงกันในกลุ่มตัวอย่างเดียวกัน เนื่องจากผู้วิจัยสามารถตั้งอัตราความเร็วของการผลิตให้คงที่ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมคุณภาพขนาดของอนุภาคได้ เมื่อสุ่มอนุภาคจากกลุ่มตัวอย่าง นำไปวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าอนุภาคที่ได้จากการเตรียมด้วยมือ, อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติ และเครื่องในท้องตลาด มีลักษณะรูปร่างทรงกลม มีความโปร่งใส ดังแสดงในภาพที่ 4(ง) และ 4(จ) ตามลำดับ

3.2 การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาค

การวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคเอนแคปซูเลต ผู้วิจัยใช้วิธีสุ่มเก็บจากตัวอย่างจากการทดลองเตรียมทั้ง 3 ครั้ง จากนั้นวัดขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ย (Mean), ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) และการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคที่ได้จากการเตรียมด้วยมือ, อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องเอนแคปซูเลชันในท้องตลาด ทำการทดลองเตรียมด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 1 มิลลิตรต่อนาที ในเวลา 1 นาที จำนวน 3 ครั้ง

การทดลองที่	ขนาดอนุภาค (ไมโครเมตร) (n = 3)		
	เตรียมด้วยมือ	อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติ	เครื่องในท้องตลาด
1	2,274.53 ± 65.54	1,833.15 ± 39.15	1,879.23 ± 25.53
2	2,466.68 ± 90.43	2,066.29 ± 36.86	1,947.26 ± 19.14
3	2,549.03 ± 72.63	1,954.55 ± 78.43	1,925.22 ± 11.47
ขนาดเฉลี่ย	2,430.08	1,951.33	1,917.24
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย	140.86	116.60	34.71
p-value	0.0019		

จากตารางที่ 1 พบว่า ขนาดของอนุภาคเอนแคปซูเลตที่เตรียมด้วยมือ, อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องในท้องตลาด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $2,430.08 \pm 140.86$ ไมโครเมตร, $1,951.33 \pm 116.60$ ไมโครเมตร และ $1,917.24 \pm 34.71$ ไมโครเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า ขนาดของอนุภาคจากการเตรียมด้วยมือที่ได้อยู่ในช่วงกว้าง หลากหลายขนาด ขณะที่อนุภาคจากเครื่อง มีความแตกต่างของขนาดที่น้อยลงมา ในส่วนของการวิเคราะห์ผลความแปรปรวนทางเดียวจากกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม พบว่ามีค่า p-value เท่ากับ 0.0019 ซึ่งพบว่าขนาดอนุภาคที่ได้จากการเตรียมด้วยมือ อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องในท้องตลาด มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) จากกลุ่มข้อมูลของขนาดอนุภาค ระหว่างการเตรียมด้วยมือ อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องเอนแคปซูเลชันในท้องตลาด

การทดสอบรายคู่	p-value	ผลวิเคราะห์
ทำด้วยมือ และ อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์	0.011	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
ทำด้วยมือ และ เครื่องในท้องตลาด	0.004	แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ
อุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ และ เครื่องในท้องตลาด	0.653	ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 2 หากวิเคราะห์เปรียบเทียบวิธีการเตรียมอนุภาคระหว่างคู่ พบว่าการเตรียมด้วยมือให้ขนาดอนุภาคใหญ่กว่าการใช้เครื่องทั้งสองชนิดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ขณะที่เครื่องที่ประดิษฐ์และเครื่องในท้องตลาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุปผลการวิจัย

จากการประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติในการศึกษาค้นคว้า พบว่าขนาดของอนุภาคเอนแคปซูเลตที่เตรียมด้วยมือ, อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติที่ประดิษฐ์ และเครื่องในท้องตลาด มีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ $2,430.08 \pm 140.86$ ไมโครเมตร, $1,951.33 \pm 116.60$ ไมโครเมตร และ $1,917.24 \pm 34.71$ ไมโครเมตร ตามลำดับ อนุภาคที่เตรียมได้จากอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์เอง มีลักษณะทางกายภาพ ทั้งในด้านรูปร่างและขนาดของอนุภาค อยู่ในเกณฑ์ที่ใกล้เคียงและไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ $p\text{-value} = 0.653$ เมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่เตรียมจากเครื่องเอนแคปซูเลชันเชิงพาณิชย์ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่ประดิษฐ์ขึ้นสามารถผลิตอนุภาคที่มีขนาดไม่แตกต่างจากเครื่องเชิงพาณิชย์ภายใต้เงื่อนไขการทดลองนี้และมีศักยภาพในการใช้เป็นอุปกรณ์ฝึกปฏิบัติการต้นทุนต่ำได้

นอกจากนี้ การประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติดังกล่าวยังเป็นแนวทางที่ช่วยลดข้อจำกัดด้านงบประมาณในการจัดหาเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เนื่องจากเครื่องเอนแคปซูเลชันในท้องตลาดมักมีราคาสูง และมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาของเครื่อง ซึ่งอาจไม่คุ้มค่าต่อการลงทุนสำหรับการใช้งานในระดับการเรียนการสอน การประดิษฐ์อุปกรณ์การผลิตเอนแคปซูเลชันแบบกึ่งอัตโนมัติเองจึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องมือได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะเดียวกันยังถือว่าการสร้างมูลค่าให้กับวัสดุ โดยการประดิษฐ์เครื่องมือจากวัสดุที่เหลือใช้ อานาจ ใจคำฟู และคณะ (2560) และสามารถตอบสนองวัตถุประสงค์ด้านการเรียนรู้และการฝึกทักษะเชิงปฏิบัติการของนิสิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้นิสิตสามารถศึกษาหลักการและกระบวนการเอนแคปซูเลชันจากการใช้งานเครื่องมือได้จริง อีกทั้งยังเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ต้นทุนต่ำที่สามารถประยุกต์ใช้ในสถาบันการศึกษา หรือหน่วยงานที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณต่อไปในอนาคตได้อีกด้วย

อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาการประดิษฐ์อุปกรณ์ผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตแบบกึ่งอัตโนมัติ พบว่าอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถผลิตอนุภาคเอนแคปซูเลตที่มีลักษณะทางกายภาพทั้งด้านรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกับอนุภาคจากเครื่องเอนแคปซูเลชันเชิงพาณิชย์ และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อกระบวนการเกิดอนุภาคได้อย่างเหมาะสม อาทิเช่น อัตราการไหลของสารละลาย ส่งผลให้อนุภาคที่ได้มีขนาดและรูปร่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญของกระบวนการเอนแคปซูเลชัน

ผลการศึกษาดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า แม้อุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นจะเป็นเครื่องมือที่ประดิษฐ์จากวัสดุเหลือใช้ และมีต้นทุนต่ำแต่ยังคงสามารถให้ประสิทธิภาพในการผลิตอนุภาคได้ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการจัดการเรียนการสอน โสภิตา จรเด่น และคณะ (2564) และการฝึกปฏิบัติการในห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการออกแบบอุปกรณ์มีการคำนึงถึงหลักการทางพื้นฐานของเครื่องเอนแคปซูเลชันเชิงพาณิชย์ ทำให้สามารถจำลองกระบวนการผลิตอนุภาคได้ใกล้เคียงกับเครื่องมือมาตรฐาน ส่งผลให้ผู้เรียนสามารถศึกษาและเข้าใจกระบวนการผลิตเอนแคปซูเลชันได้จากการปฏิบัติจริง

นอกจากนี้ การพัฒนาอุปกรณ์ดังกล่าวยังช่วยลดข้อจำกัดด้านงบประมาณในการจัดหาเครื่องมือสำหรับการเรียนการสอน เนื่องจากเครื่องเอนแคปซูเลชันเชิงพาณิชย์มีราคาค่อนข้างสูงและมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง การประดิษฐ์อุปกรณ์ขึ้นใช้เองจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับสถาบันการศึกษาที่มีข้อจำกัดด้านงบประมาณ อีกทั้งยังเป็นแนวความคิดการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าให้เกิดประโยชน์สูงสุด

อย่างไรก็ตาม การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มุ่งเน้นการประเมินลักษณะทางกายภาพของอนุภาคเป็นหลัก จึงควรมีการศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการกักเก็บสารสำคัญ ความคงตัวของอนุภาค และการปลดปล่อยสารสำคัญ เพื่อยืนยันศักยภาพของอุปกรณ์สำหรับการใช้งานด้านการวิจัยหรือการประยุกต์ใช้ในระดับที่สูงขึ้น นอกจากนี้ อาจมีการพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมการทำงานให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความหลากหลายในการใช้งานของอุปกรณ์ในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการใช้เครื่องมือเอนแคปซูเลชันและสิ่งอำนวยความสะดวก จากศูนย์เครื่องมือทางเภสัชศาสตร์ คณะเภสัชศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เอกสารอ้างอิง

- นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์, ชาญชัย ไชยโคตร, ไมยราบ รักเสมอวงศ์, ทวีชัย เชียงขวาง, และ อมร ดอนเมือง. (2556). การออกแบบและสร้างเครื่องปิดฝาจีบอัตโนมัติสำหรับวิสาหกิจขนาดเล็ก. *วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร*, 5(9), 109-118.
- ปิยมณ พัวพงศกร. (2561). *การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบสำหรับลดขนาดกระป๋องอะลูมิเนียมแบบอัตโนมัติ*. สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต. นครราชสีมา: สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พัฒนินาถ เขมรัตน์กมลวัต, และ สุกัญญา ตีโลกะวิชัย (2562). *โครงการ นวัตกรรมสิ่งประดิษฐ์ D.I.Y โต๊ะอเนกประสงค์*. กรุงเทพฯ: วิทยาลัยเทคโนโลยีอรรถวิทย์พัฒนิกการ.
- วรี ดิยะบุญชัย. (2557). *เอกสารประกอบการเรียนการสอนไมโครเอนแคปซูเลชัน* (น. 93-103).
- โสภิตา จรเด่น, วรวิทย์ ศรีวิทยากุล, และ วิชัย ประยูร. (2564). *การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานเจาะเพื่อสนับสนุนการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติงานอุตสาหกรรมการผลิต 1*. สงขลา: คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.
- อำนาจ ใจคำฟู, ภัทราวดี ธงงาม, จุรีพร เลือกหา, ปิยะนุช เจตียยอด, กิตติกุล ศิริเมืองมูล, ติร บัวใบ, ฌกตล เจนวนินิจชัย, และวันชัย ยุทธ วงษ์เทพ. (2560). *มูลค่าเพิ่มวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร “โต๊ะ”*. ใน การประชุมวิชาการวิจัยและนวัตกรรมสร้างสรรค์ ครั้งที่ 4. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา.
- Chan, E. S. (2011). Preparation of Ca-alginate beads containing high oil content: Influence of process variables on encapsulation efficiency and bead properties. *Carbohydrate Polymers*, 84(4), 1267-1265.
- Goh, C. H., Heng, P. W. S., & Chan, L. W. (2012). Alginates as a useful natural polymer for microencapsulation and therapeutic applications. *Carbohydrate Polymers*, 88(1), 1-12.
- Guan, H., Chi, D., Yu, J., & Li, H. (2011). Encapsulated ecdysone by internal gelatin of alginate microspheres for controlling its release and photostability. *Chemical Engineering Journal*, 168(1), 94-101.
- Whelehan, M., & Marison, I. W. (2011). Microencapsulation using vibrating technology. *Journal of Microencapsulation*, 28(8), 669-688.