วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย
ปีที่ 23 ฉบับที่ 2 (2560) 26-35
Available online at www.tci-thaijo.org/index.php/TSAEJ
บทความวิจัย
ISSN 1685-408X

การทดสอบเครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

Testing of a Porosity Measuring Apparatus Based on Comparisons of Pressure Decay Rates

วรินทร์ คูหามณีโชติ[1], วัชรพล ชยประเสริฐ[1]*, ภวินท์ ธัญภัทรานนท์[1], เอนก สุขเจริญ[2]
Warin Koohamaneechote[1], Watcharapol Chayaprasert[1]*, Pawin Thanpattranon[1], Anak Sukcharoen[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร, คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140
[1]Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaengsaen, Kasetsart University – Kamphaengsaen Campus, Nakorn Phatom, 73140
[2]ฝ่ายเครื่องจักรกลเกษตรแห่งชาติ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม, 73140
[2]National Agricultural Machinery Center, Kasetsart University – Kamphaengsaen Campus, Nakorn Phatom, 73140
*Corresponding author: Tel: +66-34-351-896, E-mail: fengwpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันถูกพัฒนาขึ้นความพรุนสามารถหาได้จากการทดสอบความดัน (pressurization test) จำนวน 2 ครั้ง ซึ่งเครื่องวัดความพรุนสามารถทำการทดสอบความดันได้โดยอัตโนมัติครั้งที่ 1 เป็นภาชนะบรรจุว่างเปล่าและในครั้งที่ 2 มีตัวอย่างอยู่ภายในภาชนะบรรจุความดันอากาศภายในภาชนะบรรจุถูกทำให้สูงขึ้นจนกระทั่งถึงค่าคงที่ค่าหนึ่งหลังจากนั้น อากาศจะถูกปล่อยให้ไหลออกจากภาชนะเป็นเหตุให้ความดันอากาศภายในภาชนะลดลงความดันภายในภาชนะบรรจุที่ว่างเปล่าจะลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าความดันภายในภาชนะบรรจุที่มีวัสดุ อัตราการลดลงของความดันที่แตกต่างกันนี้ถูกใช้ในการคำนวณเพื่อหาปริมาตรและความพรุนของวัสดุ ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีลักษณะแตกต่างกัน 4 ชนิดคือ วัสดุทรงกลมจำนวน 3 ขนาดได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.35 (±0.01), 5.94 (±0.01) และ 37.86 (±0.19) mm ซึ่งมีจำนวน ~123,400, 9,435 และ 24 ชิ้น ตามลำดับ และวัสดุทรงกระบอกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.91 (±1.43) mm ยาว 134.02 (±0.24) mm จำนวน 17 ชิ้นผลการวัดความพรุนจากเครื่องวัดความพรุนถูกเปรียบเทียบกับผลการวัดอ้างอิงด้วยวิธีการวัดขนาดโดยตรง หรือด้วยเครื่อง gas pycnometer ความถูกต้องของผลการวัดถูกแสดงอยู่ในรูปของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (absolute percentage error) และถูกประเมินผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการวัดด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งมีปัจจัยหลักคือ pressure half-life ของภาชนะบรรจุว่างเปล่า, ความดันเริ่มต้น และชนิดของวัสดุผลการวัดให้ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 4.44% นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ทางสถิติปัจจัยหลัก PHL_{empty} มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการทดลองเปรียบเทียบกับเครื่อง gas pycnometer และปัจจัยความดันเริ่มต้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทั้ง 2 การทดลอง ซึ่งปฏิสัมพันธ์ของคู่ปัจจัยนี้ให้ค่านัยสำคัญด้วย (Sig. < 0.05) อย่างไรก็ตาม ปัจจัยชนิดของวัสดุไม่มีผลกระทบต่อความถูกต้องอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. > 0.05) ดังนั้น เครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นให้ผลการวัดที่ถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ

คำสำคัญ: ความพรุน, เครื่องวัด, การทดสอบความดัน, ค่าครึ่งชีวิตความดัน

Abstract

A porosity measuring apparatus based on comparisons of pressure decay rates was developed. The porosity of a granular sample was determinated by conducting two pressurization tests. The apparatus could perform these pressurization tests automatically. In the first and second tests, the sample chamber was empty and filled with the sample, respectively. The air pressure inside the chamber was increased to a specified level and then the inside air was released from the chamber. The pressure in the empty chamber decreased slower than that in the chamber filled with the sample. These different pressure decay rates were used in the calculation of the solid volume and then the porosity of the sample. The four different types of samples were used in this study, three sizes of spherical samples with diameters of 2.35 (±0.01), 5.94 (±0.01) and 37.86 (±0.19) mm and one size of cylindrical samples with a diameter of 21.91 (±1.43) mm and a height of 134.02

(±0.24) mm. The numbers of the sample pieces were ~123,400, 9,435 and 24, and 17, respectively. The porosity measurements from the apparatus were compared against the reference porosities measured based on either the dimensional measurement method or a gas pycnometer. The measurement accuracy was expressed in terms of absolute percentage error and was analyzed using analysis of variance (ANOVA). The main factors were the pressure half-life of the empty sample chamber, initial pressure and type of the sample. The maximum absolute percentage error was 4.44%. In addition, the statistical analysis showed that the PHL_{empty} (i.e., main factors) have significant effects in experimental comparing with the gas pycnometer and the initial pressure have significant effects in both experiment which the interaction of those factors have significant on the measurement accuracy (Sig. < 0.05). However, the sample factor did not have significant effects on the measurement accuracy (Sig. > 0.05). As a result, the porosity measuring apparatus developed in the present study yielded satisfying accuracy.

Keywords: Porosity, Measuring apparatus, Pressurization test, Pressure half-life

1 บทนำ

ความพรุนรวม (total porosity, ε_{tot}) คือ สัดส่วนของปริมาตรช่องว่าง (pore volume, V_p) ที่รวมถึงรอยแตก (crack), โพรงช่องว่าง (vug) ต่อปริมาตรรวม (bulk volume, V_b) ของวัสดุ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$\varepsilon_{tot} = \frac{V_p}{V_b} \times 100\% \quad (1)$$

ความพรุนยังผล (effective porosity, ε) หรือเรียกอีกอย่างว่าความพรุนจลนศาสตร์ (kinematic porosity) ถูกนิยามว่าเป็นสัดส่วนของบริเวณของปริมาตรช่องว่างที่ซึ่งของไหลสามารถแพร่เข้าไปได้ (connected pore, Vc) ต่อปริมาตรรวม (Glover, 2001) ดังนั้น ความพรุนยังผลจะมีค่าน้อยกว่าความพรุนรวมและสามารถหาได้จากสมการที่ 2

$$\varepsilon = \frac{V_c}{V_b} \times 100\% \quad (2)$$

ความพรุนเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุพรุนที่นอกจากจะมีความสัมพันธ์กับปริมาตรและความหนาแน่นของวัสดุพรุนแล้ว ยังมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติอื่นๆ อีกด้วยเช่น ความพรุนมีความสัมพันธ์กับความเร็วในการไหลของอากาศผ่านวัสดุพรุน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการพาความร้อน (convective heat transfer) (Nithiarasu et al., 1996; Alazmi and Vafai, 2004) สยาม และคณะ (2015) กล่าวว่า ความสามารถในการซึมผ่านได้ (permeability) มีความสัมพันธ์กับช่องว่างภายในวัสดุพรุน (pore space) และเป็นสมบัติที่สำคัญในการพิจารณาโดยเฉพาะเมื่อใช้ในทางวิศวกรรมโยธา เช่น ดินที่ใช้ในการก่อสร้างถนนหรือเขื่อน จะต้องเป็นดินมวลละเอียด มีความสามารถในการซึมผ่านได้ต่ำ เนื่องจากว่าหากน้ำซึมผ่านดินที่ยึดเกาะกันอยู่ได้ง่ายจะทำให้คันดินสูญเสียความแข็งแรงได้ ดังนั้น จึงได้มีการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการวัดความพรุนหลากหลายวิธี ซึ่งวิธีที่ได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวางและสะดวกต่อการใช้งานคือ การแทนที่ด้วยของเหลว (liquid displacement) (Glover, 2001; Alan et al., 2014; Encyclopædia Britannica, 2016) และการขยายตัวของก๊าซ (gas expansion) (Glover, 2001; Leclaire et al., 2003)

นอกจากนี้ (Chayaprasert et al., 2014) ได้พัฒนาวิธีการวัดปริมาตรและความพรุนโดยใช้หลักการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน ซึ่งใช้การทดสอบความดัน (pressurization test) แบบ pressure decay (P-t) test เป็นวิธีพื้นฐานของการวัดในกระบวนการทดสอบ P-t test อากาศจะถูกอัดเข้าสู่ภายในโครงสร้างปิด จนกระทั่งถึงความดันเริ่มต้นค่าหนึ่งแล้วจึงหยุดอัดอากาศหากโครงสร้างปิดมีรอยรั่วอยู่ อากาศจะรั่วออกตามรอยรั่วบนโครงสร้าง และความดันภายในโครงสร้างปิดจะลดลงอย่างช้าๆพฤติกรรมการลดลงของความดันภายในโครงสร้างปิดสามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ 3

$$p_t = \frac{p_i}{2^{\frac{t}{PHL}}} \quad (3)$$

โดยที่ p_t คือ ความดันภายในโครงสร้างปิดที่เวลาใดๆ (Pa), p_i คือ ความดันเริ่มต้น (Pa), t คือ เวลา (s) และ PHL คือ pressure half-life หรือค่าครึ่งชีวิตความดัน (s) ซึ่งถูกนิยามเป็นระยะเวลาที่ความดันภายในโครงสร้างปิดลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความดันเริ่มต้นจากสมการที่ 3 สามารถพิสูจน์ได้ว่า PHL มีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับปริมาตรช่องว่างภายในโครงสร้างปิดดังนั้น ปริมาตรและความพรุนของวัสดุที่เป็นเมล็ด (granular material) สามารถหาได้จากการทดสอบ P-t test จำนวน 2 ครั้ง โดยที่ในการทดสอบครั้งที่ 1 โครงสร้างปิดไม่มีวัสดุอยู่ภายใน และในการทดสอบครั้งที่ 2 วัสดุที่ต้องการวัดปริมาตรหรือความพรุนถูกบรรจุอยู่ภายในโครงสร้างปิดการทดสอบ P-t test เพื่อหาความพรุนหรือปริมาตรจำเป็นต้อง

กำหนดเงื่อนไขการทดสอบให้เท่ากันทั้ง 2 ครั้ง (อภิรัฐ, 2557) คือ โครงสร้างปิดมีช่องเปิดให้อากาศรั่วไหลออกมา, คุณสมบัติของช่องเปิดไม่เปลี่ยนแปลง, อุณหภูมิและความดันแวดล้อมบรรยากาศโดยรอบสถานที่ทดสอบมีค่าคงที่ และความดันเริ่มต้นไม่เปลี่ยนแปลงทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาตรช่องว่างอากาศภายในโครงสร้างปิด (V_1) และค่าครึ่งชีวิตความดัน (PHL_1) จากการทดสอบครั้งที่ 1 และค่าดังกล่าวจากการทดสอบครั้งที่ 2 (V_2 และ PHL_2) สามารถแสดงได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{V_1}{PHL_1}=\frac{V_2}{PHL_2} \quad (4)$$

นอกจากนี้ ปริมาตรของวัสดุที่อยู่ภายในโครงสร้างปิด (V_s) ซึ่งไม่นับรวมปริมาตรช่องว่างอากาศระหว่างเนื้อวัสดุ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5

$$V_s=\left(1-\frac{PHL_2}{PHL_1}\right)V_1 \quad (5)$$

และยังสามารถพิสูจน์ต่อไปได้ว่า ความพรุนยังผลของวัสดุที่เป็นเมล็ดคือ อัตราส่วนร้อยละของ PHL_2 ต่อ PHL_1 ดังสมการที่ 6

$$\varepsilon=\frac{PHL_2}{PHL_1}\times 100\% \quad (6)$$

ในงานวิจัยนี้ เครื่องวัดความพรุน (porosity measuring apparatus) ที่ใช้หลักการของ (Chayaprasert et al., 2014) เป็นพื้นฐานการทำงานถูกสร้างขึ้น และผู้วิจัยประเมินความถูกต้องของเครื่องโดยทำการทดลองวัดความพรุนของตัวอย่างรูปทรงเรขาคณิตและเปรียบเทียบค่าความพรุนที่ได้กับการวัดขนาดโดยตรง (dimensional measurement method) และเครื่อง gas pycnometer (เครื่องวัดความหนาแน่น)

2 อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ฮาร์ดแวร์ (hardware)

เครื่องวัดความพรุนที่ถูกพัฒนาขึ้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ระบบจ่ายอากาศ (air supply system) และระบบควบคุม (control system) (Figure 1) ระบบจ่ายอากาศถูกบรรจุอยู่ภายในกล่องโฟม (polystyrene insulator) ประกอบด้วย ภาชนะบรรจุตัวอย่าง (sample chamber) มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำจากอลูมิเนียม ขนาดบรรจุ 1,772 ml ถูกห่อหุ้มด้วยฉนวนฟอลย์กันความร้อน (foil-bubble insulation), เซ็นเซอร์วัดความดัน (pressure sensor) (PSE-550, SMC Co., Ltd., Tokyo, Japan), บอลวาล์วไฟฟ้า (CWX-15Q, Tianjin Tianfei High-Tech Valve Co., Ltd., Tianjin, China) จำนวน 2 ตัว ซึ่งใช้เป็นวาล์วควบคุมทิศทางการไหลขาเข้าและขาออก, วาล์วปรับอัตราการไหล (flow control valve) (AS 1200, SMC (Thailand) Ltd., Pathum Thani, Thailand), ท่อลม PU (polyurethane) เส้นผ่านศูนย์กลางใน 4.76 mm (3/16" × 20M, อุตสาหกรรมท่อน้ำไทย จำกัด, กรุงเทพมหานคร, ไทย) และข้อต่อ 3 ทาง ระบบควบคุมทำหน้าที่ควบคุมขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดความพรุน, ประมวลผลและบันทึก และแสดงผลการวัด ซึ่งประกอบด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) (Mega 2560, Arduino LLC, Ivrea, Italy), รีเลย์ (relay) (SRD-05VDC-SL-C, Ningbo Songle Relay Co., Ltd., Zhejiang, China) และแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า (power supply) 24 VDC (KV-U2, Keyence Corp., Osaka, Japan)

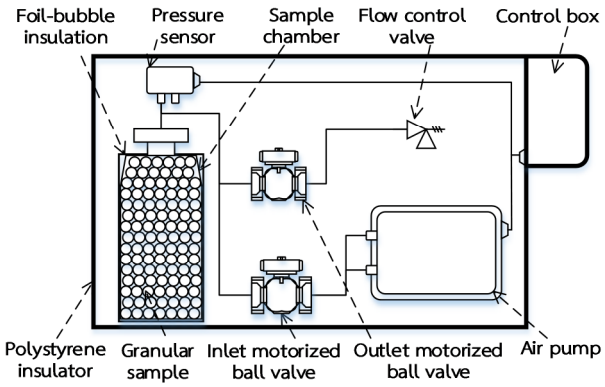

Figure 1 Porosity measuring apparatus.

2.2 ซอฟท์แวร์ (software)

โปรแกรมของระบบควบคุมถูกเขียนด้วย LabVIEW (LabVIEW 2015, National Instrument Co., Texas, USA) ขั้นตอนการทดสอบ P-t test ทั้ง 2 ครั้งสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้ขณะเริ่มต้นเครื่องวัดความพรุนควบคุมให้ปั๊มอัดอากาศจ่ายอากาศเข้าสู่ภาชนะบรรจุตัวอย่าง, บอลวาล์วขาเข้าเปิด และบอลวาล์วขาออกปิดเมื่อความดันภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างมีค่ามากกว่าความดันเริ่มต้นที่กำหนดไว้ (เช่น 3,000 Pa) เล็กน้อย ปั๊มอัดอากาศจะหยุดจ่ายอากาศและบอลวาล์วขาเข้าจะปิด แล้วจึงหน่วงเวลา 30 s หลังจากนั้น บอลวาล์วขาออกจะเปิด ทำให้อากาศภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างถูกระบายออกผ่านวาล์วปรับอัตราการไหล ซึ่งในขณะเดียวกัน ความดันภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างจะถูกบันทึกทุกๆ 1 s ไปพร้อมกันเมื่อความดันภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างลดลงต่ำกว่า 500 Pa บอลวาล์วขาออกจะปิดจากนั้น โปรแกรมของระบบควบคุมจะประมวลผลข้อมูลอัตราการลดลงของความดัน เพื่อคำนวณค่า PHL

2.3 การวัดความพรุน

ในการวัดความพรุนของวัสดุตัวอย่าง 1 ครั้ง จำเป็นต้องทำการทดสอบ P-t test 2 ครั้ง ต่อเนื่องกัน ในการทดสอบ P-t test ครั้งที่ 1 ภาชนะบรรจุตัวอย่างจะเป็นภาชนะว่างเปล่า ซึ่งค่า PHL_1 จากผลการทดสอบครั้งที่ 1 ถูกกำหนดให้เป็นค่า PHL ของ

ภาชนะบรรจุเปล่า (PHL_{empty}) ในการทดสอบครั้งที่ 2 ตัวอย่างจะถูกเทลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง แล้วทำการทดสอบ P-t test โดยที่ไม่มีการปรับตั้งวาล์วปรับอัตราการไหล (i.e., ช่องเปิดของวาล์วปรับอัตราการไหลระหว่างการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 มีขนาดไม่เปลี่ยนแปลง) ดังนั้น ค่า PHL_2 จึงเป็นค่าครึ่งชีวิตความดันจากภาชนะซึ่งมีตัวอย่างบรรจุอยู่ภายในจากนั้น ค่า PHL_1 และ PHL_2 ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 ครั้ง จะถูกคำนวณหาค่าความพรุนด้วยสมการที่ 6

2.4 แผนการทดลอง

ผู้วิจัยทำการทดลองเพื่อประเมินว่าค่า PHL ของภาชนะบรรจุว่างเปล่า (PHL_{empty}), ความดันเริ่มต้น (initial pressure) และชนิดของตัวอย่าง (sample) (i.e., ขนาดและรูปร่าง) ไม่ส่งผลต่อความถูกต้องของผลการวัดความพรุนด้วยเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้น

ตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุรูปทรงเรขาคณิต มีลักษณะเป็นทรงกลม 3 ขนาดคือ ทรงกลมขนาดเล็ก (S sphere), กลาง (M sphere) และใหญ่ (L sphere) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.35 (±0.01), 5.94 (±0.01) และ 37.86 (±0.19) mm จำนวน ~123,400, 9,435 และ 24 ชิ้น ตามลำดับ และทรงกระบอก (cylinder) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 21.91 (±1.43) mm ยาว 134.02 (±0.24) mm จำนวน 17 ชิ้นขนาดของตัวอย่างดังกล่าวถูกวัดโดยใช้เวอร์เนีย (vernier caliper) ความละเอียด (resolution) 0.05 mm (Mitutoyo Corp., Kawasaki, Japan) และไมโครมิเตอร์ (micrometer) ความละเอียด 0.001 mm (Mitutoyo Corp., Kawasaki, Japan)

การทดลองถูกออกแบบเป็น split-split plot design (Gardner, 2004; Bradley and Nachtsheim, 2009) โดยมีปัจจัยหลัก (main plot) คือ PHL_{empty} (ค่า PHL ของผลการทดสอบความดันขณะภาชนะบรรจุว่างเปล่า), ปัจจัยรอง (sub plot) คือ ความดันเริ่มต้น (initial pressure) และปัจจัยรองอันดับ 2 (sub-sub plot) คือ ชนิดของตัวอย่าง (sample) เงื่อนไขและลำดับการทดลองถูกสรุปไว้ใน Table 1 PHL_{empty} ของแต่ละเงื่อนไขการทดลองสามารถปรับตั้งค่าได้โดยปรับตั้งวาล์วปรับอัตราการไหลจนกระทั่งค่า PHL_{empty} อยู่ในช่วง ±10 s ของค่าเงื่อนไขที่กำหนดความดันเริ่มต้นสามารถตั้งค่าในโปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนขึ้น (หัวข้อ 2.2) ผลการวัดจากเครื่องวัดความพรุนถูกเปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยวิธีการวัดขนาดโดยตรงและเครื่อง gas pycnometer (Accupyc 1330, Micromeritics Instrument Corp., Norcross, USA) ในวิธีการวัดขนาดโดยตรงปริมาตรของตัวอย่างเรขาคณิตถูกคำนวณได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของตัวอย่าง

ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่อง gas pycnometer ถูกแสดงใน Figure 2 เครื่อง gas pycnometer ใช้หลักการพื้นฐานของกฎของบอยล์ (Boyle's Law) (Dickerson et al., 1979) โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรและความดันของก๊าซทำงาน ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ก๊าซ helium ในขั้นตอนการทดสอบด้วยเครื่อง gas pycnometer ตัวอย่างจะถูกชั่งน้ำหนัก (w_{sample}) และถูกบรรจุลงในภาชนะบรรจุตัวอย่าง (sample chamber ใน Figure 2) ซึ่งมีปริมาตรเป็น $V_{chamber}$ เมื่อเครื่องเริ่มทำงานก๊าซ helium จะถูกปล่อยเข้าไปในภาชนะบรรจุตัวอย่างจนกระทั่งความดันภายในภาชนะมีค่าคงที่ ที่ประมาณ 137 kPa (Micromeritics Instrument Corp., 2001) และค่าความดันนี้จะถูกบันทึกไว้ (P_1) ลำดับต่อมา เครื่องจะเปิดวาล์วภายใน (3-way valve ใน Figure 2) เพื่อให้ก๊าซ helium ที่อยู่ในภาชนะบรรจุตัวอย่างขยายตัวเข้าสู่ภาชนะอ้างอิง (reference chamber) ซึ่งมีปริมาตรเป็น V_{ref} และทำให้ความดันภายในภาชนะบรรจุตัวอย่างลดต่ำลงสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง (P2) หลังจากนั้น ปริมาตรตัวอย่าง V_{sample} สามารถถูกคำนวณได้จากสมการที่ 7 ความหนาแน่นของตัวอย่างค่าที่วัดได้จากเครื่อง gas pycnometer (ρ_{pyc}) จะถูกคำนวณจากปริมาตรและน้ำหนักของตัวอย่างที่ถูกบรรจุอยู่ภายในภาชนะบรรจุตัวอย่าง (สมการที่ 8) ทั้งนี้ รายละเอียดการใช้งานเครื่อง gas pycnometer สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Hintz et al. (2008)

$$V_{sample} = V_{chamber} - \frac{V_{ref}}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (7)$$

$$\rho_{pyc} = \frac{w_{sample}}{V_{sample}} \quad (8)$$

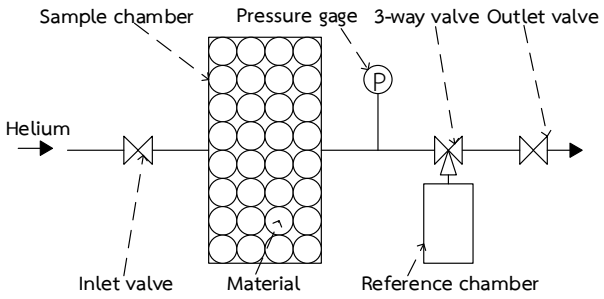

Figure 2 Basic component of a gas pycnometer.

Source: Modified from Hintz et al. (2008)

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยทำการทดสอบด้วยเครื่อง gas pycnometer กับตัวอย่างเพียง 2 ชนิดคือ ทรงกลมขนาดเล็กและขนาดกลาง เนื่องจากภาชนะบรรจุตัวอย่างของเครื่อง gas pycnometer มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm × ยาว 39.8 mm ซึ่งเล็กเกินกว่าจะสามารถบรรจุตัวอย่างทรงกลมขนาดใหญ่และทรงกระบอกได้อย่างไรก็ตาม เนื่องจากภาชนะบรรจุตัวอย่างของเครื่อง gas pycnometer มีขนาดเพียง 100 ml ซึ่งมีความแตกต่างกับภาชนะบรรจุตัวอย่างของเครื่องวัดความพรุนที่ถูกใช้ในการศึกษาครั้งนี้มาก (i.e., 1,772 ml) ซึ่งส่งผลให้เกิดความ

คลาดเคลื่อนของการวัดผลการวัดความพรุนของวัตถุทรงกลมหรือทรงกระบอกที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะทรงกระบอกจะขึ้นอยู่กับความแน่นของการบรรจุ, ปริมาตรโดยรวมของช่องว่างระหว่างวัสดุกับผนังด้านข้าง (radial direction) และผนังด้านบน-ล่าง (axial direction), และสัดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางภาชนะบรรจุตัวอย่างต่อเส้นผ่านศูนย์กลางวัตถุ (Zhang et al., 2006; Burtseva et al., 2015) เมื่อภาชนะบรรจุตัวอย่างมีขนาดเล็ก สัดส่วนระหว่างปริมาตรโดยรวมของช่องว่างระหว่างวัสดุทรงกลมกับผนังกับปริมาตรระหว่างชิ้นวัสดุจะมีค่าสูง ซึ่งในกรณีนี้ผลการวัดความพรุนที่ได้จะคลาดเคลื่อนจากค่าความพรุนซึ่งพิจารณาเฉพาะปริมาตรระหว่างชิ้นวัสดุเท่านั้น ดังนั้น เพื่อลดผลกระทบของปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุกับผนังภาชนะ ค่าความพรุนจากเครื่อง gas pycnometer จะถูกคำนวณ โดยใช้ปริมาตรของแข็งของตัวอย่างซึ่งมีน้ำหนักเท่ากับน้ำหนักของตัวอย่างซึ่งภาชนะของเครื่องวัดความพรุน (Figure 1) สามารถบรรจุได้จนเต็ม (w') ปริมาตรดังกล่าว (Vs,pyc) ถูกคำนวณดังสมการที่ 9.

$$V_{s,pyc} = \frac{w'}{\rho_{pyc}} \quad (9)$$

จากนั้น ความพรุนของตัวอย่างสามารถคำนวณได้จาก $V_{s,pyc}$ และปริมาตรของภาชนะบรรจุ (i.e., 1,772 ml) ดังสมการที่ 10

$$\varepsilon = \frac{V_b - V_{s,pyc}}{V_b} \quad (10)$$

ความถูกต้องของการวัดความพรุนถูกประเมินด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ (Absolute Percentage Error - APE) ดังแสดงในสมการที่ 11 ซึ่งแสดงถึงความถูกต้องของผลการวัดความพรุน (Makridakis and Hibon, 1995; Hyndman and Koehler, 2006)

$$APE = \left| \frac{\varepsilon_{ref} - \varepsilon_{mea}}{\varepsilon_{ref}} \right| \times 100 \quad (11)$$

โดยที่ ε_{ref} คือ ความพรุน (%) ที่วัดได้จากวิธีการวัดขนาดโดยตรงหรือจาก gas pycnometer และ ε_{mea} คือ ความพรุน (%) ที่วัดได้จากเครื่องวัดความพรุน

Table 1 Experimental conditions for evaluating the accuracy of the porosity measuring apparatus.

PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample	PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample	PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample
180	3,000	L sphere	120	3,000	S sphere	60	2,000	S sphere
		S sphere			L sphere			M sphere
		Cylinder			Cylinder			L sphere
		M sphere			M sphere			Cylinder
	2,000	Cylinder		2,000	L sphere		3,000	Cylinder
		M sphere			M sphere			S sphere
		L sphere			S sphere			M sphere
		S sphere			Cylinder			L sphere

3 ผลและวิจารณ์

Table 2 แสดงผลการวัดความพรุนของตัวอย่างรูปทรงเลขาคณิตทั้ง 4 ชนิดที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับการวัดขนาดโดยตรง และ Table 3 แสดงผลการวัดความพรุนของตัวอย่างทรงกลมขนาดเล็กและขนาดกลางที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดความพรุนเปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่อง gas pycnometer ค่าความพรุนจากการวัดขนาดโดยตรง, เครื่อง gas pycnometer และเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้น ของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดอยู่ในช่วงประมาณ 40–60% ซึ่งอยู่ในช่วงเดียวกับการศึกษาของ Zhang et al. (2006) และ Burtseva et al. (2015) ซึ่งพบว่าวัตถุทรงกลมหรือทรงกระบอกทั่วไปที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะทรงกระบอกจะมีค่าความพรุนอยู่ในช่วง 25.9 – 67%

นักวิจัยหลายกลุ่มได้พัฒนาเครื่องวัดปริมาตร, ความหนาแน่น หรือความพรุน โดยใช้หลักการพื้นฐานแตกต่างกันและทดสอบกับวัสดุหลายชนิด Leclaire et al. (2003) พัฒนารูปแบบการวัดด้วยหลักการของเครื่อง gas pycnometer โดยทดสอบกับทราย, เม็ดดิน และคอนกรีตพรุน (Iraguen et al., 2006) พัฒนาเครื่องวัดแบบไม่ทำลาย (non-destructive) ชนิดพกพาสำหรับใช้วัดปริมาตรของพวงองุ่นบนต้น โดยใช้เทคนิคการแทนที่อากาศ การศึกษาทั้ง 2 นี้เปรียบเทียบผลการวัดกับการแทนที่ด้วยน้ำ นอกจากนี้ (Chayaprasert et al., 2014) ใช้หลักการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันเพื่อวัดความพรุนของวัสดุรูปทรงเลขาคณิต โดยเปรียบเทียบกับการวัดขนาดโดยตรงเครื่องวัดของการศึกษาเหล่านี้ให้ผลการวัดซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ±5% ด้วยเหตุนี้ การศึกษาครั้งนี้จึงกำหนดให้ ยอมรับผลการ

ทดสอบเครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความการวัด ที่ค่า APE ไม่เกิน 5% สังเกตว่า ใน Table 2 และ 3 ที่ทุกเงื่อนไขการทดลอง ค่า APE มีค่าต่ำกว่า 5% การทดลองที่เงื่อนไข PHL_{empty} ~180 s, ความดันเริ่มต้น 3,000 Pa และตัวอย่างทรงกระบอก ให้ค่า APE สูงสุดอยู่ที่ 4.44% ดังนั้น ผู้วิจัยจึงพิจารณาให้ผลการวัดของเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นอยู่ในระดับที่น่าพอใจและมีความน่าเชื่อถือในระดับเดียวกับงานวิจัยอื่น

Table 2 Porosity measurements from the porosity measuring apparatus (ε_{mea}) compared with those from the dimensional measurement method (ε_{ref}).

PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample	ε_{mea} (%) [SD]	ε_{ref} (%) [SD]	APE (%)
60	2,000	S sphere	51.78 [0.34]	52.66 [0.67]	1.67
		M sphere	41.20 [0.11]	41.57 [0.21]	0.90
		L sphere	61.56 [0.21]	61.52 [0.93]	0.07
		Cylinder	55.41 [0.27]	55.14 [5.09]	0.49
	3,000	S sphere	50.57 [0.15]	52.66 [0.67]	3.98
		M sphere	41.12 [0.17]	41.57 [0.21]	1.08
		L sphere	63.05 [0.28]	61.52 [0.93]	2.50
		Cylinder	56.74 [0.20]	55.14 [5.09]	2.89
120	2,000	S sphere	50.80 [0.31]	52.66 [0.67]	3.54
		M sphere	41.98 [0.35]	41.57 [0.21]	0.99
		L sphere	62.11 [0.31]	61.52 [0.93]	0.96
		Cylinder	55.20 [0.20]	55.14 [5.09]	0.11
	3,000	S sphere	51.20 [0.21]	52.66 [0.67]	2.78
		M sphere	41.38 [0.30]	41.57 [0.21]	0.45
		L sphere	60.85 [0.51]	51.52 [0.93]	1.08
		Cylinder	55.16 [0.29]	55.14 [5.09]	0.03
180	2,000	S sphere	51.61 [0.21]	52.66 [0.67]	2.00
		M sphere	41.59 [0.30]	41.57 [0.21]	0.04
		L sphere	61.81 [0.51]	61.52 [0.93]	0.48
		Cylinder	56.29 [0.20]	55.14 [5.09]	2.09
	3,000	S sphere	52.81 [0.21]	52.66 [0.67]	0.27
		M sphere	42.84 [0.15]	41.57 [0.21]	3.05
		L sphere	62.35 [0.26]	61.52 [0.93]	1.36
		Cylinder	57.59 [0.30]	55.14 [5.09]	4.44

Table 3 Porosity measurements from the porosity measuring apparatus (ε_{mea}) compared with those from the gas pycnometer (ε_{ref}).

PHL_{empty} (s)	Initial pressure (Pa)	Sample	ε_{mea} (%) [SD]	ε_{ref} (%) [SD]	APE (%)
60	2,000	S sphere	51.78 [0.34]	51.23 [0.04]	1.09
		M sphere	41.20 [0.11]	41.65 [0.04]	1.10
	3,000	S sphere	50.57 [0.15]	51.23 [0.04]	1.28
		M sphere	41.12 [0.17]	41.65 [0.04]	1.28
120	2,000	S sphere	50.80 [0.31]	51.23 [0.04]	0.83
		M sphere	41.98 [0.35]	41.65 [0.04]	0.79
	3,000	S sphere	51.20 [0.21]	51.23 [0.04]	0.05
		M sphere	41.38 [0.30]	41.65 [0.04]	0.65
180	2,000	S sphere	51.61 [0.21]	51.23 [0.04]	0.76
		M sphere	41.59 [0.30]	41.65 [0.04]	0.15
	3,000	S sphere	52.81 [0.21]	51.23 [0.04]	3.08
		M sphere	42.84 [0.15]	41.65 [0.04]	2.85

ปัจจัยหลัก PHL_{empty}, ความดันเริ่มต้น (initial Pressure) และชนิดของตัวอย่าง (sample) ถูกวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยมีสมมุติฐาน (null hypothesis) คือ ปัจจัยหลักที่ระดับแตกต่างกันไม่ทำให้ค่า APE แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (i.e., ความถูกต้องของผลการวัดด้วยเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นไม่ขึ้นอยู่กับค่า PHL_{empty} หรือ ความดันเริ่มต้น หรือ ชนิดตัวอย่าง ที่ใช้ในการวัด) อีกทั้ง ปฏิสัมพันธ์ (interaction) ของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย ซึ่งประกอบด้วยคู่ปัจจัยดังนี้ PHL_{empty} กับความดันเริ่มต้น (PHL_{empty} × initial pressure), ชนิดของตัวอย่างกับความดันเริ่มต้น (sample × initial pressure) และชนิดของตัวอย่างกับ PHL_{empty} (sample × PHL_{empty}) และปฏิสัมพันธ์ทั้ง 3 ปัจจัย (i.e., PHL_{empty} × Initial pressure × Sample) ถูกประเมิน โดยมีสมมุติฐานคือ ปฏิสัมพันธ์ของแต่ละคู่ปัจจัยไม่มีผลกระทบต่อค่า APE อย่างมีนัยสำคัญ (i.e., การเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยหลักคู่ที่สนใจไม่ทำให้ความถูกต้องของผลการวัดด้วยเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นเปลี่ยนแปลงไป)

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นกับการวัดขนาดโดยตรงถูกแสดงใน Table 4 สังเกตว่า ที่ข้อมูลของปัจจัย PHL_{empty} มีค่า Sig. (p-value) อยู่ที่ 0.067 ซึ่งค่านัยสำคัญนี้บอกเป็นนัยว่า ผู้ใช้งานเครื่องวัดความพรุนสามารถเลือกใช้ค่า PHL ของภาชนะบรรจุเปล่าใดๆ ในช่วง 60 – 180 s ได้โดยที่ไม่ทำให้ค่า APE (i.e., ความถูกต้องของผลการวัด) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. > 0.05) ในทำนองเดียวกัน ปัจจัยชนิดของตัวอย่างมีค่า Sig. อยู่ที่ 0.211 ซึ่งกล่าวได้ว่าปัจจัยชนิดของตัวอย่างทั้ง 4 ชนิดคือ ทรงกลมขนาดเล็ก, กลาง และใหญ่ และทรงกระบอกไม่ทำให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. > 0.05) ปัจจัยความดันเริ่มต้นให้ค่า Sig. = 0.000 ซึ่งหมายความว่า ความดันเริ่มต้นที่ระดับ 2,000 และ 3,000 Pa มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. < 0.05) สังเกตว่าผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปฏิสัมพันธ์ระหว่าง PHL_{empty} กับความดันเริ่มต้นมีค่า Sig. = 0.000 (Table 4) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเลือกใช้ค่า PHL_{empty} ใดๆ ในช่วง 60-180 s และความดันเริ่มต้นใดๆ ในช่วง 2,000 - 3,000 Pa มีอิทธิพลซึ่งกันและกันที่ส่งผลให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. < 0.05) ดังนั้น ค่าเฉลี่ยของคู่ปัจจัย PHL_{empty} กับความดันเริ่มต้นในแต่ละระดับถูกใช้เป็นตัวบ่งชี้ว่าระดับใดเหมาะสมในการวัดนั่นคือปัจจัย PHL_{empty} ที่ระดับ 60 s และความดันเริ่มต้นที่ระดับ 2,000 Pa ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.828% อย่างไรก็ตาม ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดของตัวอย่างกับ PHL_{empty} และระหว่างชนิดของตัวอย่างกับความดันเริ่มต้น มีค่า Sig. อยู่ที่ 0.161 และ 0.554 ตามลำดับ ซึ่งทำให้ไม่สามารถปฏิเสธสมมุติฐานหลักได้ (Sig. > 0.05) กล่าวคือ คู่ปัจจัยชนิดของตัวอย่างกับความดันและคู่ปัจจัยชนิดของตัวอย่างกับ PHL_{empty} ไม่มีอิทธิพลซึ่งกันและกันที่ส่งผลให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญอีกทั้งปฏิสัมพันธ์ของทั้ง 3 ปัจจัยแสดงให้เห็นว่าไม่มีอิทธิพลซึ่งกันและกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. > 0.05)

การเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดความพรุนที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นกับเครื่อง gas pycnometer ถูกวิเคราะห์ความแปรปรวนในลักษณะเดียวกันกับการเปรียบเทียบกับการวัดขนาดโดยตรง ซึ่งผลการวิเคราะห์ถูกแสดงอยู่ใน Table 5 สังเกตว่าปัจจัยหลัก PHL_{empty} และความดันเริ่มต้นมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Sig. < 0.05) อีกทั้งยังมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างคู่ปัจจัย PHL_{empty} กับความดันเริ่มต้นด้วยอย่างไรก็ตามปัจจัยชนิดของตัวอย่างและคู่ปัจจัยอื่น (i.e., sample × PHL_{empty}, sample × initial pressure และ PHL_{empty} × Initial pressure ×

Sample) ไม่สามารถปฏิเสธสมมุติฐานหลักได้ (Sig. > 0.05) ดังนั้น เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับใช้งานเครื่องวัดความพรุนคือ PHL_{empty} ที่ระดับ 120 s, ความดันเริ่มต้นที่ระดับ 3,000 Pa และตัวอย่างทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 – 6 mm ได้โดยที่ไม่ทำให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และคู่ปัจจัยทุกคู่ไม่มีอิทธิพลซึ่งกันและกันที่ส่งผลให้ความถูกต้องของผลการวัดแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

Table 4 Analysis of variance for the porosity measurements from the porosity measuring apparatus as compared with those from the dimensional measurement method.

Source	DF	Type III sum of squares	Mean square	F	Sig.
Main plot:					
PHLempty	2	5.413	2.707	3.420	0.067
Main plot error	12	9.507	0.792		
Sub plot:					
Initial pressure	1	19.722	19.722	125.410	0.000
PHLempty × Initial pressure	2	19.348	9.674	61.520	0.000
Sub plot error	12	1.887	0.157		
Sub-sub plot:					
Sample	3	28.149	9.383	2.030	0.211
Sample × PHLempty	6	65.253	10.876	2.350	0.161
Sample × Initial pressure	3	10.591	3.530	0.760	0.554
PHLempty × Initial pressure × Sample	6	27.713	4.619	1.000	0.500
Sub-sub plot error	72	335.295	4.656		
Total	119	522.878			

Table 5 Analysis of variance for the porosity measurements from the porosity measuring apparatus as compared with those from the gas pycnometer.

Source	DF	Type III sum of squares	Mean square	F	Sig.
Main plot:					
PHLempty	2	13.799	6.899	12.950	0.001
Main plot error	12				
Sub plot:					
Initial pressure	1	7.288	7.288	48.350	0.000
PHLempty × Initial pressure	2	18.804	9.402	62.380	0.000
Sub plot error	12				
Sub-sub plot:					
Sample	1	0.008	0.008	0.040	0.845
PHLempty × Sample	2	0.428	0.214	1.040	0.369
Initial pressure × Sample	1	0.063	0.063	0.310	0.585
PHLempty × Initial pressure × Sample	2	0.327	0.163	0.790	0.464
Sub-sub plot error	24	4.939	0.206		
Total	59	53.859			

ผลการวิเคราะห์ใน Table 4 และ 5 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยชนิดของตัวอย่าง ไม่มีผลกระทบต่อค่า APE ของเครื่องวัดความพรุนที่ถูกพัฒนาขึ้น แต่ปัจจัยความดันเริ่มต้นมีความแตกต่างกัน เครื่องวัดความพรุนในงานวิจัยนี้ถูกพัฒนาขึ้นจากชุดอุปกรณ์ต้นแบบของ อภิรัฐ (2557) และ (Chayaprasert et al. 2014) ซึ่งทุกขั้นตอนในการทดสอบความดันต้องถูกดำเนินการโดยใช้แรงงานคน (manual) นอกจากนี้ ชุดข้อมูลความดันที่ได้จากการทดสอบ P-t test จะต้องถูกประมวลผลหลังจากดำเนินการทดสอบเสร็จสิ้น (post processing) ด้วยโปรแกรมอื่น (e.g., MS Excel) เพื่อคำนวณหาค่า PHL และความพรุนดังนั้น เครื่องวัดความพรุนในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งสามารถทำการทดสอบ P-t test และคำนวณค่า PHL และความพรุนโดยอัตโนมัติ ทำให้ผู้ใช้งานมีความสะดวกเพิ่มมากขึ้นและได้ผลการวิเคราะห์ในเวลาที่สั้นลง อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาครั้งนี้ ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเป็นเพียงวัตถุรูปทรงเลขาคณิตเท่านั้นดังนั้น ควรมีการทดสอบเครื่องวัดความพรุนกับวัสดุที่หลากหลายขึ้นเช่น วัสดุเกษตร (e.g., ข้าวเปลือก, ข้าวโพด, ถั่วเขียว) และวัสดุก่อสร้าง (e.g., กรวด, ทราย, หิน) ต่อไป

4 สรุป

เครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยหลักการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดันถูกพัฒนาขึ้นเพื่อให้การทำงานและการประมวลผลเป็นแบบอัตโนมัติอีกทั้ง ความถูกต้องของการวัดต้องอยู่ระดับที่ยอมรับได้การประเมินผลกระทบต่อความถูกต้องของผลการวัดภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลัก คือ PHL_{empty}, ความดันเริ่มต้น และชนิดของวัสดุ

การทดลองแบบ split-split plot design ถูกเลือกใช้เป็นแผนการทดลองโดยมีระดับปัจจัยของปัจจัยหลักต่างๆ ดังนี้ PHL_{empty} มี 3 ระดับคือ 60, 120 และ 180 s, ความดันเริ่มต้นมี 2 ระดับคือ 2,000 และ 3,000 Pa และวัสดุรูปทรงเลขาคณิตมี 4 ชนิดคือ วัสดุทรงกลมขนาดเล็ก, กลาง และใหญ่ และวัสดุทรงกระบอกผลการวัดความพรุนของวัสดุทั้ง 4 ชนิด (ε_{mea}) ถูกเปรียบเทียบกับค่าความพรุนอ้างอิง (ε_{ref}) ซึ่งวัดได้จากวิธีการวัดขนาดโดยตรง หรือเครื่อง gas pycnometer การเปรียบเทียบเพื่อประเมินความถูกต้องของการวัดแสดงด้วยค่า APE

ความพรุนของวัสดุทั้ง 4 ชนิดอยู่ในช่วงประมาณ 40 – 60% ซึ่งสอดคล้องกับความพรุนของวัตถุทรงกลมทั่วไปที่ถูกบรรจุอยู่ในภาชนะทรงกระบอกผลการเปรียบเทียบกับวิธีการวัดขนาดโดยตรงและเครื่อง gas pycnometer ให้ค่า APE สูงสุดอยู่ที่ 4.44% ค่าความคลาดเคลื่อน (i.e., APE) ที่ได้แสดงให้เห็นว่าเครื่องวัดความพรุนให้ผลการวัดที่ถูกต้องในระดับเดียวกับงานวิจัยอื่นอีกทั้ง ความถูกต้องของผลการวัดถูกวิเคราะห์อีกว่าได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของระดับปัจจัยหลักที่สนใจอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ และปฏิสัมพันธ์ของแต่ละคู่ปัจจัยไม่มีผลกระทบต่อค่า APE อย่างมีนัยสำคัญการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ถูกใช้สำหรับประเมินผลกระทบดังกล่าวผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากการเปรียบเทียบผลการวัดของเครื่องวัดความพรุนที่พัฒนาขึ้นกับการวัดขนาดโดยตรงและเครื่อง gas pycnometer ถูกแสดงใน Table 4 และ 5 ตามลำดับปัจจัยหลักและความดันเริ่มต้นที่แนะนำสำหรับผู้ใช้งานเครื่องวัดความพรุนคือ 120 s และ 3,000 Pa และสามรถวัดตัวอย่างได้ทั้ง 4 ชนิด

5 กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปี 2560 โครงการวิจัย รหัส ป-ย(ด)114.60 เรื่อง การพัฒนาและทดสอบเครื่องวัดความพรุนที่ทำงานด้วยหลักการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร และฝ่ายเครื่องจักรกลเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับความอนุเคราะห์สถานที่, สาธารณูปโภค, อุปกรณ์การทดลอง และความอนุเคราะห์อื่นๆ

ขอขอบคุณฝ่ายวิจัยและพัฒนาการผลิตอุตสาหกรรมเซรามิก กรมวิทยาศาสตร์บริการ สำหรับความอนุเคราะห์การทดสอบวัดความหนาแน่นด้วยเครื่อง gas pycnometer

6 เอกสารอ้างอิง

สยาม แกมขุนทด, พานิช วุฒิพฤกษ์, สันชัย อินทพิชัย และ พิทยา แจ่มสว่าง 2558 ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำในดินลูกรังที่มีขนาดคละแตกต่างกัน.วารสาร-วิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 25 (1). 11-19

อภิรัฐ จันทลักษณ์ 2557: การพัฒนาวิธีการวัดความพรุนด้วยวิธีการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขาวิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร

Alan, R.H., Jong-Moon, K., Peihong, C., 2014. Accuracy of water displacement hand volumetry using an ethanol and water mixture. Aviation Space and Environmental Medicine 85, 187-190.

Alazmi, B., Vafai, K., 2004. Analysis of variable porosity, thermal dispersion, and local thermal nonequilibrium on free surface flows through porous media. Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme 126, 389-399.

Bradley, J., Nachtsheim, C.J., 2009. Split-Plot Designs: What,Why and How. Journal of Quality Technology 41, 340-361.

Burtseva, L., Salas, B.V., Werner, F., Petranovskii, V., 2015. Modeling of Monosized Sphere Packings into Cylinders. Univ., Fak. für Mathematik

Chayaprasert, W., Chantalak, A., Sukcharoen, A., 2014. Porosity Measurement of Granular Materials by

Comparisons of Air Pressure Decay Rates. Transactions of the Asabe 57, 1431-1440.

Dickerson, R.E., Gray, H.B., Haight, J.G.P., 1979. Gas laws and the kinetic theory. In *Chemical Principles*, 97-102. 2727 Sand Hill Road Menlo Park, California 94025: The Benjamin/Cummungs Publishing Company, Inc.

Encyclopædia Britannica, 2016. Archimedes' principle. Encyclopædia Britannica Inc. Available at: http://global.britannica.com/science/Archimedes-principle. Accessed 29 February 2016.

Gardner, R.C., 2004. Split-plot Factorial Multivariate Analysis of Variance. *in* Department of Psychology, T.U.o.W.O., ed., London, Ontario N6A 5C2.

Glover, P., 2001. Porosity. In *MSc Petroluem Geology*, 43-53. University of Aberdeen, UK: Department of Geology and Petroleum Geology.

Hintz, W., Antonyuk, S., Schubert, W., Ebenau, B., Haack, A., Tomas, J., 2008. Determination of Physical Properties of Fine Particles, Nanoparticles and Particle Beds. In *Modern Drying Technology*, 279-361. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

Hyndman, R.J., Koehler, A.B., 2006. Another look at measures of forecast accuracy. International Journal of Forecasting 22, 679-688.

Iraguen, V., Guesalaga, A., Agosin, E., 2006. A portable non-destructive volume meter for wine grape clusters. Measurement Science and Technology 17, N92-N96.

Leclaire, P., Umnova, O., Horoshenkov, K.V., Maillet, L., 2003. Porosity measurement by comparison of air volumes. Review of Scientific Instruments 74, 1366-1370.

Makridakis, S., Hibon, M., 1995. Evaluating Accuracy (or Error) Measures. Fontainebleau, France: INSEAD - Technology Management.

Micromeritics Instrument Corp., 2001. AccuPyc TM1330 Pycnometer.

Nithiarasu, P., Seetharamu, K.N., Sundararajan, T., 1996. Natural convective heat transfer in a fluid saturated variable porosity medium. Pergamon 40, 3955-3967.

Zhang, W., Thompson, K.E., Reed, A.H., Beenken, L., 2006. Relationship between packing structure and porosity in fixed beds of equilateral cylindrical particles. Chemical Engineering Science 61, 8060-8074.