

## แบบจำลองการขยายตัวของเอกภพขนาดเล็ก: บอลลูน The Expansion of the Small Universe Model: Balloon

สมยศ ศรีคงรักษ์, สุขพิชญา จรรย์ชล และ โชติ เนืองนนท์\*  
Somyot Srikongrug, Sookpichaya Charrunchon & Chote Nuangnun\*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี จังหวัดจันทบุรี  
Department of Physics, Faculty of Science and Technology,  
RambhaiBarni Rajabhat University

Submitted 05/04/2025 ; Revised 22/05/2025 ; Accepted 26/05/2025

### บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองการขยายตัวของเอกภพขนาดเล็กและศึกษา ลักษณะทางกายภาพของการขยายตัวของเอกภพขนาดเล็ก ตลอดจนศึกษาเปรียบเทียบกับทฤษฎี การขยายตัวของเอกภพด้วยเทคนิคการใช้บอลลูน ที่เป็นวัสดุที่หาง่าย มีราคาถูก สะดวกสำหรับการทดลอง ผลการวิจัยพบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับผลทางทฤษฎี โดยความเร็วในการเคลื่อนที่ออกห่างและความยาวส่วนโค้งแสดงความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรงที่สอดคล้องกับสมการ

$$v = H(t)l \text{ การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ฮับเบิลในแต่ละช่วงเวลาเป็นไปตามสมการ } v = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = \frac{1}{3}t$$

การเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนโค้งระหว่างจุด 2 จุดกับเวลา(วินาที) เป็นไปตามสมการ

$$l(t) = \left( \sqrt{\frac{3Q}{4\pi}} \theta_0 \right) t^{\frac{1}{3}} \text{ และท้ายที่สุดเป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของวัตถุบนพื้นผิวของการขยายตัวของบอลลูน พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับผลทางทฤษฎีโดยพื้นฐาน}$$

$$s(t) = 0.0316(t^{\frac{1}{3}})^2 + 0.0004(t^{\frac{1}{3}}) + 0.0027$$

คำสำคัญ: บอลลูน กฎของฮับเบิล การขยายตัวของเอกภพ

\*ผู้ประสานงานหลัก (Corresponding Author)

E-mail: chote.n@rbru.ac.th

## Abstract

This research emphasized on create a model of the expansion of the small universe and study the physical characteristics of the expansion of the small universe, including a comparative study with the theory of universe expansion using balloon technique, which is an easy-to-find material, cheap and convenient for experimentation. The research results found that the experimental data were consistent with theoretical results. The regression velocity and arc length show a linear relationship that corresponds to the equation  $v = H(t)l$ . The change in the value of the Hubble constant over time is given by  $v = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = \frac{1}{3}t$ . The change of arc length between two points with time (seconds) is given by  $l(t) = \left( \sqrt{\frac{3Q}{4\pi}} \theta_0 \right) t^{\frac{1}{3}}$ . Finally, the analysis of the motion of objects on the surface of the balloon expansion found that the experimental results were basically consistent with the theoretical results  $s(t) = 0.0316(t^{\frac{1}{3}})^2 + 0.0004(t^{\frac{1}{3}}) + 0.0027$

**Keyword:** balloon, Hubble law, universe expansion

## บทนำ

การค้นพบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการศึกษาเอกภพสมัยใหม่ คือ การสังเกตการขยายตัวของเอกภพด้วยความเร่งของจักรวาล [1] มีหลายทฤษฎีที่ใช้อธิบายกำเนิดและวิวัฒนาการของเอกภพ [2, 3] ทฤษฎีบิกแบง (big bang theory) เป็นหนึ่งในทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดในการอธิบายเอกภพที่กำเนิดมาจากจุดเล็ก ๆ ที่มีความหนาแน่นและอุณหภูมิที่สูงมากเมื่อประมาณ 13.8 พันล้านปีที่ผ่านมานี้ [4] การค้นพบการเลื่อนของทางแดงของระบบกาแล็กซีของ Edwin Hubble ในศตวรรษที่ 20 นำไปสู่ข้อสรุปว่ากาแล็กซีมีการขยายตัว [5] การค้นพบนี้สอดคล้องกับทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปของไอสไตน์ซึ่งกล่าวว่าจักรวาลไม่ได้อยู่นิ่งแต่มีการเคลื่อนที่ [6] โดยพบว่าทุกกาแล็กซีมีการเคลื่อนที่ออกจากโลกและยังสรุปว่า กาแล็กซีที่อยู่ห่างไกลจากโลกออกไปกำลังเคลื่อนที่ออกไปด้วยความเร็วที่มากขึ้น ความเร็วของกาแล็กซี  $v$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะห่างจากโลก  $d$  ซึ่งเป็นกฎที่มีชื่อเรียกของฮับเบิล  $v = H_0 d$  ที่  $H_0$  คือ ค่าคงที่ของฮับเบิล จึงตีความเพื่อบ่งชี้ว่าเอกภพกำลังขยายตัวอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทาง ดังนั้น กาแล็กซีรอบ ๆ ทั้งหมดจึงเคลื่อนที่ออกจากศูนย์กลางกาแล็กซี ต่อมาในปี ค.ศ.1998 Perlmutter และคณะ [7] สรุปพื้นฐานจากการสังเกตซูเปอร์โนวาประเภท  $I_a$  พบว่า การขยายตัวของเอกภพเป็นไปด้วยความเร่ง จากการศึกษาสังเกตทางดาราศาสตร์ของ Peebles และคณะ [8] พบว่า สสารมืดและพลังงานมืดทำให้เอกภพเกิดการขยายตัวด้วยความเร่ง

การขยายตัวของเอกภพเป็นตัวอย่างของการขยายตัวของอวกาศ 3 มิติในกาลอวกาศ 4 มิติ ซึ่งเป็นแนวคิดเชิงนามธรรมที่ทำนายสำหรับผู้เริ่มศึกษาดาราศาสตร์ ผลการวิจัยพบว่ายังมีความเข้าใจผิดเกี่ยวกับการขยายตัวของเอกภพ [9] ในตำราทางดาราศาสตร์เปรียบเอกภพได้กับบอลูนที่กำลังขยายตัวโดยพื้นผิวของบอลูนจะขยายตัวในอวกาศและจุดต่าง ๆ บนพื้นผิวของบอลูนจะเคลื่อนที่ออกจากกัน [10] แต่อย่างไรก็ตาม มีการทดลองเพียงไม่กี่ครั้งเกี่ยวกับกฎที่เกี่ยวกับการขยายตัวของจักรวาล โดยการใช้บอลูนมีน้อย [11, 12] จึงมีข้อจำกัดต่อการส่งเสริมความเข้าใจของเอกภพ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจการศึกษาเจาะลึกทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงทดลอง แบบจำลองพฤติกรรมของการขยายตัวของเอกภพขนาดเล็กบนพื้นผิวของบอลูน ที่ใช้เครื่องมือทดลองอย่างง่ายและความรู้พื้นฐานทางฟิสิกส์ และการเคลื่อนที่ของอนุภาคบนพื้นผิวของบอลูนที่กำลังขยายตัวนั้นจะถูกตรวจสอบในทางทฤษฎี กฎการขยายตัวที่เกี่ยวข้องที่ได้จากการทดลองและจากกฎการขยายตัวของบอลูนเพื่อเปรียบเทียบกับกฎการขยายตัวของเอกภพ

การขยายตัวของบอลูนทรงกลม: สมมติว่าบอลูนทรงกลมถูกสูบลมให้พองโดยปั๊มลมในระหว่างที่กระแสลม  $Q$  ไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาตรของลูกโป่งกำลังขยายตัว สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่มีความสัมพันธ์ดังนี้ [12]

$$\frac{4}{3}\pi R(t)^3 = Qt \quad (1)$$

ดังนั้น รัศมีของบอลูนจึงสามารถกำหนดได้เป็น

$$R(t) = \sqrt[3]{\frac{3Q}{4\pi}t} \quad (2)$$

จากภาพที่ 1 (ก) ในระหว่างที่บอลลู่นขยายตัว กำหนดให้อนุภาค 2 อนุภาคบนผิวของบอลลู่นเป็น  $a$  และ  $b$  ให้เป็นจุด 2 จุดบนพื้นผิวของบอลลู่นในขณะที่บอลลู่นมีรัศมี  $R$  ต่อมาเมื่อบอลลู่นขยายตัวโดยมีรัศมีเป็น  $R'$  ซึ่งจะกำหนดสัญลักษณ์จุด 2 จุดบนพื้นผิวบอลลู่นเป็น  $a'$  และ  $b'$  มุมศูนย์กลางระหว่าง 2 จุดนี้คือ  $\theta_0$  จะคงที่ และความยาวส่วนโค้งระหว่าง 4 จุดดังกล่าวเปลี่ยนเป็น  $l' = R'\theta_0$  รูปแบบอนุภาค 2 อนุภาค  $a$  และ  $b$  บนพื้นผิวบอลลู่นที่มีรัศมี  $R$  เป็นอนุภาค  $a'$  และ  $b'$  บนพื้นผิวบอลลู่นที่มีรัศมี  $R'$  ที่บอลลู่นขยายตัว ความเร็วในการเคลื่อนที่ออกห่างของสองอนุภาคนี้นี้คือ [10]

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{l' - l}{\Delta t} = \frac{dR}{dt} \theta_0 = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} l \quad (3)$$

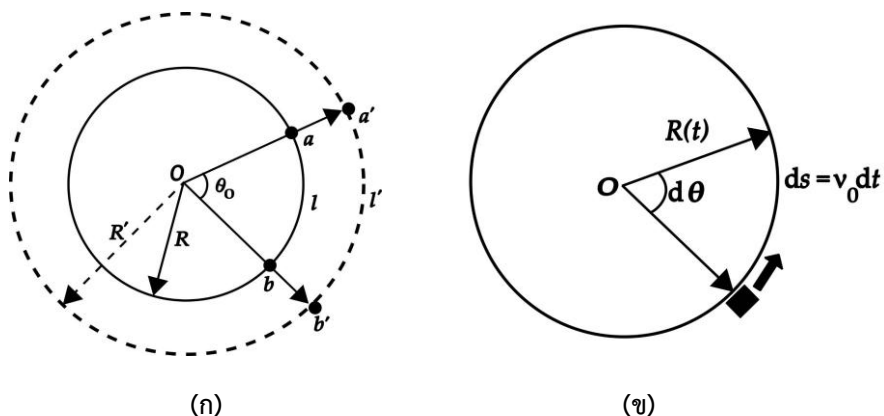
ปริมาณทางฟิสิกส์ที่อธิบายอัตราการขยายตัวของบอลลู่นหรือค่าคงที่ของฮับเบิล สามารถกำหนดเป็น

$$H(t) = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} \quad (4)$$

ตามกฎของฮับเบิล [13]

$$v = H(t)l \quad (5)$$

ดังนั้น ค่าคงที่ของฮับเบิลจึงแปรผันตามเวลามากกว่าจะเป็นค่าคงที่



ภาพที่ 1 (ก) บอลลู่นขยายตัวจากรัศมี  $R$  เป็น  $R'$  (ข) วัตถุเคลื่อนที่บนพื้นผิวของบอลลู่นที่ขยายตัวด้วยความเร็ว  $v_0$

ในทางดาราศาสตร์ค่าคงที่ของฮับเบิลจะแปรผันตามเวลาเมื่อการเคลื่อนทางแดงของกาแล็กซีมีค่ามาก [10, 14] ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งความเร็ว  $v$  ของจุดใด ๆ บนพื้นผิวบอลลู่นที่สัมพันธ์กับจุด  $a$  จะเป็นสัดส่วนกับความยาวส่วนโค้ง  $l$  ซึ่งบ่งชี้ว่าจุดทั้งหมดบนพื้นผิวบอลลู่นกำลังเคลื่อนที่ออกจากกัน

หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าบอลลูนกำลังขยายตัวในอวกาศ เมื่อแทนค่าสมการที่ (2)  $R(t) = \sqrt[3]{\frac{3Q}{4\pi}} t^{\frac{1}{3}}$  ในสมการที่ (4)  $H(t) = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}$  ปริมาณ  $H$  สามารถเขียนได้เป็น [12]

$$H(t) = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = \frac{1}{3t} \quad (6)$$

ดังนั้น ค่าคงที่ของฮับเบิลจึงไม่เกี่ยวข้องกับการไหลของอวกาศแต่จะแปรผกผันกับเวลา จึงเป็นที่น่าสังเกตว่าค่าคงที่ฮับเบิลสำหรับเอกภพยุคสสาร (The matter-dominated universe) มีความสัมพันธ์แบบผกผันกับเวลาในแบบจำลองจักรวาลวิทยามาตรฐาน [10]

เมื่อพิจารณากรณีการเปลี่ยนแปลงของความยาวส่วนโค้ง  $l(t)$  ระหว่างสองอนุภาค  $a$  และ  $b$  กับเวลา ในการวิเคราะห์กระบวนการขยายตัวของบอลลูน โดยนิพจน์ต่อไปนี้สามารถอธิบายบนพื้นฐานของสมการ  $l(t) = R(t)\theta_0$  ดังนั้นเมื่อแทนค่า  $R(t)$  จะได้

$$l(t) = \left( \sqrt[3]{\frac{3Q}{4\pi}} \theta_0 \right) t^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

ขณะที่มุมศูนย์กลางระหว่าง 2 อนุภาค ( $\theta_0$ ) ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่บอลลูนขยายตัว ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ความยาวส่วนโค้งระหว่าง 2 อนุภาคเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $t^{\frac{1}{3}}$  จากการสังเกตทางดาราศาสตร์พบว่า การขยายตัวของเอกภพเป็นรูปแบบเทอร์ฟากฟ้าที่มีการขยายตัวด้วยเช่นกัน

ต่อมาลองพิจารณาแบบจำลองที่ 2 โดยกำหนดให้วัตถุเคลื่อนที่ไปบนผิวบอลลูนขณะที่กำลังขยายตัว โดยวัตถุนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_0$  การเคลื่อนที่แบบนี้มักเรียกว่าเคลื่อนที่แบบแปลกประหลาด (The peculiar motion) [10] ดังภาพที่ 1 (ข) จะได้

$$v_0 dt = R(t) d\theta \quad (8)$$

จากระยะเวลา  $t_0$  ถึง  $t$  ความยาวส่วนโค้งที่วัตถุเคลื่อนที่บนผิวบอลลูนสามารถเขียนให้เป็น

$$s(t) = R(t) \int_{t_0}^t \frac{v_0}{R(t)} dt \quad (9)$$

แทนค่า  $R(t)$  ลงในสมการจะได้

$$s(t) = \frac{3}{2} v_0 t^{\frac{1}{3}} \left( t^{\frac{2}{3}} - t_0^{\frac{2}{3}} \right) \quad (10)$$

ความยาวส่วนโค้งที่วัตถุเคลื่อนที่ถือว่าเป็นผลรวมของการขยายตัวและการเคลื่อนที่ที่อยู่ในลักษณะแปลกประหลาดของวัตถุนี้ไม่เกี่ยวข้องกับการไหลของอวกาศในบอลลูนแต่เป็นสัดส่วนกับความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุ  $v_0$

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างแบบจำลองการขยายตัวของเอกภพขนาดเล็กโดยใช้บอลูน
2. เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของการขยายตัวของเอกภพขนาดเล็ก
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบกับทฤษฎีการขยายตัวของเอกภพ

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### ตอนที่ 1 การเตรียมการก่อนการทดลอง: การขยายตัวของเอกภพ

การศึกษาต้นแบบการขยายตัวของเอกภพโดยใช้บอลูน ถูกออกแบบการทดลองดังภาพที่ 1 บอลูน ผลิตโดย Jelly Balloon Ball 2.0 ที่ถูกทำให้ขยายตัว ณ เวลาต่าง ๆ โดยเครื่องปั๊มลมไฟฟ้า แสดงดังภาพที่ 2 (ก) และ (ข) ในการทดสอบกฎการขยายตัวของเอกภพโดยการขยายตัวของบอลูน กระทำการโดยกำหนดจุดบนบอลูน จำนวน 11 จุด รวมจุดอ้างอิง โดยขั้นตอนนี้ผู้วิจัยกำหนดจุด หลังจากการสูบลมเข้าครั้งที่ 1 ดังภาพ 2 (ก) โดยปากกามาร์คเกอร์ลงบนพื้นผิวบอลูนและมีป้าย สติกเกอร์กำกับระบุแต่ละจุด และเวลาการขยายตัวของบอลูนจะถูกจับเวลาโดยนาฬิกาจับเวลา ทำการวัดระยะระหว่างจุดที่กำหนดไว้บนบอลูนแต่ละจุดที่เวลาต่าง ๆ ที่กระจายไปทั่วพื้นผิวบอลูน



(ก)

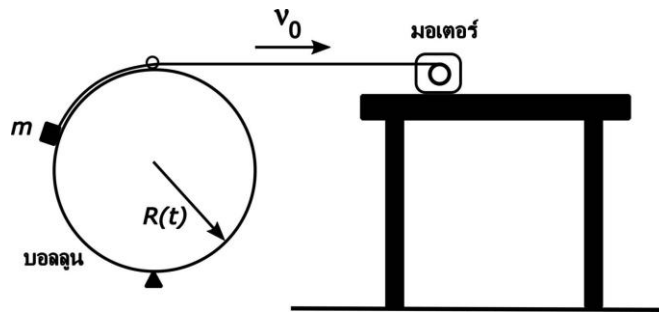


(ข)

ภาพที่ 2 การออกแบบการขยายตัวของเอกภพโดยใช้บอลูน (ก) บอลูนที่ขยายตัวที่ระยะเวลา  $t_1$   
(ข) บอลูนที่ขยายตัวที่ระยะเวลา  $t_2$  ใดๆ

#### ตอนที่ 2 การเตรียมการก่อนการทดลอง: วัตถุเคลื่อนที่บนพื้นผิวบอลูนที่ขยายตัวด้วยความเร็ว $v_0$

การทดลองถูกออกแบบโดยวัตถุขนาดเล็กที่ถูกแขวนโดยเชือกและถูกวางบนพื้นผิวบอลูนที่ขยายตัวที่ระยะหนึ่ง เพื่อป้องกันการไถลตัวของเชือกที่แขวนวัตถุ วงแหวนพลาสติกขนาดเล็กจะผูกติดกับผิวที่สูงที่สุดของบอลูน เชือกถูกร้อยผ่านวงแหวนต่อไปยังมอเตอร์ขนาดเล็ก ดังภาพที่ 3

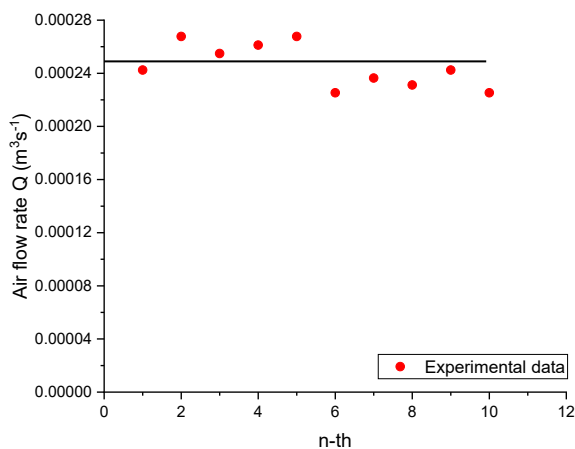


ภาพที่ 3 การเคลื่อนที่ของวัตถุบนบอลหมุนที่กำลังขยายตัว

### ผลการวิจัย

#### การขยายตัวของเอกภพ

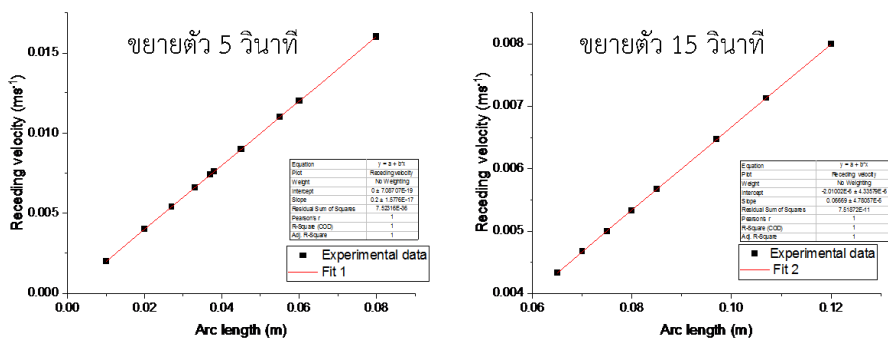
ขั้นที่ 1 ทำการวัดอัตราการไหลของอากาศโดยเฉลี่ยของปั๊ม  $Q$  ที่ระยะเริ่มต้นบอลหมุนอยู่ในลักษณะว่างเปล่า ขณะที่ยังไม่ได้สูบลมเข้าไปในบอลหมุน และต่อจากนั้นบอลหมุนจะถูกทำให้ขยายตัวโดยเครื่องปั๊มลมไฟฟ้า โดยกำหนดเวลาสูบลมเข้าบอลหมุน เป็นเวลา  $t = 15$  วินาที แล้วทำการวัดเส้นรอบวงของบอลหมุน เพื่อนำไปสู่การหาค่ารัศมีของบอลหมุน ทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของอากาศโดยเฉลี่ยของปั๊มลม  $Q$  โดยการคำนวณจากสมการ  $\frac{4}{3}\pi R(t)^3 = Qt$  ในที่นี้ทดลองจำนวน 10 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของอากาศ  $Q$  ผลที่ได้คือ  $2.45 \pm 0.16 \times 10^{-4} m^3 s^{-1}$  (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 ค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลของอากาศ  $Q = 2.45 \pm 0.16 \times 10^{-4} m^3 s^{-1}$

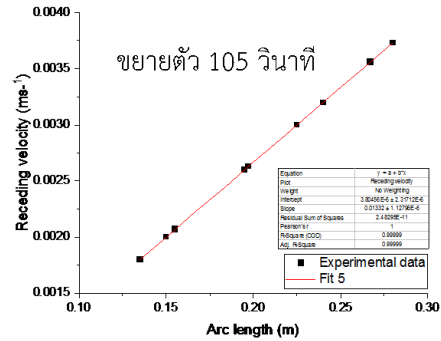
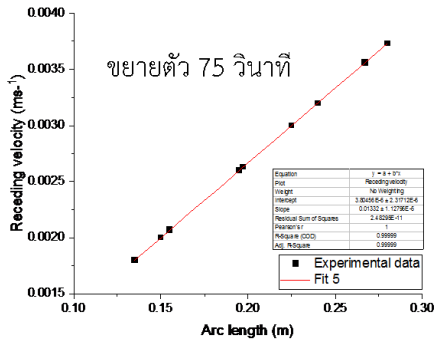
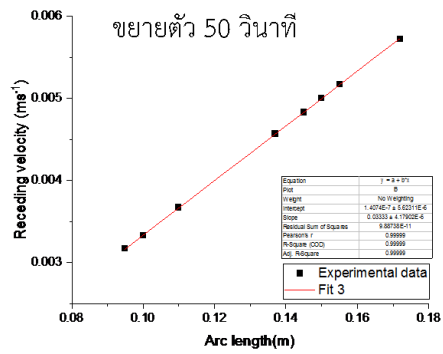
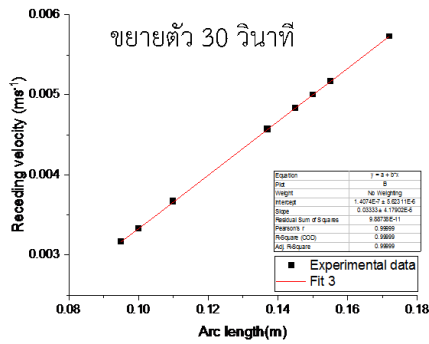
ขั้นที่ 2 เป็นผลการทดสอบกฎของฮับเบิลบนพื้นผิวบอลูน กระทำโดยการเลือกจุดอ้างอิงบนพื้นผิวบอลูน จำนวน 1 จุด จากนั้นจึงตรวจสอบการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับอื่น ๆ อีก 10 จุด เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงที่กำหนด เริ่มต้นจับเวลาขณะที่บอลูนว่างเปล่าแล้วทำการสูบลมเข้าสู่บอลูนเริ่มขยายตัวและหยุดการขยายตัวที่ระยะเวลาต่าง ๆ เมื่อหยุดการขยายตัวของบอลูน ทำการจับเวลาด้วยนาฬิกาจับเวลา  $t_1$  และทำการวัดความยาวส่วนโค้งระหว่างจุดอ้างอิง และจุดต่าง ๆ ทั้ง 10 จุด ต่อจากนั้นการขยายตัวของบอลูนจะดำเนินการต่อไปและจับเวลาต่อจาก  $t_1$  ที่ระยะเวลาหนึ่ง การขยายตัวของบอลูนจะหยุดลงอีกครั้ง เป็นเวลา  $t_2$  และทำการวัดความยาวส่วนโค้งระหว่างจุดอ้างอิง และจุดต่าง ๆ อีกครั้ง ซึ่งขั้นตอนนี้สามารถทำซ้ำได้ตามต้องการ ต่อจากนั้นความเร็วของการเคลื่อนที่ออกจากแต่ละจุดที่กำหนดเทียบกับจุดอ้างอิง ความเร็ว  $v$  จะถูกคำนวณโดยสมการ  $v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$  โดยในการศึกษาครั้งนี้ คือ

ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ถอยห่าง การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว และความยาวส่วนโค้งในช่วงเวลาหนึ่งจะถูกวิเคราะห์ผลจากงานวิจัยครั้งนี้ ความเร็วในการเคลื่อนที่ออกห่างและความยาวส่วนโค้งของจุดต่าง ๆ ที่กำหนดบนพื้นผิวบอลูนแต่ละจุดเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงจะถูกคำนวณแยกกัน ภาพที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $v$  และ  $l$  ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน 6 ช่วงเวลา จากภาพจะพบว่า  $v$  และ  $l$  แสดงความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรงที่สอดคล้องกับทฤษฎีกำหนดดังสมการ (5)  $v = H(t)l$  จากผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าส่วนต่าง ๆ ของบอลูน Wubble Bubble ball ขยายตัวโดยประมาณอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของบอลูนเพิ่มขึ้นความชันของเส้นกราฟจะลดลง หมายความว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ถอยห่างของจุดที่ระบุเมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงจะลดลง



ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $v$  ณ จุดต่าง ๆ เทียบกับจุดอ้างอิงและความยาวส่วนโค้ง  $l$  ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน 6 ช่วงเวลา





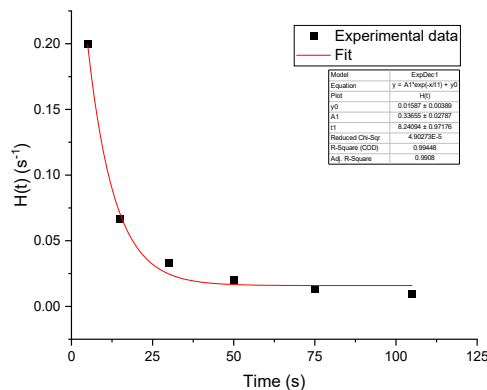
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $v$  ณ จุดต่าง ๆ เทียบกับจุดอ้างอิงและความยาวส่วนโค้ง  $l$  ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน 6 ช่วงเวลา (ต่อ)

### การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ฮับเบิลตามเวลา

จากสมการฮับเบิล  $v = H(t)l$  ความชันของเส้นตรงในภาพที่ 5 สอดคล้องกับค่าคงที่ฮับเบิล ณ ช่วงเวลาหนึ่ง การเปลี่ยนแปลง  $H(t)$  ในแต่ละช่วงเวลาแสดงดังภาพที่ 6

จากภาพที่ 6 ทำให้พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับข้อมูลการอนุมานเชิงทฤษฎี

โดยการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ฮับเบิลกับเวลาเป็นไปตามสมการ (6)  $H(t) = \frac{\dot{R}(t)}{R(t)} = \frac{1}{3t}$

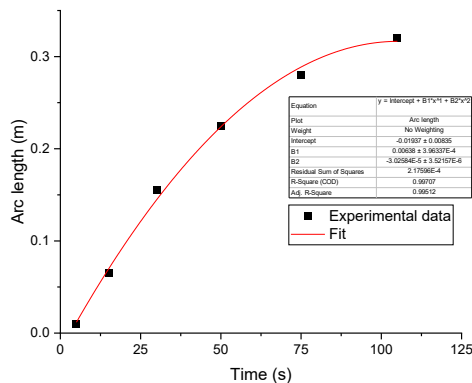


ภาพที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ฮับเบิลตามเวลาที่ต่างกัน 6 ช่วงเวลา

### การเปลี่ยนแปลงความยาวส่วนโค้งระหว่างจุดใด ๆ 2 จุดตามเวลา

ผู้วิจัยทำการเลือกจุด 2 จุดบนพื้นผิวบอลลูก เพื่อทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของความยาวส่วนโค้งระหว่าง 2 จุดนี้กับเวลาในระหว่างที่บอลลูกขยายตัว การที่บอลลูกเกิดการขยายตัวเป็นระยะ ๆ และทำการบันทึกเวลาที่สอดคล้องกับการขยายตัว ( $t$ ) และความยาวส่วนโค้งระหว่าง 2 จุด ( $l$ ) ที่ความยาวส่วนโค้งจะถูกวัดในช่วงเวลาหลายช่วงเวลา ในการศึกษาครั้งนี้ถือว่ามุมระหว่างจุด 2 จุดใด ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างบอลลูกขยายตัว โดยมุม  $\theta$  คำนวณจากความยาวส่วนโค้งระหว่าง 2 จุดต่อรัศมีของบอลลูก ความสัมพันธ์ระหว่าง ( $l$ ) และ ( $t$ ) แสดงดังภาพที่ 7

จากภาพที่ 7 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องกับการคำนวณทางทฤษฎีตามสมการที่ (7)  $l(t) = \left( \sqrt[3]{\frac{3Q}{4\pi}} \theta_0 \right) t^{\frac{1}{3}}$



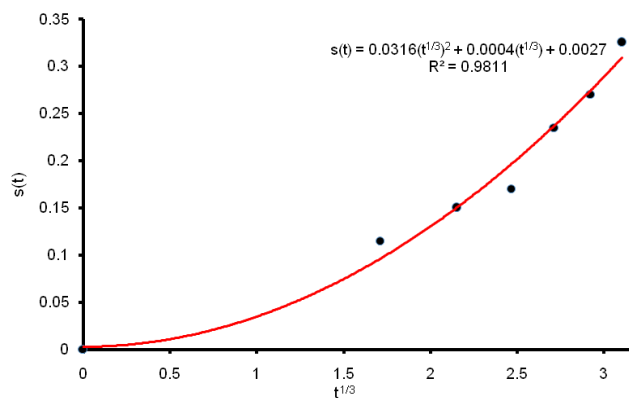
ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของความยาวส่วนโค้ง  $l$  (เมตร) ระหว่างจุด 2 จุดกับเวลา  $t$  (วินาที)

### การเคลื่อนที่ของวัตถุบนบอลลูกที่กำลังขยายตัว

การทดลองเพื่อศึกษาการเคลื่อนที่บนพื้นผิวของบอลลูกที่กำลังขยายตัว ดังภาพที่ 3 วัตถุขนาดเล็กถูกแขวนด้วยเชือกที่วางบนพื้นผิวบอลลูกที่ขยายตัวที่ระยะหนึ่ง เพื่อป้องกันไม่ให้เชือกหลุดจากพื้นผิวบอลลูก วงแหวนพลาสติกขนาดเล็กจะถูกยึดไว้ด้านบนบอลลูกและเชือกจะถูกร้อยผ่านวงแหวนที่เชื่อมต่อกับมอเตอร์ขนาดเล็กที่สามารถปรับความเร็วได้ เมื่อเชือกถูกดึงด้วยความเร็ว  $v_0$  หลังจากนั้นทำการวัดเส้นรอบวงของบอลลูกเพื่อทำการคำนวณค่ารัศมีของบอลลูกและเวลา  $t_0$  จะถูกคำนวณตามสมการ  $\frac{4}{3}\pi R(t)^3 = Qt$  (เวลาที่บอลลูกว่างเปล่าและเริ่มถูกทำให้ขยายตัวโดยปั๊มลมที่ระยะหนึ่งถูกกำหนดในการศึกษาส่วนนี้) มอเตอร์จะเริ่มทำงานในขณะที่การขยายตัวเริ่มขึ้น การเคลื่อนที่ของวัตถุจะถูกบันทึกไว้ที่วิดีโอ ที่วัตถุขนาดมวล  $m$  เกาะติดบนพื้นผิวบอลลูกอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นวัตถุจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v_0$  แล้ววัตถุยังมีส่วนร่วมในการขยายตัวของบอลลูกด้วย ระยะทางที่วัตถุขนาดเล็ก

เคลื่อนที่เมื่อเทียบกับพื้นผิวบอลลูน จะถูกวิเคราะห์โดยโปรแกรม Tracker ภาพที่ 8 แสดงผลการทดลองที่  $v_0 = 0.93 \text{ m/s}$

จากภาพที่ 8 แสดงถึงการทดลองเมื่อตั้งเชือกด้วยความเร็ว  $v_0 = 0.93 \text{ m/s}$  ทำให้การเคลื่อนที่ของวัตถุมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นเสมอไปดังสมการ  $s(t) = 0.0316(t^{1/3})^2 + 0.004(t^{1/3}) + 0.0027$  จากข้อมูลข้างต้นพบว่าสอดคล้องกับผลทางทฤษฎีสมการ (10)



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวส่วนโค้งที่วัตถุขนาดเล็กเคลื่อนที่เทียบกับบอลลูนที่ขยายตัวตามระยะเวลาที่ขยายตัว

### อภิปรายผลการวิจัย

การขยายตัวของบอลลูนได้แสดงถึงการอุปมาสำหรับการขยายตัวของเอกภพได้อย่างชัดเจน และสอดคล้องกับทฤษฎีพื้นฐานทางฟิสิกส์ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในผลการวิจัย อย่างไรก็ตามพฤติกรรมของการขยายตัวของบอลลูนมีความแตกต่างจากการขยายตัวของเอกภพอยู่ 3 ประการสำคัญ คือ ประการแรก การขยายตัวของบอลลูนเป็นการขยายตัวของพื้นผิวทรงกลม 2 มิติ ในปริภูมิ 3 มิติ แต่ในขณะที่การขยายตัวของเอกภพ หมายถึงการขยายตัวของปริภูมิ 3 มิติ ในปริภูมิเวลา 4 มิติ เพื่อให้เข้าใจง่าย การวิจัยครั้งนี้จึงเปรียบเทียบการขยายตัวของเอกภพกับการขยายตัวของพื้นผิวทรงกลม 3 มิติ คือ บอลลูน การวิจัยครั้งนี้ได้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคบนพื้นผิวของบอลลูนระหว่างการขยายตัวผ่านการวิเคราะห์เชิงทฤษฎีและการจำลองการมีอยู่ของเอกภพขนาดเล็กบนพื้นผิวบอลลูน และตรวจสอบกฎที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของอนุภาคเกี่ยวกับ (1) กฎของฮับเบิล ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของการเคลื่อนที่ของอนุภาคและความยาวส่วนโค้ง (2) การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของฮับเบิลตามเวลา (3) การเปลี่ยนแปลง ความยาวส่วนโค้งระหว่างอนุภาคสองอนุภาคตามเวลา และ (4) การเคลื่อนที่ของวัตถุบนพื้นผิวบอลลูน ผลการทดลองทั้งหมดสอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี [10, 13] และสอดคล้องกับผลการทดลองของ Zenderi และคณะ [12] ประการที่สอง ในเอกภพวิทยา  $R(t)$  หมายถึง ปัจจัยของมาตราส่วนของการขยายตัวของเอกภพมากกว่ารัศมีของเอกภพ ประการที่สาม ในแบบจำลองเอกภพวิทยามาตรฐาน (FLRW) [10] การขยายตัวของเอกภพเป็นไปตามสมการฟรีดมันน์

(Friedmann equation) [15] และวิวัฒนาการของ  $R(t)$  ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของส่วนประกอบต่าง ๆ ในเอกภพ ในช่วงเริ่มต้นของการเกิดบิกแบง สำหรับเอกภพยุคสสาร  $R(t) \propto t^{\frac{2}{3}}$  สำหรับเอกภพยุครังสี (the radiation-dominated universe)  $R(t) \propto t^{1/2}$  โดยปัจจัยมาตราส่วนสามารถขยายได้เป็น  $R(t) \propto t^\alpha$  โดย (1) เมื่อ  $0 < \alpha < 1$  เอกภพจะขยายตัวด้วยความเร็วลดลง (2) เมื่อ  $\alpha > 1$  เอกภพกำลังขยายตัวด้วยความเร็วเพิ่มขึ้น และ (3) เมื่อ  $\alpha = 1$  เอกภพกำลังขยายตัวด้วยความเร็วคงที่ ในการทดลองที่น่าสนใจคือรัศมีของบอลลูน  $R(t) \propto t^{\frac{1}{3}}$  นั่นคือ  $\alpha = \frac{1}{3}$  ซึ่งสอดคล้องกับเอกภพที่กำลังขยายตัวด้วยความเร็วที่ลดลง ดังนั้น การขยายตัวของบอลลูน ถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ชัดเจนและน่าสนใจในการใช้อธิบายการขยายตัวของเอกภพ

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการขยายตัวของเอกภพขนาดเล็กโดยใช้บอลลูน ดังการทดลองที่ได้อธิบายมาแล้วข้างต้นเป็นการนำเสนอวิธีการทดลองที่เรียบง่าย ประหยัดและมีความน่าสนใจในการศึกษาการขยายตัวของเอกภพขนาดเล็กในห้องปฏิบัติการพื้นฐาน เพื่อให้ผู้ศึกษาได้เข้าใจได้อย่างลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น และผลการทดลองทั้งหมดสอดคล้องกับการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี แม้ว่ากาขยายตัวของบอลลูนและการขยายตัวของเอกภพจะแตกต่างกันหลาย ๆ ประเด็นสำคัญ แต่การขยายตัวของบอลลูนสามารถใช้เป็นวิธีการอันมีค่าในการสำรวจแนวคิดการขยายตัวของเอกภพได้

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากกองทุนวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Lehnert, J. L., & Quintin, J. (2024). A small Universe. *Physics Letters B*, 850, 138488.
- [2] Burde, G. I. (2024). Small-scale cosmology independent of the standard model. *Universe*, 10(4), 180.
- [3] Capolupo, A., & Quaranta, A. (2023). Boson mixing and flavor vacuum in the expanding universe: A possible candidate for the Dark Energy. *Physics Letters B*, 840, 137889.
- [4] Hubble, E. (1929). A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 15, 168–173.
- [5] Sandler, U. (2023). Evolutionary quantization and matter-antimatter distribution in accelerated expanding of Universe. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 611, 128459.
- [6] Ulianov, P. Y. (2024). Revolutionizing cosmology: The small bang model and its implications on universe genesis. *Physics & Astronomy International Journal*, 8(2), 93–102.

- [7] Perlmutter, S., et al. (1998). Discovery of a supernova explosion at half the age of the Universe. *Nature*, 391, 51–54.
- [8] Peebles, P. J. E., & Ratra, B. (2003). The cosmological constant and dark energy. *Reviews of Modern Physics*, 75(2), 559–606.
- [9] Prather, E. E., Slater, T. F., & Offerdahl, E. (2003). Hints of a fundamental misconception in cosmology. *Astronomy Education Review*, 1, 28–34.
- [10] Carroll, B. W., & Ostlie, D. A. (2017). *An introduction to modern astrophysics*. Cambridge University Press.
- [11] Criado, C., & Alamo, N. (2007). Round an expanding world: A simple model to illustrate the kinematical effects of the cosmological expansion. *American Journal of Physics*, 75, 331–335.
- [12] Zendri, G., Rosi, T., & Oss, S. (2016). The Hubble party balloon and the expanding universe. *European Journal of Physics*, 37, 055701.
- [13] Kutner, M. L. (2003). *Astronomy: A physical perspective* (2<sup>nd</sup> edition). Cambridge University Press.
- [14] Camus, R. R. (1999). The observational determination of the age of the universe as a laboratory exercise. *American Journal of Physics Education*, 44, 91–95.
- [15] Fischer, A. E. (2018). Friedmann's equation and the creation of the universe. *International Journal of Modern Physics D*, 27(14), 1847013.