

การวัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดันภายใต้สภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

*วัชรพล ชยประเสริฐ¹, อภิรัฐ จันทลักษณ์¹ และ เอนก สุขเจริญ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

¹ หมู่ 6 ถนนมาลัยแมน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² ฝ่ายเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

1 หมู่ 6 ถนนมาลัยแมน ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

ติดต่อผู้เขียน: วัชรพล ชยประเสริฐ E-mail: fengwpc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

วิธีการวัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดันใช้หลักการของการทดสอบความดัน ซึ่งเป็นหลักการที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่ ณ ปัจจุบัน การทดสอบความดันทำได้โดยการอัดอากาศเข้าสู่ภาชนะบรรจุวัสดุทดสอบทำให้ความดันภายในมีค่าสูงกว่าสภาวะบรรยากาศภายนอกที่ค่าเริ่มต้นค่าหนึ่ง จากนั้นหยุดการอัดอากาศแล้วปล่อยให้อากาศภายในรั่วไหลออก ค่าความพรุนของวัสดุทดสอบสามารถถูกคำนวณได้จากค่าคงที่ pressure half-life (PHL) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ความดันภายในภาชนะลดลงครึ่งหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ในการพิสูจน์สมการทางทฤษฎีของวิธีดังกล่าว ความหนาแน่นอากาศภายในภาชนะบรรจุวัสดุทดสอบถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริงความหนาแน่นอากาศเปลี่ยนแปลงตามสภาวะบรรยากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ชุดอุปกรณ์วัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดัน ถูกใช้เพื่อประเมินความถูกต้องของการวัดความพรุนภายใต้สภาวะอุณหภูมิของภาชนะบรรจุวัสดุทดสอบเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ที่ ~ 0.15 และ $\sim 0.23^\circ\text{C}/\text{min}$ ภาชนะบรรจุวัสดุทดสอบเป็นขวดโลหะทรงกระบอกปริมาตร 1,753.00 ml วัสดุทดสอบเป็นวัสดุทรงกลมตันขนาดเล็ก, กลาง และใหญ่ และทรงกระบอก ปริมาตรต่อชิ้นเท่ากับ 6.87×10^{-3} , 110.04×10^{-3} และ 28.42 และ 46.79 ml ตามลำดับ ค่าความพรุนอ้างอิงถูกคำนวณจากปริมาตรของภาชนะและวัสดุทดสอบซึ่งผู้วิจัยทราบค่าที่แน่นอนจากการวัดขนาด ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของขวดทดสอบมีผลต่อความถูกต้องของการวัดอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออุณหภูมิของภาชนะบรรจุวัสดุทดสอบมีการเปลี่ยนแปลงที่อัตราสูงขึ้น ความดันภายในภาชนะในระหว่างการทดสอบความดันจะลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าค่าที่ควรจะเป็น ซึ่งส่งผลให้ค่า PHL เพิ่มขึ้นจากปกติและผลการวัดความพรุนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ~ 0.15 และ $\sim 0.23^\circ\text{C}/\text{min}$ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.36–15.37 และ 8.41–33.02% ตามลำดับ ดังนั้น อุณหภูมิของภาชนะบรรจุวัสดุทดสอบจำเป็นต้องถูกควบคุมให้คงที่ในระหว่างการวัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดัน

คำสำคัญ: ความพรุน, การทดสอบความดัน, การลดลงของความดัน, ค่าครึ่งชีวิตความดัน

1. บทนำ

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

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

โดยที่ V_s คือ ปริมาตรเนื้อของแข็ง (solid volume) ในวัสดุพรุน การวัดปริมาตรของแข็งหรือปริมาตรช่องว่างของวัสดุพรุนเป็นขั้นตอนสำคัญในการหาค่าความพรุน วิธีการใช้การขยายตัวของก๊าซ (gas expansion) โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า gas pycnometer เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง วิธีนี้มีพื้นฐานอยู่บนกฎของก๊าซในอุดมคติ (ideal gas law) หรือถ้าจะกล่าวให้จำเพาะเจาะจงคือ กฎของบอยล์ (Boyle's law)

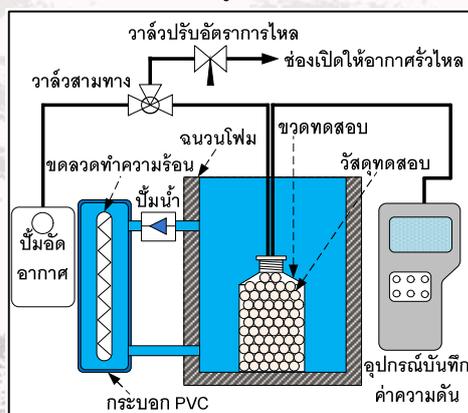
$$PV = nRT \quad \dots(2)$$

โดยที่ P คือ ความดันของระบบและมีปริมาตรเป็น V, n คือ จำนวนโมลของก๊าซและมี T เป็นอุณหภูมิ ณ ขณะนั้น วิธีการใช้การขยายตัวของก๊าซได้รับการพัฒนาทั้งทางด้านอุปกรณ์และเทคโนโลยีวิธีการจากนักวิจัยหลายกลุ่ม [1-6]

การทดสอบความดัน (pressurization test) เป็นวิธีมาตรฐานในการทดสอบความมิดชิด (air-tightness) ของโครงสร้างปิด (closed envelope) เพื่อการออกแบบและวิเคราะห์ระบบปรับอากาศในอาคาร [7] หรือเพื่อทดสอบความสามารถในการเก็บกักก๊าซของโครงสร้างการรมยาในการรมยากำจัดศัตรูผลผลิตเกษตร (fumigation) [8, 9] Chayaprasert et al. [10] ได้เสนอแนะวิธีการวัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดัน วิธีดังกล่าวใช้หลักการของการทดสอบความดัน ซึ่งเป็นหลักการที่แตกต่างจากวิธีอื่นๆ ที่มีอยู่ ณ ปัจจุบัน นอกจากแสดงผลการทดลองวัดความพรุนที่ถูกต้องแล้ว นักวิจัยกลุ่มดังกล่าวใช้การพิสูจน์สมการทางทฤษฎีแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรช่องว่างในโครงสร้างปิดและอัตราการลดลงของความดันในขณะที่อากาศรั่วไหลออกจากโครงสร้างปิด อย่างไรก็ตาม ในการพิสูจน์สมการ ความหนาแน่นอากาศภายในขณะบรรจุวัสดุทดสอบถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริงความหนาแน่นอากาศเปลี่ยนแปลงตามสภาวะบรรยากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิบรรยากาศในงานวิจัยนี้ ชุดอุปกรณ์วัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดันของ Chayaprasert et al. [10] ถูกใช้เพื่อประเมินความถูกต้องของการวัดความพรุนภายใต้สภาวะอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ในงานวิจัยนี้ ชุดควบคุมอุณหภูมิถูกติดตั้งเข้ากับ ชุดอุปกรณ์วัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดันของ Chayaprasert et al. [10] (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์วัดความพรุนโดยการเปรียบเทียบอัตราการลดลงของความดัน

ชุดอุปกรณ์วัดความพรุนมีส่วนประกอบหลักคือ ชุดทดสอบซึ่งเป็นชุดโลหะทรงกระบอกปริมาตร 1,753.00 ml มีฝาปิดได้สนิท, อุปกรณ์บันทึกค่าความดัน (Climomaster Model 6531, Kanomax Japan Inc., Osaka, Japan), ปั้มอัดอากาศไฟฟ้า (ACO-9905, Guangdong Hailea Group Inc., Guangdong, China), และวาล์วปรับอัตราการไหล (AS 1200, SMC (Thailand) Ltd., Pathum Thani, Thailand) วาล์วปรับอัตราการไหลและปั้มอัดอากาศถูกเชื่อมต่อกับชุดทดสอบผ่านวาล์ว 3 ทาง และชุดทดสอบถูกเชื่อมต่อกับอุปกรณ์บันทึกค่าความดันอีกต่อหนึ่ง การเชื่อมต่อทั้งหมดใช้ท่อลม PE (polyethylene) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 4 mm ชุดทดสอบถูกวางอยู่ในอ่างน้ำหุ้มด้วยฉนวนโฟม ปริมาตรประมาณ 20 l ชุดควบคุมอุณหภูมิมีส่วนประกอบคือ ปั้มน้ำไฟฟ้า (manufacturer unknown), กระบอก PVC ภายในบรรจุชุดลดทำความร้อนไฟฟ้า (manufacturer unknown) ขนาด 300 W น้ำในอ่างใส่น้ำจะถูกดูดส่งผ่านชุดลดทำความร้อนและปล่อยกลับเข้าสู่อ่างใส่น้ำ ปั้มน้ำและชุดลดทำความร้อนถูกเปิดใช้งานตลอดการทดลอง เพื่อให้อุณหภูมิในอ่างใส่น้ำเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

การทดสอบความดันทำได้โดยการอัดอากาศเข้าสู่ชุดทดสอบทำให้ความดันภายในมีค่าสูงกว่าสภาวะบรรยากาศภายนอกที่ค่าเริ่มต้นค่าหนึ่ง จากนั้นหยุดการอัดอากาศแล้วปล่อยให้อากาศภายในรั่วออกผ่าน "ช่องเปิดให้อากาศรั่วไหล" (รูปที่ 1) การลดลงของความดันจะถูกอธิบายได้โดยสมการต่อไปนี้ [10]

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

โดยที่ p_t คือ ความดันภายในชุดทดสอบที่เวลา t (s) ใดๆ (Pa), p_i คือ ค่าความดันเริ่มต้น (Pa) และ PHL คือ ค่าคงที่ pressure half-life หรือค่าครึ่งชีวิตความดัน ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ความดันภายในชุดทดสอบลดลงครึ่งหนึ่ง (s) การวัดความพรุนของวัสดุโดยใช้อัตราการลดลงของความดัน ทำได้โดยทำการทดสอบความดันกับชุดทดสอบจำนวน 2 ครั้ง โดยมีเงื่อนไขการทดสอบดังต่อไปนี้ (1) คุณสมบัติต่างๆ ของช่องเปิดไม่เปลี่ยนแปลง (2) การทดสอบทั้ง 2 ครั้ง เริ่มต้นที่ความดันคงที่เท่ากัน (3) ในการทดสอบครั้งที่ 1 ชุดทดสอบไม่มีวัสดุใดๆ อยู่ภายใน แต่ในการทดสอบครั้งที่ 2 ชุดทดสอบมีวัสดุทดสอบบรรจุอยู่ภายใน

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรช่องว่างภายในชุดทดสอบในการทดสอบครั้งที่ 1, V_1 , และ 2, V_2 , จะอยู่ในรูปของ

สมการที่ 4 ปริมาตรเนื้อของแข็ง, V_s , ของวัสดุทดสอบภายใน
 ขวดทดสอบสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 และค่าความ
 พรุณสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 6 การพิสูจน์ที่มาของ
 สมการทั้งสามถูกแสดงไว้โดย Chayaprasert et al. [10] ซึ่ง
 กำหนดให้ความหนาแน่นอากาศภายในขวดทดสอบไม่
 เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิแวดล้อม

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

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

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

แผนการทดลองถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 1 วัสดุที่ใช้ในการ
 ทดลองเป็นวัสดุทดสอบมาตรฐานซึ่งเป็นทรงกลมตันขนาด
 เล็ก, กลาง และใหญ่ ซึ่งผลิตจากเหล็กกล้า, เซรามิก และ
 พลาสติก ตามลำดับ และทรงกระบอกซึ่งผลิตจากเรซิน
 ปริมาตรเฉลี่ยของวัสดุทดสอบทรงกลม 1 ชิ้น ขนาดเล็ก,
 กลาง และใหญ่ คือ $6.87 \times 10^{-3} (\pm 1.03 \times 10^{-5})$, 110.04×10^{-3}
 $(\pm 5.13 \times 10^{-5})$ และ $28.42 (\pm 0.03)$ ml ตามลำดับ ซึ่งถูก
 คำนวณจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยที่วัดจากวัสดุทดสอบ
 จำนวน 1,000, 400 และ 27 ชิ้น ตามลำดับ โดยใช้ไมโคร-
 มิเตอร์ความละเอียด 0.001 mm (micrometer, Mitutoyo
 Corp., Kawasaki, Japan) ปริมาตรเฉลี่ยของวัสดุทรง-
 กระบอก 1 ชิ้น เท่ากับ $46.79 (\varepsilon \pm 0.86)$ ml ซึ่งถูกคำนวณ
 จากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความยาวเฉลี่ยที่วัดจากวัสดุ
 ทรงกระบอก จำนวน 15 ชิ้น โดยใช้เวอร์เนียความละเอียด
 0.05 mm (vernier caliper, Mitutoyo Corp., Kawasaki,
 Japan) สังเกตว่าจำนวนชิ้นของวัสดุทดสอบในตารางที่ 1 จะ
 บรรลุได้เกือบเต็มขวดทดสอบและผู้วิจัยใช้แรงงานคนนับวัสดุ
 ทดสอบให้ได้จำนวนชิ้นตามแผนการทดลองสำหรับการ
 ทดลองกับวัสดุแต่ละขนาด อุณหภูมิในอ่างใส่น้ำถูก
 ควบคุมให้เปลี่ยนแปลงด้วยอัตราการคงที่ตลอดระยะเวลาการ
 ทดลองที่ 2 ระดับคือ ~ 0.15 และ $\sim 0.23^\circ\text{C}/\text{min}$ (i.e., 8
 เจ็อนไซการทดลอง) ที่แต่ละเงื่อนไขการทดลอง ทำการวัด
 ความพรุณ 3 ซ้ำ ในการวัดความพรุณแต่ละซ้ำ ชุดอุปกรณ์ใน
 รูปที่ 1 ถูกใช้ทำการทดสอบความดัน 2 ครั้ง ในการทดสอบ
 ครั้งที่ 1 ขวดทดสอบวางเปล่า แต่ในการทดสอบครั้งที่ 2 ขวด
 ทดสอบมีวัสดุทดสอบอยู่ภายในตามชนิดและจำนวนที่
 กำหนดก่อนเริ่มต้นการทดสอบความดันแต่ละครั้ง ผู้วิจัยปรับ
 ให้อุณหภูมิในอ่างต่ำกว่า 27°C และเริ่มเพิ่มอุณหภูมิใน
 โดยเปิดปั้มน้ำและขดลวดทำความร้อนอุณหภูมิในอ่างจะถูก

บันทึกทุกๆ 1 s และเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 27°C ผู้วิจัยจึงเริ่มทำ
 การทดสอบความดัน ก่อนการทดสอบความดันทุกครั้ง ขวด
 ทดสอบถูกวางทิ้งไว้ในอ่างเป็นเวลา 5–10 min ซึ่งไม่เพียง
 พอที่จะปรับอุณหภูมิของวัสดุและอากาศภายในขวดทดสอบ
 ให้เท่ากับอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำดังนั้นอุณหภูมิอากาศภายใน
 ขวดจะแตกต่างจากอุณหภูมิในอ่างเล็กน้อย

ตารางที่ 1 ชนิดและจำนวนของวัสดุทดสอบที่ถูกใช้ในการ
 ทดลอง

ชนิดของวัสดุทดสอบ	จำนวน (ชิ้น)
ทรงกลมพลาสติกขนาดใหญ่	27
ทรงกลมเซรามิกขนาดกลาง	7,500
ทรงกลมเหล็กกล้าขนาดเล็ก	144,000
ทรงกระบอกเรซิน	15
ชนิดของวัสดุทดสอบ	จำนวน (ชิ้น)
ทรงกลมพลาสติกขนาดใหญ่	27
ทรงกลมเซรามิกขนาดกลาง	7,500
ทรงกลมเหล็กกล้าขนาดเล็ก	144,000
ทรงกระบอกเรซิน	15

การทดสอบความดันแต่ละครั้ง เริ่มต้นจากการอัดอากาศ
 เข้าสู่ขวดทดสอบ จนกระทั่งความดันภายในขวดมีค่าสูงกว่า
 $3,000$ Pa เล็กน้อย จากนั้น ปล่อยให้อากาศภายในรั่วออก
 จากขวดผ่านวาล์วปรับอัตราการไหล ซึ่งช่องเปิดถูกปรับตั้งให้
 มีขนาดคงที่ตลอดการวิจัยครั้งนี้ ในระหว่างที่อากาศรั่วออก
 ความดันภายในขวดถูกบันทึกค่าไว้ทุกๆ 1 s และเมื่อความ
 ดันลดลงต่ำกว่า 500 Pa จึงหยุดการบันทึกค่า ค่าความดันที่
 ถูกบันทึกไว้จะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งซึ่งมีค่าความดันลดลง
 อย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป (pressure decay curve) ซึ่ง
 จะถูกหาค่า PHL โดยทำการปรับเส้นโค้ง (curve fitting) โดย
 ใช้สมการที่ 3 ค่า PHL ที่ได้จะถูกใช้ในการคำนวณค่าความ
 พรุณด้วยสมการที่ 6 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (% error)
 ของการวัดความพรุณโดยใช้อัตราการลดลงของความดันจะ
 ถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 7

$$\% \text{ error} = \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_a}{\varepsilon_r} \times 100 \quad \dots(7)$$

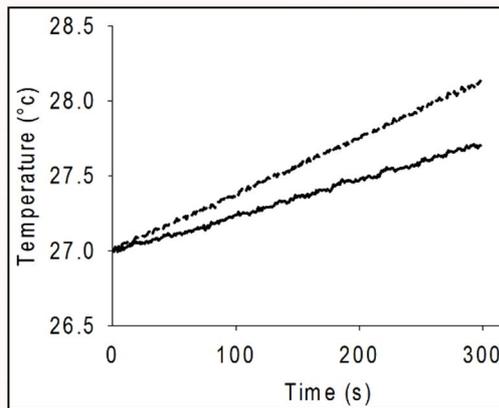
โดยที่ ε_r คือ ความพรุณอ้างอิง (reference porosity) ซึ่ง
 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และ ε_a คือ ความพรุณ
 ค่าเฉลี่ยจากการวัดโดยใช้อัตราการลดลงของความดันทั้ง 3
 ซ้ำในการคำนวณความพรุณอ้างอิง กำหนดปริมาตรรวมของ
 วัสดุพรุณ, V_t , คือ ปริมาตรของขวดทดสอบ (i.e., $1,753.00$
 ml) และปริมาตรเนื้อของแข็งของวัสดุทดสอบ, V_s , คำนวณ
 ได้จากสมการที่ 8

$$V_s = V_m \times N \quad \dots(8)$$

โดยที่ V_m คือ ปริมาตรเฉลี่ยของวัสดุทดสอบมาตรฐาน 1 ชิ้น
 ที่ได้จากการวัดขนาด (ml) และ N คือ จำนวนชิ้นของวัสดุ
 ทดสอบที่อยู่ในเขตทดสอบ (ชิ้น)

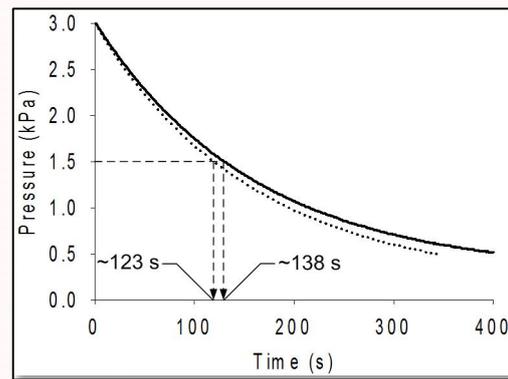
3. ผลการทดลองและวิจารณ์

รูปที่ 2 แสดงตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิน้ำรอบๆ เขต
 ทดสอบ ที่ถูกควบคุมให้เปลี่ยนแปลงที่ $\sim 0.15 (\pm 0.02)$ และ
 $\sim 0.23 (\pm 0.02)^\circ\text{C}/\text{min}$ อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิทั้ง 2
 ค่านี้เป็นค่าเฉลี่ยของความชัน (slope) ของข้อมูลอุณหภูมิน้ำ
 จากการทดสอบความดันทุกซ้ำของทุกเงื่อนไขการทดลอง

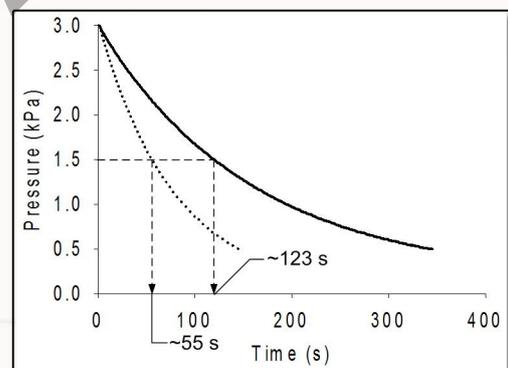
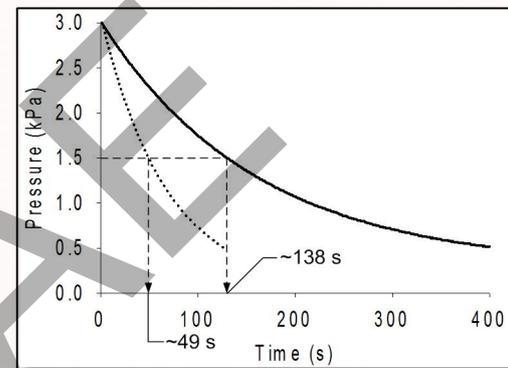


รูปที่ 2 ตัวอย่างข้อมูลอุณหภูมิน้ำรอบๆ เขตทดสอบ ที่ถูกควบคุมให้
 เปลี่ยนแปลงที่ ~ 0.15 (เส้นทึบ) และ ~ 0.23 (เส้นประ)
 $^\circ\text{C}/\text{min}$

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบความดันกับเขต
 ทดสอบเปล่า เส้นโค้งแต่ละเส้นได้จากการทดสอบความดัน 1
 ซ้ำ ที่มีการควบคุมอุณหภูมิน้ำรอบๆ เขตให้มีการเปลี่ยน-
 แปลงคงที่อย่างต่อเนื่องที่ ~ 0.15 และ $\sim 0.23^\circ\text{C}/\text{min}$ ซึ่งมีค่า
 PHL เท่ากับ 122.70 และ 137.70 s ตามลำดับ สังเกตว่า
 เขตทดสอบเปล่าที่ถูกควบคุมให้อุณหภูมิคงที่มีค่า PHL
 ประมาณ 115 s [10] (data not shown) ค่า r^2 ของการ
 ปรับเส้นโค้งทั้ง 2 เส้น มีค่าไม่น้อยกว่า 0.992 ถึงแม้ว่าการ
 ทดสอบความดันทั้ง 2 ครั้งนี้จะถูกทดสอบที่ช่องเปิดมีขนาด
 ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูงขึ้น ค่า
 PHL ของเส้นโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด



รูปที่ 3 ตัวอย่างผลการทดสอบความดันกับเขตทดสอบเปล่า ที่
 อุณหภูมิน้ำรอบๆ เขตมีการเปลี่ยนแปลงที่อย่างต่อเนื่องที่
 ~ 0.15 (เส้นจุด) และ ~ 0.23 (เส้นทึบ) $^\circ\text{C}/\text{min}$



รูปที่ 4 ตัวอย่างผลการทดสอบความดันกับเขตทดสอบเปล่า (เส้น
 ทึบ) เปรียบเทียบกับเขตที่มีวัสดุทรงกลมขนาดกลางอยู่
 ภายใน (เส้นจุด) และอุณหภูมิน้ำรอบๆ เขตเปลี่ยนแปลงคงที่
 อย่างต่อเนื่องที่ ~ 0.15 (บน) และ $\sim 0.23^\circ\text{C}/\text{min}$ (ล่าง)

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างผลการทดสอบความดันกับเขต
 ทดสอบเปล่า เปรียบเทียบกับเขตที่มีวัสดุทรงกลมขนาด
 กลางอยู่ภายใน เส้นโค้งแต่ละเส้นได้จากการทดสอบความดัน
 1 ซ้ำ รูปที่ 4 บนและ 4 ล่าง เป็นผลการทดสอบความดัน เมื่อ
 อุณหภูมิน้ำรอบๆ เขตเปลี่ยนแปลงคงที่อย่างต่อเนื่องที่
 ~ 0.15 และ $\sim 0.23^\circ\text{C}/\text{min}$ ตามลำดับ ซึ่งเส้นโค้งจากการ
 ทดสอบความดันกับเขตที่มีวัสดุ (เส้นจุด) มีค่า PHL เท่ากับ

55.13 และ 48.61 s ตามลำดับ สังเกตว่า เส้นทึบในรูปที่ 4 บน และ 4ล่าง เป็นเส้นเดียวกับเส้นโค้งการลดของความดัน ในรูปที่ 3 ค่าความพรุนซึ่งถูกคำนวณจากค่า PHL ของเส้นโค้งในรูปที่ 4บน และ 4ล่าง มีค่าเท่ากับ 41.06 และ 34.82% ตามลำดับ ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 14.47 และ 34.20% ตามลำดับ

ผลการวัดค่าความพรุนและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ทุกเงื่อนไขการทดลองถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 2 เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้การวัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดัน มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงขึ้นตามไปด้วย ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ~ 0.15 และ $\sim 0.23^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.36–15.37 และ 8.41–33.02% ตามลำดับ เมื่ออุณหภูมิขจัดทดสอบเปล่ามีการเปลี่ยนแปลงที่อัตราสูงขึ้น ความดันภายในภาชนะในระหว่างการทดสอบ

ความดันจะลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าค่าที่ควรจะเป็นเสมอ (i.e., ค่า PHL เพิ่มขึ้นจากปกติ) (รูปที่ 3)

การเพิ่มขึ้นของค่า PHL อย่างผิดปกติดังกล่าว ส่งผลให้ผลลัพธ์การคำนวณค่าความพรุนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยคาดว่าค่าการที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของวัสดุทดสอบแต่ละชนิดที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเดียวกันมีค่าแตกต่างกัน (ตารางที่ 2) มีสาเหตุจากความแตกต่างของชนิดของวัสดุที่ใช้ผลิตวัสดุทดสอบซึ่งมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนความร้อนในอัตราที่ต่างกัน นอกจากนี้ ก่อนการทดสอบความดันแต่ละครั้ง ขวดทดสอบถูกวางทิ้งไว้ในอ่างใส่น้ำเป็นเวลาแตกต่างกัน ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นของวัสดุทดสอบแตกต่างกันและส่งผลกระทบต่อค่า PHL สำหรับขวดที่มีวัสดุทดสอบอยู่ภายในอาจมีค่าลดลง ในขณะที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น (รูปที่ 4)

ตารางที่ 2 ตารางเปรียบเทียบผลการวัดค่าความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดันกับวิธีอ้างอิง (สมการที่ 1 และ 8)

ชนิดของวัสดุทดสอบ	ϵ_r (%) mean [SD]	อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)			
		~ 0.15		~ 0.23	
		ϵ_a (%) mean [SD]	% error	ϵ_a (%) mean [SD]	% error
ทรงกลมขนาดใหญ่	54.89 [0.05]	54.90 [0.66]	2.36	49.53 [0.57]	11.91
ทรงกลมขนาดกลาง	49.28 [0.02]	44.79 [0.48]	15.37	35.44 [0.46]	33.02
ทรงกลมขนาดเล็ก	43.57 [0.02]	39.97 [0.92]	8.10	39.69 [0.45]	8.74
ทรงกระบอก	60.02 [0.19]	57.18 [0.65]	4.67	52.28 [0.43]	12.84

Chayaprasert et al. [10] ทำการวัดความพรุนโดยรักษาให้อุณหภูมิของขวดทดสอบคงที่ตลอดเวลาด้วยการหุ้มฉนวนให้กับขวด ซึ่งให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการวัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดันในช่วง $\pm 5\%$ ในงานวิจัยนี้ เมื่ออุณหภูมิของขวดทดสอบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการวัดความพรุนมีค่าอยู่นอกช่วง $\pm 5\%$ เกือบทั้งหมด ดังนั้น อุณหภูมิของขวดทดสอบจำเป็นต้องถูกควบคุมให้คงที่ในระหว่างการวัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดัน

4. สรุป

ในการพิสูจน์สมการทางทฤษฎีของการวัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดัน ความหนาแน่นอากาศภายในขวดทดสอบถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ แต่ในความเป็นจริง ความหนาแน่นอากาศเปลี่ยนแปลงตามสภาวะบรรยากาศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิ ในงานวิจัยนี้ ชุดอุปกรณ์วัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดันของ Chaya-prasert et al. [10] ถูกใช้เพื่อประเมินความถูกต้องของการวัดความ

พรุนภายใต้สภาวะอุณหภูมิขจัดทดสอบเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ ~ 0.15 และ $\sim 0.23^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของขวดทดสอบมีผลต่อความถูกต้องของการวัดอย่างเห็นได้ชัด เมื่ออุณหภูมิขจัดทดสอบเปล่ามีการเปลี่ยนแปลงที่อัตราสูงขึ้น ความดันภายในภาชนะในระหว่างการทดสอบความดันจะลดลงด้วยอัตราที่ช้ากว่าค่าที่ควรจะเป็นเสมอ ซึ่งส่งผลให้ค่า PHL เพิ่มขึ้นจากปกติ และผลการวัดความพรุนมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ~ 0.15 และ $\sim 0.23^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 2.36–15.37 และ 8.41–33.02% ตามลำดับ ดังนั้น อุณหภูมิของขวดทดสอบจำเป็นต้องถูกควบคุมให้คงที่ในระหว่างการวัดความพรุนโดยใช้อัตราการลดลงของความดัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน รหัสโครงการ วศ.กพส 10/2557 ผู้วิจัยขอขอบคุณภาคีวิชา

วิศวกรรมเกษตร และฝ่ายเครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สำหรับ ความอนุเคราะห์สถานที่, สาธารณูปโภค, อุปกรณ์การทดลอง และความอนุเคราะห์อื่นๆ

by comparisons of air pressure decay rates, Transactions of the ASABE, 57(5), 2014, pp. 1431-1440.

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Salissou, Y. and Panneton, R. (2007). Pressure/-mass method to measure open porosity of porous solids, Journal of Applied Physics, 101, 2007, pp. 124913-1-124913-7.
- [2] Leclaire, P., Umnova, O., Horoshenkov, K.V. and Maillot, L. (2003). Porosity measurement by comparison of air volumes, Review of Scientific Instruments, 74(3), 2003, pp. 1366-1370.
Tamarí, S. (2004). Optimum design of the constant-volume gas pycnometer for determining the volume of solid particles, Measurement Science and Technology, 15(3), 2004, pp. 549-558.
- [3] Tamarí, S. and Aguilar-Chávez, A. (2004). Optimum design of the variable-volume gas pycnometer for determining the volume of solid particles, Measurement Science and Technology, 15, 2004, pp. 1146-1152.
- [4] Washburn, E.W. and Bunting, E.N. (1922). Porosity: VI. Determination of porosity by the method of gas expansion, Journal of the American Ceramic Society, 5(2), 1922, pp. 112-130.
- [5] Champoux, Y., Stinson, M.R. and Daigle, G.A. (1991). Air-based system for the measurement of porosity, Journal of the Acoustical Society of America, 89(2), 1991, pp. 910-916.
- [6] ASHRAE, ASHRAE Handbook - Fundamentals. 2001, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
- [7] Bond, E.J., ed. Manual of fumigation for insect control. FAO Plant Production and Protection Papers - 54. 1984, Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome.
- [8] Anonymous, Sealed grain-storage silos - sealing requirements for insect control. Australian Standard(r). 2010, Sydney: Standards Australia.
- [9] Chayaprasert, W., Chantalak, A. and Sukcharoen, A. (2014). Porosity measurement of granular materials