

## การวัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

### Measuring porosity by comparisons of pressure decay rates

อภิรัฐ จันทลักษณ์<sup>1</sup>, วัชรพล ชยประเสริฐ<sup>1</sup> และ เอนก สุขเจริญ<sup>2</sup>

Apirat Chantalak<sup>1</sup>, Watcharapol Chayaprasert<sup>1</sup> and Anak Sukcharoen<sup>2</sup>

#### บทคัดย่อ

บทความวิจัยชิ้นนี้นำเสนอผลการทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นของวิธีการวัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน ชุดอุปกรณ์วัดความพรุนมีส่วนประกอบหลักคือ ขวดทดสอบโลหะทรงกระบอก ปริมาตร 1,753 ml มีฝาปิดสนิท, อุปกรณ์บันทึกค่าความดัน, บั๊มอัดอากาศไฟฟ้าและวาล์วปรับอัตราการไหล ในการวัดความพรุนแต่ละครั้ง ใช้ชุดอุปกรณ์ดังกล่าวทดสอบความดันแบบ pressure decay test จำนวน 2 ครั้ง โดยครั้งที่ 1 ทดสอบกับขวดเปล่าและครั้งที่ 2 ภายในขวดมีวัสดุทดสอบบรรจุอยู่ ความพรุนภายในขวดมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของอัตราการลดลงของความดันในขวดบรรจุวัสดุทดสอบกับอัตราการลดลงของความดันในขวดเปล่า ใช้วัสดุทดสอบทรงกลมขนาดใหญ่ (เส้นผ่าศูนย์กลาง = 37.86 mm, ปริมาตร = 28.42 ml) จำนวน 9 และ 27 ชิ้น และวัสดุทรงกลมขนาดเล็ก (เส้นผ่าศูนย์กลาง = 2.35 mm, ปริมาตร =  $6.87 \times 10^{-3}$  ml) จำนวน 36,000 และ 144,000 ชิ้น ใช้วิธีวัดขนาดเป็นวิธีวัดความพรุนอ้างอิง เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% error) ระหว่างวิธีวัดขนาดและวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน มีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ดังนั้นวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันสามารถวัดความพรุนของวัสดุได้ในระดับที่ยอมรับได้ โดยขนาดและรูปร่างของปริมาตรช่องว่างอากาศไม่มีผลต่อความถูกต้องของการวัด

#### ABSTRACT

The objective of this research was to preliminarily evaluate the performance of the porosity measurement method by comparisons of pressure decay rates. The measuring equipment consisted of a 1,753-ml metal bottle, a pressure data logger, an air pump and a flow control valve. For each porosity measurement, two pressure decay tests are conducted. In the first pressure test, the bottle is empty and in the second test the bottle contains the porous media sample. The porosity of the sample equals to the ratio of the pressure decay rate of the second test (i.e., bottle filled with sample) to that of the first test (i.e., empty bottle). The two types of samples used in this study were 37.86-mm

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

<sup>1</sup> Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom 73140

<sup>2</sup> ฝ่ายเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

<sup>2</sup> National Agricultural Machinery Center, Research and Development Institute at Kamphaengsaen, Kasetsart University - Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom 73140

diameter and 2.35-mm solid spheres (volume = 28.42 and  $6.87 \times 10^{-3}$  ml, respectively). The numbers of spheres used in the tests were 9 and 27 for the bigger spheres, and 36,000 and 144,000 for the small ones. The reference values of porosity were calculated based on the spheres' diameters and the volume of the test bottle. The differences in the porosities obtained from the two methods were in the range of  $\pm 5\%$ . The porosity measurement method by comparisons of pressure decay rates provided accurate results regardless of the size and shape of void spaces in the porous sample.

Key Words: porosity, pressure decay, gas pycnometer

e-mail: fengwpc@ku.ac.th

## คำนำ

ความพรุน (porosity,  $\varepsilon$ ) คือ อัตราส่วนร้อยละของปริมาตรช่องว่างในเนื้อวัสดุพรุน (pore space,  $V_p$ ) กับปริมาตรรวม (bulk volume,  $V_b$ ) ของวัสดุพรุน (porous material)

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_s}{V_b} \times 100\% \quad (1)$$

โดยที่  $V_s$  คือ ปริมาตรเนื้อของแข็ง (solid volume) ในวัสดุพรุน ความพรุนเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุพรุน ซึ่งนอกจากจะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรรวมและความหนาแน่นรวม (bulk density) ของวัสดุพรุนแล้ว (Mohsenin, 1986) ยังบ่งบอกถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนและความต้านทานการไหลของอากาศผ่านวัสดุ Jaeger et al. (2007) กล่าวว่าความพรุนของหินมีส่วนช่วยลดแรงสั่นสะเทือนในชั้นหินใต้ดิน ในผลิตภัณฑ์อาหาร ความพรุนเป็นคุณสมบัติที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เช่น พื้นผิวเนื้อสัมผัสกลิ่นรสที่รับรู้ของผู้บริโภคและการดูดซับน้ำมันของอาหารระหว่างการปรุงจากการทอดและการเก็บรักษา (Petrauskas, 2007; Adedeji and Ngadi, 2011) การอบแห้งเมล็ดธัญพืชโดยทั่วไปใช้วิธีการเป่าลมร้อนผ่านชั้นเมล็ด ซึ่งขนาดของช่องว่างระหว่างเมล็ดธัญพืช (ความพรุน) เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานของพัดลมและอัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างลมและเมล็ดธัญพืช (Chung and Lee, 1985; Raffray and Pulsifer, 2003)

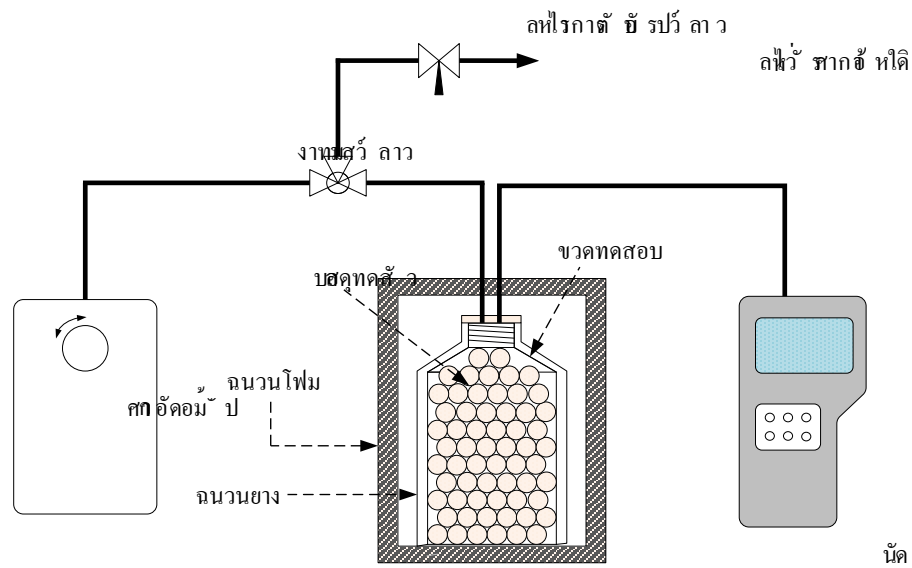
การวัดปริมาตรของแข็งหรือปริมาตรช่องว่างของวัสดุพรุนเป็นขั้นตอนสำคัญในการหาค่าความพรุน วิธีการวัดปริมาตรทั้ง 2 นี้สามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่ใช้หลักการพื้นฐานอย่างง่าย เช่น การวัดขนาด (dimension) โดยตรง หรือการแทนที่ด้วยของเหลว (liquid displacement method) (ASTM, 2005) มีข้อดีคือ ไม่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีข้อจำกัดในแง่ความละเอียดถูกต้องของการวัดและชนิดของวัสดุพรุนที่สามารถวัดได้ (Trefethen, 1969) วิธีที่ใช้เทคนิคและอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อน เช่น การใช้วิธีอัลตราโซนิก (ultrasonic) (Petrauskas, 2007) หรือการใช้คุณสมบัติการเปลี่ยนแปลงของความจุไฟฟ้า (Matko, 2003) มีข้อจำกัดในแง่ของค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น วิธีการใช้การขยายตัวของก๊าซ (gas expansion) โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า gas pycnometer เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง ซึ่งได้รับการพัฒนาทั้งทางด้านอุปกรณ์และเทคโนโลยีการจากนักวิจัยหลายกลุ่ม (Washburn and Bunting, 1922; Beranek, 1942; Champoux et al., 1991; Leclaire et al., 2003; Tamari, 2004; Tamari and Aguilar-Chávez, 2004; Salissou and Panneton, 2007) ดังนั้นการ

พัฒนาวิธีการวัดความพรุนของวัสดุโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน ซึ่งเป็นวิธีที่มีหลักการวัดความพรุนที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่ ในปัจจุบัน โดยมีจุดประสงค์ดังนี้

1. ออกแบบและเสนอหลักการชุดทดสอบวัดความพรุนของวัสดุโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน
2. ทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นของวิธีการวัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

### อุปกรณ์และวิธีการ

ชุดอุปกรณ์วัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน (ภาพที่ 1) มีส่วนประกอบหลักคือ ชุดทดสอบซึ่งเป็นขวดโลหะทรงกระบอก ปริมาตร 1,753.00 ml มีฝาปิดได้สนิท, อุปกรณ์บันทึกค่าความดัน (Climomaster Model 6531, Kanomax Japan Inc., Osaka, Japan), บั๊มอัดอากาศไฟฟ้า (ACO-9905, Guangdong Hailea Group Inc., Guangdong, China), และวาล์วปรับอัตราการไหล (AS 1200, SMC (Thailand) Ltd., Pathum Thani, Thailand) ชุดทดสอบถูกหุ้มด้วยฉนวนความร้อน 2 ชั้น วาล์วปรับอัตราการไหลและบั๊มอัดอากาศถูกเชื่อมต่อกับชุดทดสอบผ่านวาล์ว 3 ทางและชุดทดสอบถูกเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บันทึกค่าความดันอีกต่อหนึ่ง การเชื่อมต่อทั้งหมดใช้ท่อลม PE (polyethylene) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 mm



ภาพที่ 1 ชุดอุปกรณ์วัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

การวัดระดับความมิดชิด (air-tightness) ของโครงสร้างปิด (enclosure) ใดๆ สามารถทำได้โดยการทดสอบความดัน (pressurization test) โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบ pressure decay (P-t) test และ แบบ equilibrium pressure-flow (P-Q) test (ASHRAE, 2001) การทดสอบแบบ P-t test ทำโดยการอัด (หรือดูด) อากาศภายในโครงสร้างปิดทำให้ความดันภายในโครงสร้างมีค่าสูงกว่า (หรือต่ำกว่า) สภาวะบรรยากาศภายนอกที่ค่าเริ่มต้นค่าหนึ่ง จากนั้นหยุดการอัดอากาศแล้วปล่อยให้อากาศภายในโครงสร้างปิดรั่วออกผ่านช่องเปิดที่อยู่โดยรอบโครงสร้าง การลดลงของความดันภายในโครงสร้างปิดจะถูกอธิบายได้โดยสมการต่อไปนี้

$$p_t = \frac{P_i}{\frac{t}{2PHL}} \quad (2)$$

โดยที่  $p_t$  คือ ความดันภายในโครงสร้างที่เวลา  $t$  (s) ใดๆ (Pa),  $p_0$  คือ ค่าความดันเริ่มต้น (Pa) และ PHL คือ ค่าคงที่ pressure half-life ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ความดันภายในขวดทดสอบลดลงครึ่งหนึ่ง (s) คณะผู้วิจัยใช้การทดสอบความดันแบบ P-t test เพื่อวัดความพรุนของวัสดุ โดยที่ทำการทดสอบความดันแบบ P-t test กับขวดทดสอบในภาพที่ 1 จำนวน 2 ครั้ง โดยกำหนดเงื่อนไขการทดสอบดังต่อไปนี้

1. คุณสมบัติต่างๆ ของช่องเปิดไม่เปลี่ยนแปลง
2. อุณหภูมิและความดันแวดล้อม (atmospheric pressure) ภายในห้องทดสอบมีค่าคงที่
3. การทดสอบทั้ง 2 ครั้ง เริ่มต้นที่ความดันคงที่เท่ากัน
4. ในการทดสอบครั้งที่ 1 ขวดทดสอบไม่มีวัสดุใดๆ อยู่ภายใน แต่ในการทดสอบครั้งที่ 2 ขวดทดสอบมีวัสดุทดสอบบรรจุอยู่ภายใน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรช่องว่างภายในขวดทดสอบ ในการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 จะอยู่ในรูปของสมการที่ 3 ปริมาตรเนื้อของแข็ง,  $V_s$ , ของวัสดุทดสอบภายในขวดทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 และค่าความพรุนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 เนื่องจากข้อจำกัดของเนื้อที่หน้ากระดาษ คณะผู้วิจัยขอไม่พิสูจน์ที่มาสมการต่างๆ ที่ถูกกล่าวถึงในบทความนี้

$$\frac{V_1}{PHL_1} = \frac{V_2}{PHL_2} \quad (3)$$

$$V_s = \left(1 - \frac{PHL_2}{PHL_1}\right)V_1 \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{PHL_2}{PHL_1} \times 100\% \quad (5)$$

ในการศึกษาครั้งนี้ การวัดความพรุนด้วยวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันถูกประเมินประสิทธิภาพ โดยทำการทดลองวัดความพรุนของวัสดุทดสอบมาตรฐาน 2 ขนาด (i.e., เล็กและใหญ่) วัสดุทดสอบมาตรฐานเป็นวัสดุทรงกลมตัน (i.e., อากาศไม่สามารถซึมผ่านเข้าสู่เนื้อในของวัสดุทดสอบ) ปริมาตรเฉลี่ยของวัสดุทดสอบ 1 ซีน ที่มีขนาดเล็กและใหญ่ คือ  $6.87 \times 10^{-3} (\pm 1.03 \times 10^{-5})$  และ  $28.42 (\pm 0.03)$  ml ตามลำดับ ปริมาตรเฉลี่ยเหล่านี้ถูกคำนวณจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย ซึ่งวัดจากวัสดุทดสอบขนาดเล็กและใหญ่ จำนวน 1,000 และ 27 ซีน ตามลำดับ ทำการวัดความพรุนกับวัสดุทดสอบมาตรฐานแต่ละขนาด โดยใช้จำนวนวัสดุ 2 จำนวน ดังแสดงในตารางที่ 1 ที่แต่ละจำนวนทำการวัดความพรุน 5 ซ้ำ ในการวัดความพรุนแต่ละซ้ำ ชุดอุปกรณ์ในภาพที่ 1 ถูกใช้ทำการทดสอบความดันแบบ P-t test 2 ครั้ง ในการทดสอบครั้งที่ 1 ขวดทดสอบว่างเปล่า แต่ในการทดสอบครั้งที่ 2 ขวดทดสอบมีวัสดุทดสอบอยู่ภายในตามจำนวนที่กำหนด

**ตารางที่ 1** ชนิดและจำนวนของวัสดุทดสอบที่ถูกใช้วัดค่าความพรุน

ชนิดของวัสดุทดสอบ	จำนวน (ซีน)	ปริมาตรเฉลี่ยของวัสดุทดสอบ 1 ซีน (ml)
ทรงกลมขนาดใหญ่	9 และ 27	28.42 ( $\pm 0.03$ )
ทรงกลมขนาดเล็ก	36,000 และ 144,000	$6.87 \times 10^{-3} (\pm 1.03 \times 10^{-5})$

การทดสอบความดันแต่ละครั้ง เริ่มต้นจากการอัดอากาศเข้าสู่ขวดทดสอบ จนกระทั่งความดันภายในขวดมีค่าสูงกว่า 3,000 Pa เล็กน้อย จากนั้น ปล่อยให้อากาศภายในรั่วออกจากขวดผ่านวาล์วปรับอัตราการไหล ช่องเปิดของวาล์วปรับอัตราการไหลถูกปรับตั้งให้มีขนาดคงที่ตลอดการศึกษาครั้งนี้ ในระหว่างที่อากาศรั่วออกจากขวดทดสอบ ความดันภายในขวดทดสอบจะถูกบันทึกค่าไว้ทุกๆ 1 s เมื่อความดันภายในขวดทดสอบมีค่าลดลงต่ำกว่า 500 Pa จึงหยุดการบันทึกค่า ค่าความดันที่ถูกบันทึกไว้จะมีลักษณะเป็น pressure decay curve (เส้นโค้งซึ่งมีค่าความดันลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป) pressure decay curve ดังกล่าวจะถูกนำมาหาค่า PHL โดยทำการฟิตเคอร์ฟ (fit curve) โดยใช้สมการที่ 2 ค่า PHL ที่ได้จะถูกใช้ในการคำนวณค่าความพรุนด้วยสมการที่ 5 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% error) ของการวัดความพรุนด้วยวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันจะถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 6

$$\% \text{ error} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_a}{\varepsilon_r} \times 100 \quad (6)$$

โดยที่  $\varepsilon_r$  คือ ความพรุนอ้างอิง (reference porosity) ซึ่งได้จากการวัดด้วยวิธีอ้างอิง (reference method) และ  $\varepsilon_a$  คือ ความพรุนซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดด้วยวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันทั้ง 5 ซ้ำ การศึกษาครั้งนี้ใช้วิธีวัดขนาดโดยตรงในการวัดค่าความพรุนอ้างอิง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 ในการคำนวณ กำหนดปริมาตรรวมของวัสดุทดสอบ,  $V_b$ , คือ ปริมาตรของขวดทดสอบ (i.e., 1,753.00 ml) และ ปริมาตรเนื้อของแข็งของวัสดุทดสอบ,  $V_s$ , คำนวณได้จากสมการที่ 7

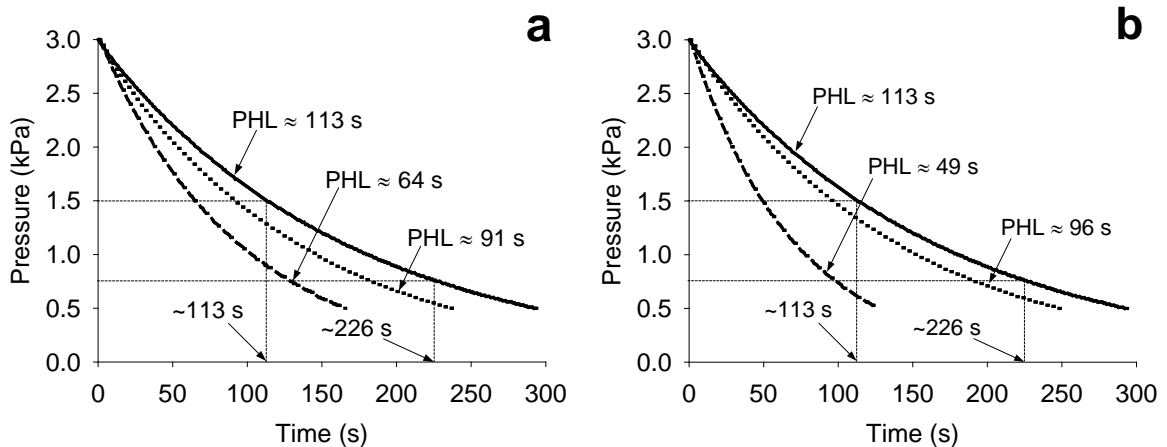
$$V_s = V_m \times N \quad (7)$$

โดยที่  $V_m$  คือ ปริมาตรเฉลี่ยของวัสดุทดสอบมาตรฐาน 1 ซีน ที่ได้จากการวัดขนาด (ml) และ  $N$  คือ จำนวนซีนของวัสดุทดสอบที่อยู่ในขวดทดสอบ (ซีน)

### ผลการทดลองและวิจารณ์

ภาพที่ 2 แสดงตัวอย่าง pressure decay curve ของขวดทดสอบเปล่าเปรียบเทียบกับ pressure decay curve ของขวดที่บรรจุวัสดุทดสอบ ในภาพที่ 2a เส้นประสั้นและเส้นประยาวเป็น pressure decay curve จากการทดสอบ 1 ซ้ำ กับขวดที่บรรจุวัสดุทดสอบขนาดใหญ่จำนวน 9 และ 27 ซีน ตามลำดับ ในภาพที่ 2b เส้นประสั้นและเส้นประยาวเป็น pressure decay curve จากการทดสอบ 1 ซ้ำ กับขวดที่บรรจุวัสดุทดสอบขนาดเล็กจำนวน 36,000 และ 144,000 ซีน ตามลำดับ ในการศึกษาครั้งนี้ ค่า  $r^2$  (coefficient of determination หรือ สัมประสิทธิ์การอธิบาย) ของการฟิตเคอร์ฟ pressure decay curve ที่ได้จากการทดลองทุกซ้ำ มีค่าไม่ต่ำกว่า 0.988 ค่า  $r^2$  ที่ใกล้เคียง 1 นี้ แสดงให้เห็นว่าสมการที่ 2 สามารถอธิบายอัตราการลดลงของความดันภายในขวดทดสอบได้เป็นอย่างดี โดยไม่ขึ้นกับรูปร่างหรือปริมาตรของช่องว่างอากาศภายในขวดทดสอบ (i.e., ขนาดหรือจำนวนของวัสดุทดสอบภายในขวด) ดังนั้น ไม่ว่าปริมาตรช่องว่างอากาศภายในขวดทดสอบจะมีค่าเป็นเท่าใด เมื่อเวลาผ่านไป 1 PHL ความดันภายในขวดทดสอบจะลดลงครึ่งหนึ่งเสมอ สังเกตว่า pressure decay curve ของขวดทดสอบเปล่า (เส้นโค้งทึบ) ในทั้ง 2 ภาพ เป็นเส้นเดียวกัน สังเกตอีกว่าช่องเปิดของวาล์วปรับอัตราการไหลถูกปรับให้ pressure decay curve ของขวดทดสอบเปล่ามี PHL ประมาณ 113 s ดังนั้น จากเส้นโค้งทึบในภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่า ที่เวลา 0 ถึงประมาณ 113 s ความดันภายในขวดทดสอบเปล่ามี

ค่าลดลงจาก 3,000 ไปเป็น 1,500 Pa และที่เวลาประมาณ 113 ถึง 226 s ความดันภายในขวดเปล่ามีค่าลดลงจาก 1,500 ไปเป็น 750 Pa ในภาพที่ 2a pressure decay curve ของขวดที่บรรจุวัสดุขนาดใหญ่จำนวน 9 และ 27 ชิ้น มีค่า PHL ประมาณ 91 และ 64 s ตามลำดับ ในภาพที่ 2b pressure decay curve ของขวดที่บรรจุวัสดุขนาดเล็กจำนวน 36,000 และ 144,000 ชิ้น มีค่า PHL ประมาณ 96 และ 49 s ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาตรช่องว่างภายในขวดทดสอบลดลง (i.e., วัสดุทดสอบในขวดมีจำนวนมากขึ้น) pressure decay curve มีค่า PHL ลดลง (i.e., ความดันภายในขวดทดสอบลดลงด้วยอัตราที่เร็วขึ้น) นอกจากนี้ อัตราส่วนการลดลงของ PHL ยังเป็นสัดส่วนเดียวกับอัตราส่วนการลดลงของปริมาตรช่องว่างอากาศในขวดตามสมการที่ 3 ยกตัวอย่างเช่น เมื่อวัสดุขนาดใหญ่ในขวดทดสอบมีจำนวน 9 และ 27 ชิ้น วิธีวัดขนาดให้ผลลัพธ์ปริมาตรช่องว่างอากาศภายในขวดเป็น 1,498.84 และ 990.52 ml ตามลำดับ ที่เงื่อนไขเดียวกันนี้ ค่า PHL ของ pressure decay curve ในภาพที่ 2a ให้ผลลัพธ์ปริมาตรช่องว่างอากาศภายในขวดเป็น 1,411.71 และ 992.85 ml (% error เป็น 5.8 และ -0.24%) ตามลำดับ โดยเฉพาะวิธีวัดขนาดให้ค่าความพรุนของวัสดุทดสอบขนาดใหญ่ 9 ชิ้น และวัสดุขนาดเล็ก 36,000 ชิ้น ที่ประมาณ 84% และ 86% ตามลำดับและให้ค่าความพรุนของวัสดุขนาดใหญ่ 27 ชิ้น และวัสดุขนาดเล็ก 144,000 ชิ้น ที่ประมาณ 55 และ 44% ตามลำดับ (ตารางที่ 2) นอกจากนี้ % error ระหว่างการวัดความพรุนด้วยวิธีวัดขนาดและวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน มีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ค่าความผิดพลาดของการวัดความพรุนด้วยอุปกรณ์ที่ถูกอธิบายไว้โดย Champoux et al. (1991) และ Leclaire et al. (2003) มีค่าไม่เกิน 5% เช่นกัน อุปกรณ์ของนักวิจัยทั้ง 2 กลุ่มมีพื้นฐานการทำงานตามหลักการขยายตัวของก๊าซ ดังนั้น การศึกษาเบื้องต้นของคณะผู้วิจัยในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า วิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันสามารถวัดปริมาตรช่องว่างอากาศในเนื้อวัสดุพรุนและความพรุนของวัสดุได้ในระดับที่ยอมรับได้ โดยขนาดและรูปร่างของปริมาตรช่องว่างอากาศไม่มีผลต่อความถูกต้องของการวัด



ภาพที่ 2 ตัวอย่าง pressure decay curve ของขวดทดสอบเปล่า (เส้นทึบ) เปรียบเทียบกับ pressure decay curve ของขวดที่บรรจุวัสดุทดสอบ (a) pressure decay curve จากการทดสอบ 1 ชั่ว กับขวดที่บรรจุวัสดุทดสอบขนาดใหญ่จำนวน 9 (เส้นประสั้น) และ 27 (เส้นประยาว) ชิ้น (b) pressure decay curve จากการทดสอบ 1 ชั่ว กับขวดที่บรรจุวัสดุทดสอบขนาดเล็กจำนวน 36,000 (เส้นประสั้น) และ 144,000 (เส้นประยาว) ชิ้น

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบค่าความพรุนจากวิธีอ้างอิงกับค่าความพรุนจากวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

$\varepsilon_r$ (%)	$\varepsilon_a$ (%)	% error	$\varepsilon_r$ (%)	$\varepsilon_a$ (%)	% error
mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD		mean $\pm$ SD	mean $\pm$ SD	
ทรงกลมขนาดใหญ่ 9 ชิ้น			ทรงกลมขนาดใหญ่ 27 ชิ้น		
84.09 [ $\pm$ 0.04]	81.21 [ $\pm$ 1.56]	3.42	54.89 [ $\pm$ 0.05]	56.71 [ $\pm$ 0.27]	-3.32
ทรงกลมขนาดเล็ก 36,000 ชิ้น			ทรงกลมขนาดเล็ก 144,000 ชิ้น		
85.89 [ $\pm$ 0.02]	84.33 [ $\pm$ 3.03]	1.82	43.57 [ $\pm$ 0.02]	43.35 [ $\pm$ 0.26]	0.49

## สรุป

วิธีการวัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันซึ่งเป็นวิธีที่มีหลักการวัดความพรุนที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่ ณ ปัจจุบัน ถูกพัฒนาขึ้น ความถูกต้องของการวัดความพรุนด้วยวิธีดังกล่าวถูกเปรียบเทียบกับวิธีวัดขนาด โดยใช้วัสดุทดสอบทรงกลมขนาดและจำนวนต่างๆ % error ระหว่างการวัดความพรุนด้วยวิธีวัดขนาดและวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน มีค่าอยู่ในช่วง  $\pm 5\%$  ผลการทดสอบประสิทธิภาพเบื้องต้นของวิธีการวัดความพรุนในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า วิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันสามารถวัดปริมาตรช่องว่างอากาศในเนื้อวัสดุพรุนและความพรุนของวัสดุได้ในระดับที่ยอมรับได้ โดยขนาดและรูปร่างของปริมาตรช่องว่างอากาศไม่มีผลต่อความถูกต้องของการวัด วิธีการวัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน ต้องมีการพัฒนาและศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการหาความพรุนกับวิธีวัดความพรุนที่มีอยู่เดิมและให้วิธีการวัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันเป็นวิธีทางเลือกใหม่กับการวัดความพรุน

## กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติและ ภาควิชาวิศวกรรมเกษตรและ คณะวิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ. นครปฐม ที่อนุเคราะห์งบประมาณในการทำงานและนำเสนอผลงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณฝ่ายเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ สถาบันวิจัยและพัฒนา กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่อนุเคราะห์สถานที่ทำการวิจัย

## เอกสารอ้างอิง

- Adedeji, A.A., Ngadi, M., 2011. Porosity determination of deep-fat-fried coatings using pycnometer (Fried batter porosity determination by pycnometer). International Journal of Food Science and Technology 46, 1266–1275.
- ASHRAE, 2001. ASHRAE Handbook - Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA.
- ASTM, 2005. Standard D 7063-05: Standard test method for effective porosity and effective air voids of compacted bituminous paving mixture samples. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Beranek, L.L., 1942. Acoustic Impedance of Porous Materials. Journal of the Acoustical Society of America 13, 248-260.

- Champoux, Y., Stinson, M.R., Daigle, G.A., 1991. Air-based system for the measurement of porosity. *Journal of the Acoustical Society of America* 89, 910-916.
- Chung, D.S., Lee, C.-H., 1985. Physical and thermal properties of grains. In: Champ, B.R., HigWey, E. (Eds), *Proceedings of an International Seminar: Preserving Grain Quality by Aeration and In-store Drying*, 9–11 October 1985, Kuala Lumpur, Malaysia, Australian Centre for International Agricultural Research, pp. 53–66.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W., 2007. *Fundamentals of rock mechanics*. 4th ed. Blackwell Publishing, Malden, MA.
- Leclaire, P., Umnova, O., Horoshenkov, K.V., Mailliet, L., 2003. Porosity measurement by comparison of air volumes. *Review of Scientific Instruments* 74, 1366-1370.
- Matko, V., 2003. Porosity determination by using stochastics method. *Automatika* 44, 155-162.
- Mohsenin, N.N., 1986. *Physical properties of plant and animal materials: structure, physical characteristics, and mechanical properties*. 2nd ed. Gordon and Breach Science Publishers, New York, NY.
- Petrauskas, A., 2007. Evaluation of porous food products by using ultrasonic methods. *Ultragarsas (Ultrasound)* 62, 20-25.
- Raffray, A.R., Pulsifer, J.E., 2003. MERLOT: a model for flow and heat transfer through porous media for high heat flux applications. *Fusion Engineering and Design* 65, 57–76.
- Salissou, Y., Panneton, R., 2007. Pressure/mass method to measure open porosity of porous solids. *Journal of Applied Physics* 101, 124913-1-124913-7.
- Tamari, S., 2004. Optimum design of the constant-volume gas pycnometer for determining the volume of solid particles. *Measurement Science and Technology* 15, 549-558.
- Tamari, S., Aguilar-Chávez, A., 2004. Optimum design of the variable-volume gas pycnometer for determining the volume of solid particles. *Measurement Science and Technology* 15, 1146–1152.
- Trefethen, L., 1969. Film notes for surface tension in fluid mechanics. National Committee for Fluid mechanics Films, Tufts University, Education Development Center 21610,
- Washburn, E.W., Bunting, E.N., 1922. Porosity: VI. Determination of porosity by the method of gas expansion. *Journal of the American Ceramic Society* 5, 112-130.