

การศึกษาเชิงทดลองการกระจายความร้อนและการซึมผ่านของน้ำร้อนในวัสดุพรุน (เปรียบเทียบชั้นอนุภาคแบบ F-C กับแบบ F-bed และ C-bed)

Experimental Study of Heat Distribution and Hot Water Infiltration in Porous Media (Compared F-C bed with F-bed and C-bed)

ฐิติพันธ์ สมถวิล และ สมศักดิ์ วงษ์ประดับไชย

Thitipan Somtawin and Somsak Vongpradubchai

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงทดลองการกระจายความร้อนและการซึมผ่านของน้ำร้อนแบบ 1 มิติ ในวัสดุพรุนแบบไม่อัดตัวที่ประกอบด้วยอนุภาคต่างกัน โดยศึกษาถึงอิทธิพลของฟลักซ์น้ำป้อน และอุณหภูมิน้ำป้อน ที่มีต่อการซึมผ่านน้ำในชั้นอนุภาค ซึ่งใช้เม็ดแก้วที่มีส่วนผสมของโซเดียม ไฮดรอกไซด์และแคลเซียม ไฮดรอกไซด์ซึ่งมีคุณสมบัติทางความร้อนและขนาดคงที่ 0.15 และ 0.4 มม. (แบบละเอียดและหยาบ) โดยจัดเรียงชั้นอนุภาค 3 แบบคือ 1. จัดเรียง 2 ชั้นให้ชั้นอนุภาคละเอียดอยู่ด้านบนชั้นอนุภาคขนาดใหญ่อยู่ด้านล่าง อัตราส่วน 50:50 (F-C) 2. จัดเรียงอนุภาคแบบชั้นเดี่ยวอนุภาคละเอียด (F) 3. จัดเรียงอนุภาคชั้นเดี่ยวอนุภาคหยาบ (C) ใช้ขนาดฟลักซ์น้ำป้อน 0.1 และ 0.2 กก./ตร.ม.-วินาที และอุณหภูมิน้ำป้อน 45 °ซ. และ 55 °ซ. ผลการทดลองที่เกิดขึ้นสรุปได้ว่าชั้นอนุภาคแบบ F-C ทำให้การซึมผ่านของน้ำเกิดขึ้นช้าลงเมื่อเปรียบเทียบกับชั้นอนุภาคแบบ F และแบบ C

คำสำคัญ : การซึมผ่านของน้ำ ความอัดตัว วัสดุพรุน

Abstract

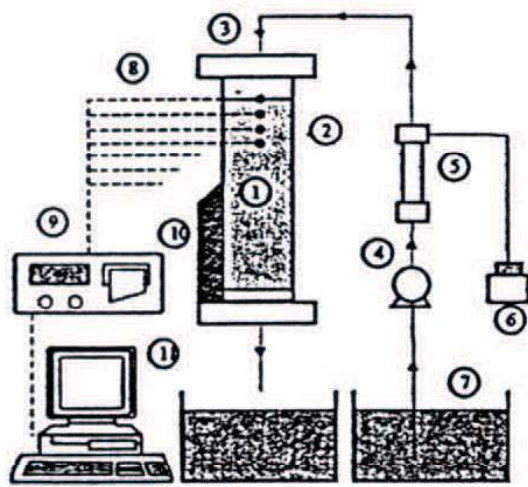
The experimental study of heat distribution and water infiltration in granular packed bed due to flux and temperature of supplied water. The study is one dimension in vertical granular packed bed column. Glass beads which is the composition of sodium hydroxide and calcium hydroxide with same thermal properties were used. Two constant particle sizes 0.15 mm and 0.4 mm (fine and coarse) . Three types of granular packed bed were prepared; 1) two layers, F-C packed bed, upper fine particle and lower coarse particle with 50: 50 ratio, 2) F packed bed, single fine particle layer and 3) C packed bed, single coarse particle layer. Water were supplied at flux 0.1 kg/m² - s and 0.2 kg/m²-s with water temperature 55 °C and 45 °C. The results showed that lower water infiltration occurred in the F-C packed bed compared to F and C packed bed

Keywords : water infiltration, saturation, porous media

1. บทนำ

การซึมผ่านของน้ำเป็นเรื่องสำคัญและจำเป็นมากสำหรับศาสตร์หลายแขนงทั้งทางด้าน ชลศาสตร์ ธรณีวิทยา การเกษตร วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเคมี ซึ่งตามธรรมชาติโดยทั่วไปมีทั้งวัสดุที่มีอนุภาคชั้นเดียว และวัสดุที่ประกอบด้วยอนุภาคหลายชั้น

ในช่วงไม่กี่สิบปีที่ผ่านมาการซึมผ่านของน้ำเป็นเรื่องที่มีนักวิจัยหลายๆท่านทำการศึกษา [1-18] Abriola และ Pinder [1] ทำการสร้างแบบจำลองของวัสดุพรุนโดยเป็นวัสดุพรุนที่เป็นส่วนประกอบของอานิก โดยให้ความสำคัญกับการจัดเรียงโครงสร้างของวัสดุพรุน แรงดันของของไหลและองค์ประกอบต่างๆ ที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของของไหลในวัสดุพรุน เช่น ความดันคาพิลลารี การกระจายของของไหลในวัสดุพรุน เฟสของสสารที่เกิดขึ้นในวัสดุพรุน Stauffer และ Dracos [2] ทำการทดลองและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การซึมผ่านของน้ำและสารละลายในวัสดุพรุน นอกจากนี้ แบบจำลองเกี่ยวกับการซึมผ่านของน้ำถูกพัฒนา



- | | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| (1) ชั้นวัสดุพรุน | (7) ภาชนะใส่น้ำป้อน |
| (2) กระจกทดสอบ | (8) เทอร์โมคัปเปิล |
| (3) อุปกรณ์กระจายน้ำ | (9) ตัวบันทึกข้อมูล (Data logger) |
| (4) ปั๊ม | (10) ฉนวนความร้อน |
| (5) ตัวทำความร้อน (Heater) | (11) คอมพิวเตอร์ |
| (6) วาล์วปรับความร้อน | |

รูปที่ 1 เครื่องมือทดลองสำหรับวัดการส่งถ่ายความร้อนและการไหลที่ไม่อิ่มตัว ในชั้นอนุภาค

อย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัยของ P. Ratanadecho และคณะ [9-13], Ying Ma และคณะ [14], Henry และ Smith [15], Binning และ Celia [16] และ Parlange [17] เป็นเวลาหลายทศวรรษที่นักวิจัยทำการศึกษาการซึมผ่านของน้ำในวัสดุพรุน [1-18] จนกระทั่ง S. Suttisong และ P. Rattanadecho [18] ทำการวิจัยเชิงทดลองการซึมผ่านของน้ำ จากผลการทดลองทำให้ค้นพบความเกี่ยวข้องของความเร็วในการซึมผ่านมีความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวส่งผลต่อการออกแบบการทดลองและการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ครอบคลุมตัวแปรทางเทอร์โมไดนามิกส์ดังกล่าวต่อไป

งานวิจัยที่ผ่านมาได้ศึกษาการซึมผ่านของน้ำในอนุภาคชั้นเดียว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการซึมผ่านของน้ำผ่านอนุภาคที่มีขนาดต่างกันมากกว่าหนึ่งชั้น

วิธีการวิจัย

2.1 อุปกรณ์การทดลอง

1) อุปกรณ์การทดลองสำหรับการส่งถ่ายความร้อน 1 มิติ ในชั้นอนุภาคด้วยการไหลที่ไม่อิ่มตัว (รูปที่ 1) ประกอบด้วย กระจกทดสอบ (test column) มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 55 มม. สูง 400 มม. ทำจาก acrylic resin ภายในบรรจุเม็ดแก้วกลมที่มีส่วนผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ส่วนตะแกรงด้านล่างมีไว้เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของอนุภาคเม็ดแก้วกลม

เม็ดแก้วกลมที่นำมาทดสอบในชั้นอนุภาค แบ่งเป็นแบบละเอียด (fine - F) และแบบหยาบ (coarse - C) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 และ 0.4 มม. ตามลำดับ

ในการทดลองจะสูบน้ำผ่านตัวทำความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิของน้ำตามต้องการ และป้อนน้ำอย่างสม่ำเสมอทางด้านบนของชั้นอนุภาค เพื่อให้มีการกระจายตัวไปทั่วทั้งชั้นอนุภาค ท่อทดสอบหุ้มปิดด้วยฉนวนเพื่อกันความร้อนรั่วออกจากระบบ วัดการกระจายของอุณหภูมิในชั้นอนุภาคด้วย Cu-C เทอร์โมคัปเปิลที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1 มม. เทอร์โมคัปเปิลปรับตั้งค่าไว้ในช่วงกึ่งกลางของชั้นอนุภาค การกระจายของอุณหภูมิมักบันทึกใน data logger และต่อเชื่อมไปยังคอมพิวเตอร์ ตำแหน่งผิวของการแทรกซึม (infiltration front) ในชั้นอนุภาคจะถูกบันทึกด้วยกล้องดิจิทัล

2.2 วิธีการ

ในการวิจัยครั้งนี้ศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาค (d) ฟลักซ์น้ำร้อนที่ป้อน (f) อุณหภูมิของน้ำป้อน (T_{in}) ที่มีผลต่อระยะความลึกในการซึมผ่าน (infiltration depth) และการกระจายของอุณหภูมิ (temperature distribution) ในชั้นอนุภาค แบบ 1 มิติ โดย จัดชั้นอนุภาค ดังนี้ 1. จัดเรียงให้ชั้นอนุภาคละเอียดอยู่ด้านบนบนชั้นอนุภาคหยาบ (ชั้นอนุภาค F-C อัตราส่วน 50:50) 2. จัดเรียงอนุภาคแบบชั้นเดี่ยวอนุภาคละเอียด (ชั้นอนุภาค F) 3. จัดเรียงอนุภาคชั้นเดี่ยวอนุภาคหยาบ (ชั้นอนุภาค C)

ในการทดลอง ใช้ฟลักซ์น้ำป้อน 0.1 และ 0.2 กก./ตร.ม.-วินาที อุณหภูมิน้ำป้อน 45 °ซ. และ 55 °ซ.

ฟลักซ์น้ำป้อนที่ใช้ได้ผ่านการพิจารณาเบื้องต้นเพื่อไม่ให้เกิดน้ำท่วมบนผิววัสดุพูนเนื่องจากการซึมผ่านลงในวัสดุพูนไม่ทัน ซึ่งสูตรแสดงความสัมพันธ์ของฟลักซ์น้ำป้อน (f) ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (g) และค่าการซึมผ่านได้ของวัสดุพูน (k) คือ (Aoki et al. [8])

$$f \leq g \cdot k \quad (1)$$

โดย f คือ ฟลักซ์น้ำป้อน (กก./ตร.ม.-วินาที), g คือ ค่าแรงดึงดูดของโลก และ k คือค่าการซึมผ่านได้ของวัสดุพูน

ขั้นตอนการทดลอง

1. เตรียมชั้นอนุภาควัสดุพูนที่ใช้ในการทดลองแต่ละกรณี (F-C, F และ C)
2. เริ่มจากการควบคุมอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่ 25 °ซ. และอุณหภูมิของน้ำในการทดลองให้เป็นไปตามเงื่อนไขการทดลองแต่ละกรณี
3. เสียบสายเทอร์โมคัปเปิล 18 จุด แต่ละจุดห่างกัน 2 cm พร้อมทั้งติดตั้งอุปกรณ์ดังรูปที่ 1
4. วัดฟลักซ์การไหลตามกรณีที่จะทดลอง
5. ปลอ่ยน้ำตามฟลักซ์การไหลและวัดค่าอุณหภูมิผ่านดาต้าล็อกเกอร์ และวัดค่าความอิ่มตัวของอนุภาคที่ระดับความลึก 4, 12, 20, 28, 36 ซม. โดยการวัดค่าจะพิจารณาเวลาที่น้ำเริ่มไหลพ้นจากด้านล่างของชั้นอนุภาค โดยในกรณีของฟลักซ์น้ำป้อน 0.1 กก./ตร.ม.-วินาที จะวัดค่าที่ช่วงเวลาการไหลที่ 5, 8, 10 และ 15 นาที กรณีของฟลักซ์น้ำป้อน 0.2 กก./ตร.ม.-วินาที จะวัดค่าที่ช่วงเวลาการไหลที่ 5

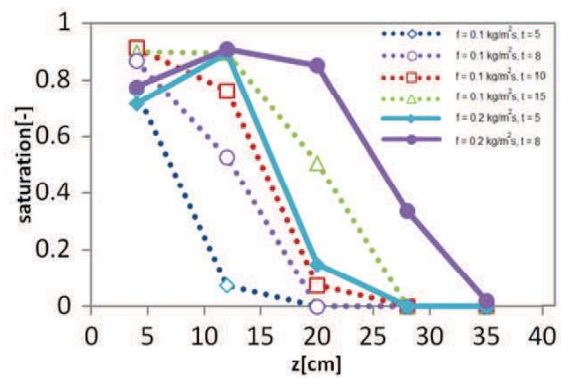
และ 8 นาที

ผลการวิจัยและอภิปราย

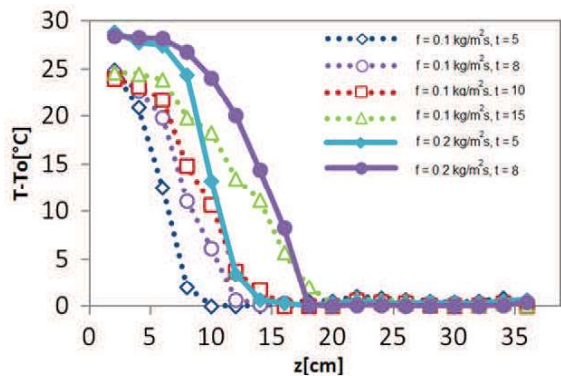
3.1 ความอิ่มตัวและอุณหภูมิในชั้นอนุภาคแบบ F-C เมื่อฟลักซ์น้ำป้อนเปลี่ยนแปลง

จากรูปที่ 2 ก ที่ระดับ 4 ซม. ความอิ่มตัวของชั้นอนุภาคของฟลักซ์น้ำ 0.1 กก./ตร.ม.-วินาที มีค่าสูงกว่าฟลักซ์น้ำ 0.2 กก./ตร.ม.-วินาที เนื่องจากการเคลื่อนที่ช้าของน้ำผ่านอนุภาคละเอียดซึ่งมีช่องว่างระหว่างอนุภาคน้อยกว่า ทำให้การดูดซึมน้ำของอนุภาคมากกว่า

ที่ระดับ 12 ซม. ความอิ่มตัวของชั้นอนุภาคของฟลักซ์น้ำ 0.1 กก./ตร.ม.-วินาที มีค่าน้อยกว่า ฟลักซ์น้ำ 0.2 กก./ตร.ม.-วินาที เนื่องจากการเคลื่อนที่ช้าของน้ำผ่านอนุภาคชั้นบนสู่ชั้นล่าง ทำให้การดูดซึมน้ำของอนุภาคน้อยกว่า



(ก) ความอิ่มตัวของชั้นอนุภาคที่ระดับต่างๆ



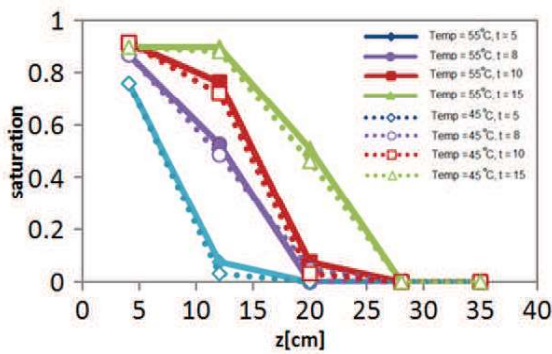
(ข) อุณหภูมิของชั้นอนุภาคที่ระดับต่างๆ

รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของค่าความอิ่มตัวและอุณหภูมิน้ำที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อใช้ฟลักซ์น้ำป้อน 0.1 และ 0.2 กก./ตร.ม.-วินาที ที่อุณหภูมิ 55 °ซ.

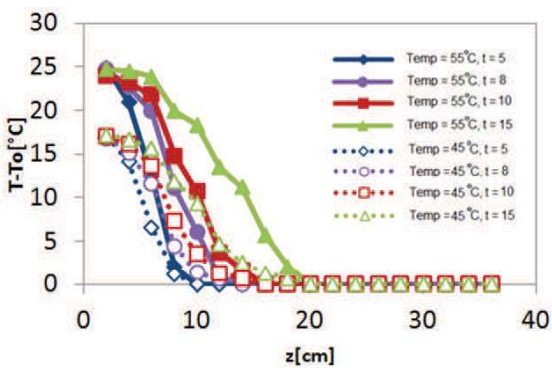
ความอิ่มตัวของชั้นอนุภาคของฟลักซ์น้ำ 0.2 กก./ตร.ม.-วินาที มีค่าสูงสุดทั้งเวลา 5 และ 8 นาที

ในช่วงความลึก 12-36 ซม. ความอิ่มตัวของชั้นอนุภาคของฟลักซ์น้ำ 0.2 กก./ตร.ม.-วินาที จะสูงกว่า ความอิ่มตัวของชั้นอนุภาคของฟลักซ์น้ำ 0.1 กก./ตร.ม.-วินาที ทุกช่วง เนื่องจากการไหลของน้ำที่เร็วกว่าทำให้ไหลลงสู่ชั้นล่างได้มากกว่า

รูปที่ 2 (ข) อุณหภูมิของน้ำในทุกระดับความลึก และทุกช่วงเวลาของฟลักซ์น้ำ 0.2 กก./ตร.ม.-วินาที สูงกว่าฟลักซ์น้ำ 0.1 กก./ตร.ม.-วินาที เนื่องจากน้ำมีความเร็วมากกว่า ทำให้มีการไหลของน้ำที่มีอุณหภูมิสูงต่อเนื่องมากกว่า อุณหภูมิของน้ำจะลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนให้กับอนุภาค



(ก) ความอิ่มตัวของชั้นอนุภาคที่ระดับต่างๆ



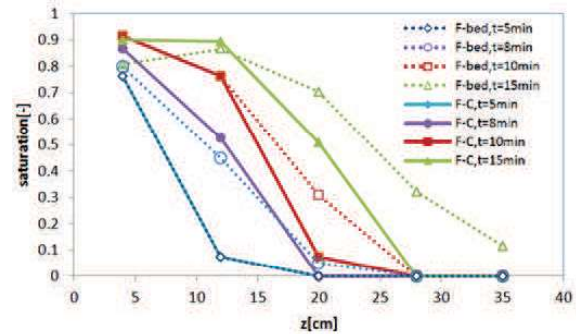
(ข) อุณหภูมิของชั้นอนุภาคที่ระดับต่างๆ

รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของค่าความอิ่มตัวและอุณหภูมิที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อใช้ฟลักซ์น้ำป้อน 0.1 กก./ตร.ม.-วินาที ที่อุณหภูมิ 45 และ 55 °ซ.

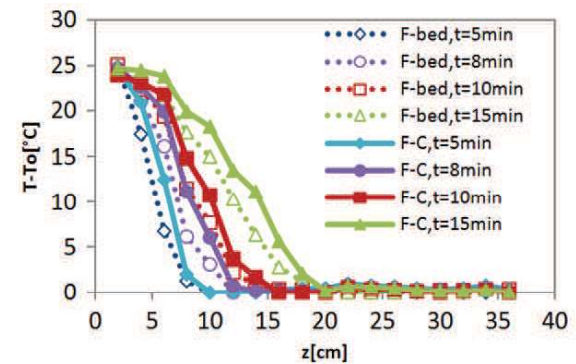
3.2 ความอิ่มตัวและอุณหภูมิในชั้นอนุภาคแบบ F-C เมื่ออุณหภูมิของน้ำป้อนเปลี่ยนแปลง

รูปที่ 3 (ก) แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ป้อน มีผลกับค่าความอิ่มตัวของชั้นอนุภาคน้อยมาก โดยความอิ่มตัวที่อุณหภูมิที่ป้อน 55 °ซ. จะมีค่าสูงกว่าความอิ่มตัวที่อุณหภูมิที่ 45 °ซ. ทุกช่วงเวลาและระดับความลึกเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานของ S.Suttisong [18] ซึ่งมีผลจากการที่น้ำมีอุณหภูมิสูงกว่าจะมีความหนืดน้อยกว่าทำให้ไหลได้เร็วกว่าและทำให้การดูดซึมของอนุภาคได้มากกว่า

รูปที่ 3 (ข) แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ป้อนที่สูงขึ้นมีผลต่ออุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาและระดับความลึกในวัสดุพูนมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิของชั้นอนุภาคจะสูงในตอนเริ่มต้น และลดลงตามความลึกที่เพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิของชั้นอนุภาคที่ต่ำจากพื้นผิวก็จะเพิ่มขึ้นตามช่วงเวลาเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิของชั้นอนุภาคที่อุณหภูมิที่ป้อน



(ก) ความอิ่มตัวของชั้นอนุภาคที่ระดับต่างๆ



(ข) อุณหภูมิของชั้นอนุภาคที่ระดับต่างๆ

รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของค่าความอิ่มตัวและอุณหภูมิที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อใช้ฟลักซ์น้ำป้อน 0.1 กก./ตร.ม.-วินาที ที่อุณหภูมิ 55 °ซ. เปรียบเทียบชั้นอนุภาค F กับ F-C

55 °ซ. จะมีค่าสูงกว่าความอืดตัวที่อุณหภูมิ 45 °ซ. ทุกช่วงเวลาและระดับความลึก สำหรับการทดลองนี้ อุณหภูมิของชั้นอนุภาคมีค่าสูงสุดทุกระดับที่อุณหภูมิ 55 °ซ. ช่วงเวลา 15 นาที

3.3 ความอืดตัวและอุณหภูมิในชั้นอนุภาค เมื่อใช้ฟลักซ์น้ำป้อน 0.1 kg/m²-s ที่อุณหภูมิ 55 °ซ. เปรียบเทียบชั้นอนุภาค F กับ F-C

รูปที่ 4 (ก) ค่าความอืดตัว ในเวลา 5 นาทีแรก F-C มีความใกล้เคียงกับ F-bed มาก เนื่องจากการซึมผ่านชั้นอนุภาคละเอียดเช่นเดียวกัน แต่หลังจากที่น้ำซึมผ่านจุดต่อ (interface) ลงชั้นล่างของชั้นอนุภาค F-C น้ำก็ซึมผ่านชั้นอนุภาคหยาบได้มากขึ้น ทำให้การดูดซับความชื้นได้มากขึ้น จึงมีผลให้ค่าความอืดตัวในระดับล่างของชั้นอนุภาค F-C มากกว่าชั้นอนุภาค F

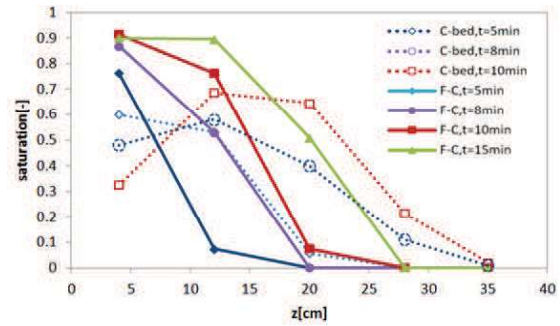
รูปที่ 4 (ข) อุณหภูมิในชั้นอนุภาค F และ F-C ที่เวลา 5 นาทีไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นที่ 8, 10 และ 15 นาที อุณหภูมิของชั้นอนุภาค F-C และชั้นอนุภาค F จะเพิ่มขึ้นทุกช่วงเวลาและความลึก โดยอุณหภูมิของชั้นอนุภาค F-C ก็จะสูงกว่า อุณหภูมิของชั้นอนุภาค F ทุกช่วงเวลาและความลึก เนื่องจากการที่น้ำซึมผ่านชั้นล่างที่มีช่องระหว่างอนุภาคมากกว่าได้เร็วกว่า จึงทำให้มีการเพิ่มความร้อนจากน้ำได้มากกว่า จึงทำให้อุณหภูมิของชั้นอนุภาค F-C มากกว่าอุณหภูมิของชั้นอนุภาค F

3.4 ความอืดตัวและอุณหภูมิในชั้นอนุภาค เมื่อใช้ฟลักซ์น้ำป้อน 0.1 กก./ตร.ม.-วินาที ที่อุณหภูมิ 55 °ซ. เปรียบเทียบชั้นอนุภาค C กับ F-C

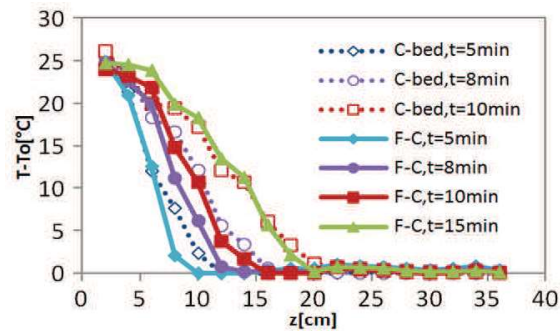
รูปที่ 5 (ก) ในช่วงความลึก 5 ซม. ค่าความอืดตัวของชั้นอนุภาค C ต่ำกว่าชั้นอนุภาค F-C เนื่องจากการไหลของน้ำผ่านอนุภาคหยาบได้เร็ว จึงทำให้การดูดซับน้ำของอนุภาค C น้อยลง ส่วนชั้นอนุภาค F-C ตอนบนเป็นอนุภาคละเอียด การไหลของน้ำผ่านอนุภาคได้ช้า จึงทำให้การดูดซับน้ำของอนุภาค F-C มาก

ในช่วงชั้นอนุภาคส่วนล่างของชั้นอนุภาค C เนื่องจากการไหลเร็วของน้ำจากชั้นบนลงมา จึงทำให้มีปริมาณน้ำต่อเนื้อมากกว่า ชั้นอนุภาค F-C จึงทำให้ค่าความอืดตัวของชั้นอนุภาค C สูงกว่าชั้นอนุภาค F-C

รูปที่ 5 (ข) อุณหภูมิในชั้นอนุภาค C และ F-C ที่เวลา



(ก) ความอืดตัวของชั้นอนุภาคที่ระดับต่างๆ



(ข) อุณหภูมิของชั้นอนุภาคที่ระดับต่างๆ

รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงของค่าความอืดตัวและอุณหภูมิน้ำที่ระดับความลึกต่างๆ เมื่อใช้ฟลักซ์น้ำป้อน 0.1 กก./ตร.ม.-วินาที ที่อุณหภูมิ 55 °ซ. เปรียบเทียบชั้นอนุภาค C กับ F-C

5 นาทีไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นที่ 8 และ 15 นาที อุณหภูมิของชั้นอนุภาค C และ F-C จะเพิ่มขึ้นทุกช่วงเวลาและความลึก โดยอุณหภูมิของชั้นอนุภาค F-C จะต่ำกว่า อุณหภูมิของชั้นอนุภาค F ทุกช่วงเวลาและความลึก ช่วง 10-20 ซม. เนื่องจากการที่น้ำซึมผ่านชั้นบนที่มีช่องระหว่างอนุภาคน้อยกว่าได้ช้า จึงทำให้มีน้ำไหลซึมลงสู่ด้านล่างได้น้อยกว่าชั้นอนุภาค C จึงทำให้อุณหภูมิของชั้นอนุภาค F-C ต่ำกว่าอุณหภูมิของชั้นอนุภาค C

สรุป

การจัดเรียงอนุภาคแบบ 2 ชั้นแบบ F-C ทำให้ค่าความอืดตัวกระจายลงในระยะลึกได้น้อยลง เมื่อเทียบกับชั้นอนุภาค F เนื่องจากที่จุดเชื่อมต่อระหว่างอนุภาคมีความดันคาพิลลารีค่อนข้างสูงทำให้น้ำเกิดกระจายออกด้านข้างในวัสดุพูนชั้นบนยังผลให้น้ำซึมผ่านได้ช้ากว่ากรณี F-bed

และในช่วงเวลาที่ของไหลไหลผ่านแพคเบดด้านบน อุณหภูมิโดยรวม ณ เวลาเดียวกันจะสูงกว่ากรณีที่เกิดใน F-bed ด้วย ในขณะที่หากเปรียบเทียบ F-C กับ C-bed กรณี F-C จะกักเก็บความชื้นและความร้อนได้ดีกว่า

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Center of Excellence in Electromagnetic Energy Utilization in Engineering (CEEE) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ที่ให้การอนุเคราะห์เครื่องมือรวมถึงให้คำปรึกษาในการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Abriola, F. Pinder, A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds 1. Equation development, *Water Resources Research* 21 (1985) 11-18.
- [2] F. Stauffer, T. Dracos, Experimental and numerical study of water and solute infiltration in layered porous media, *Journal of Hydrology*, 84 (1986), pp. 9–34
- [3] R. Haverkamp, M. Vauclin, J. Touma, P.J. Wierenga, G. Vanchaud, A comparison of numerical simulation models for one-dimensional infiltration, *Soil Science Society of America Journal*, 41 (1977), pp. 285–294
- [4] Wang Quan-Jiu, R. Horton, Fan Jun, An analytical solution for one-dimensional water infiltration and redistribution in unsaturated soil, *International Journal of Pedosphere*, 19 (2009), pp. 104–110
- [5] Haim. Gvirtzman, Eyal. Shalev, Ofer. Dahan, Yossef H. Hatzor, Large-scale infiltration experiments into unsaturated stratified loess sediment: monitoring and modeling, *International Journal of Hydrology*, 349 (2008), pp. 214–229
- [6] J.T. Kulongoski, J.A. Izbicki, Simulation of fluid heat transport to estimate desert stream infiltration, *Ground Water*, 46 (2008), pp. 462–474
- [7] Zheng Xiuqing, M.W. Van Liew, G.N. Flerchinger, Experimental study of infiltration into a bean stubble field during seasonal freeze-thaw period, *Soil Science*, 166 (2001), pp. 3–10
- [8] K. Aoki, M. Hattori, M. Kitamura, N. Shiraishi, Characteristics of heat transport in porous media with water infiltration, *ASME/JSME Thermal Engineering Proceeding*, 4 (1991), pp. 303–308
- [9] P. Ratanadecho, K. Aoki, M. Akahori, Experimental and numerical study of microwave drying in unsaturated porous material, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 28 (2001), pp. 605–616
- [10] R. Prommas, P. Rattanadecho, D. Cholaseuk, Energy and exergy analyses in drying process of porous media using hot air, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (2010), pp. 372–378
- [11] P. Ratanadecho, K. Aoki, M. Akahori, Influence of irradiation time, particle sizes and initial moisture content during microwave drying of multi-layered capillary porous materials, *ASME Journal of Heat Transfer*, 124 (2002), pp. 151–161
- [12] W. Cha-um, P. Rattanadecho, W. Pakdee, Experimental analysis of microwave heating of dielectric material using a rectangular wave guide (MODE:TE₁₀) (case study: water layer and saturated porous medium), *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33 (2009), pp. 472–481
- [13] C. Chakranond, P. Rattanadecho, Analysis of heat and mass transfer enhancement in porous material subjected to electric fields (effects of particle size and layered arrangement), *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34 (2010), pp. 1049–1056
- [14] Ying Ma, Shaoyuan Feng, Dongyuan Su, Guangyao Gao, Zailin Huo, Modeling water infiltration in a large layered soil column with a modified Green-Ampt model and HYDRUS-1D, *International Journal of Computer and Electronics in Agriculture*, 71S (2010), pp. S40–S47
- [15] E.J. Henry, J.E. Smith, Numerical demonstration of surfactant concentration-dependent capillarity and

- viscosity effects on infiltration from a constant flux line source, *International Journal of Hydrology*, 329 (2006), pp. 63–74
- [16] Philip Binning, Michael A. Celia, Practical implementation of the fractional flow approach to multi-phase flow simulation, *International Journal of Advances in Water Resources*, 22 (1999), pp. 461–478
- [17] J.Y. Parlange, Theory of water movement in soils: one-dimensional infiltration, *Soil Science*, 111 (1972), pp. 170–174
- [18] S.Suttisong and P.Rattanadecho, The experimental investigation of heat transport and water infiltration in granular packed bed due to supplied hot water from the top: Influence of supplied water flux, particle sizes and supplied water temperature, *Int. J. Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 18, No.1(2011), pp.87-93