

อิทธิพลนาโนเซลลูโลสและสภาพเปียกสลับแห้งต่อความสามารถในการอุ้มน้ำและสภาวะการเกิดเม็ดดินของดินเนื้อละเอียด

The Effect of Nanocellulose and Wetting-Drying Cycle on Water-Holding Capacity and State of Aggregation of Fine-Textured Soil

สุชาดา กรุณา¹ อาณัติ เสงเจริญ¹ และณัฏฐนิชา ธรรมมิญช¹

Suchada Karuna¹, Anut Hengcharoen¹ and Natthanicha Thammincha¹

บทคัดย่อ

การระบายน้ำและอากาศเป็นปัญหาสำคัญของดินเนื้อละเอียดที่ใช้เพาะปลูกพืช เนื่องจากอนุภาคดินเหนียวมีขนาดเล็ก และรูปร่างเป็นแผ่นอัดตัวแน่นง่าย ทำให้การระบายน้ำและอากาศไม่ดี ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของรากพืชและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน การส่งเสริมการเกิดเม็ดดินในดินเนื้อละเอียดจะช่วยเพิ่มช่องระบายน้ำและอากาศในดินได้ วิธีการปรับปรุงที่นิยมส่วนใหญ่ คือ ใส่อินทรีย์วัตถุหรือสารอินทรีย์ต่าง ๆ ลงไปในดิน ซึ่งใช้ระยะเวลาค่อนข้างนาน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้นาโนเซลลูโลสและทดสอบอิทธิพลของสภาพเปียกสลับแห้งของดินเมื่อผสมนาโนเซลลูโลสต่อความสามารถในการอุ้มน้ำและสภาวะการเกิดเม็ดดินของดินเนื้อละเอียด โดยผสมดินกับนาโนเซลลูโลส 4 ระดับความเข้มข้น คือ 1, 1.3, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ (สัดส่วนนาโนเซลลูโลสต่อดินโดยน้ำหนัก) จากนั้นทำให้ของผสมผ่านสภาพเปียกสลับแห้งจำนวน 3 รอบ ตรวจวัดความสามารถในการอุ้มน้ำ (water-holding capacity; WHC) การเปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยเม็ดดินแบบถ่วงน้ำหนัก (change in mean weighted diameter; CMWD) สถานะการเกิดเม็ดดิน (state of aggregation; SA) และการกระจายขนาดของช่องหลังผ่านสภาพเปียกสลับแห้งสามรอบ (pore-size distribution; PSD) ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนนาโนเซลลูโลสที่สูง (2 และ 4 เปอร์เซ็นต์) ช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำได้มากกว่าสัดส่วนนาโนเซลลูโลสที่ต่ำ (1 และ 1.3 เปอร์เซ็นต์) สภาพการเปียกสลับแห้งที่นานขึ้นทำให้ค่า WHC เพิ่มขึ้น สำหรับสภาวะการเกิดเม็ดดิน นาโนเซลลูโลสในสัดส่วนที่สูง (2 และ 4 เปอร์เซ็นต์) ส่งเสริมสภาวะการเกิดเม็ดดิน (SA สูง) และความคงทนของเม็ดดิน (CMWD น้อย) สภาพการเปียกสลับแห้งที่นานขึ้นทำให้ความคงทนของเม็ดดินลดลง นอกจากนี้พบว่า นาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้นสูงทำให้สัดส่วนช่องระบายน้ำและอากาศในดินเนื้อละเอียด ($> 30 \mu\text{m}$) เพิ่มขึ้นด้วย

คำสำคัญ: นาโนเซลลูโลส เปียกสลับแห้ง ความสามารถในการอุ้มน้ำ สภาวะการเกิดเม็ดดิน ดินเนื้อละเอียด

Abstract

Soil drainage and aeration are critical problems faced when planting crops in fine-textured soils. The small particle size and flattened shape of the particles that make up fine-textured soils cause the soil to be easily compacted. These problems affect root growth and microbial activity. The promotion of granulation in fine-grained soils can enhance levels of drainage and the presence of air pores in the soil. This is generally done by adding organic matter or organic substances to the soil. These practices are effective but can take a long time. In this research, we used nanocellulose to improve the water-holding capacity and state of aggregation of fine-textured soil. The effect of wetting-drying (WD) cycles on these soil properties was investigated as well. Soil samples were mixed with nanocellulose at the ratios of 1, 1.3, 2 and 4 percent (nanocellulose : soil, % w/w). The mixtures were subjected to three wetting-drying cycles, and soil water-holding capacity (WHC), change in mean weighted diameter (CMWD), state of aggregation (SA), and pore-size distribution (after three WD cycles) mixtures were measured. The results showed that high content of nanocellulose (2 and 4 %) increased WHC to a higher degree than did low content (1 and 1.3 %). Moreover, more wetting-drying cycles also enhanced WHC. High nanocellulose content (2 and 4 %) promoted state of aggregation (high SA) and aggregate stability (low CMWD) to a higher degree

¹ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

¹Department of Soil Science, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen, Nakhon Pathom 73140

^{*}Corresponding author, Email: agrscdk@ku.ac.th

than did low content of nanocellulose (1 and 1.3 %). Multiple WDs reduced soil aggregation. Moreover, a high content of nanocellulose enhanced drainage and level of aeration (> 30 mm).

Keyword: nanocellulose, wetting-drying, water-holding capacity, state of aggregation, fine-textured soil

คำนำ

สมบัติฟิสิกส์ของดิน ได้แก่ เนื้อดิน ความหนาแน่น ความสามารถในการอุ้มน้ำ การระบายน้ำและอากาศ โครงสร้างดิน เป็นสมบัติสำคัญที่ส่งเสริมสมบัติอื่น ๆ ของดิน ไม่ว่าจะเป็นความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช การเจริญเติบโตของรากพืช และกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน (Picek et al., 2000) เนื้อดินเป็นสมบัติฟิสิกส์พื้นฐานที่กำหนดความสามารถในการเก็บกักน้ำและธาตุอาหาร การระบายน้ำและอากาศ นอกจากนี้ โครงสร้างดินก็มีความสำคัญต่อการเก็บกักน้ำ (water retention) การแทรกซึม น้ำ (infiltration) การระบายน้ำ และการถ่ายเทอากาศ (aeration) ภายในดินเช่นเดียวกัน (พิมพันธ์ เจริญสวัสดิพงษ์, 2549) ดินเนื้อละเอียดแม้จะเป็นดินที่มีความสามารถในการเก็บกักธาตุอาหารและน้ำไว้ได้สูง แต่ปัญหาสำคัญของดินชนิดนี้ คือ การระบายน้ำและอากาศไม่ดี ส่วนมากน้ำที่เก็บไว้ในช่องขนาดเล็กมากพืชไม่สามารถดึงไปใช้ได้ เนื่องจากดินมีอนุภาคขนาดเล็ก มีรูปร่างแบนผ่นอัดตัวแน่นได้ง่าย ช่องขนาดเล็กมีแรงดึงน้ำสูงมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของรากพืชและการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างดินกับบรรยากาศ การแก้ปัญหานี้ส่วนใหญ่จะทำการปรับปรุงโครงสร้างของดิน ทำให้อนุภาคดินเหนียวเกาะยึดกันเป็นเม็ดดินขนาดเล็กที่มีความคงทน ส่งผลให้สัดส่วนช่องระบายน้ำและอากาศของดินเพิ่มมากขึ้น วิธีการปฏิบัติโดยทั่วไป คือ ใส่อินทรีย์วัตถุลงไปในดินซึ่งใช้เวลาค่อนข้างนานจึงจะเห็นผล ดังนั้นการหาวัสดุอินทรีย์อื่น ๆ ที่สามารถปรับปรุงสมบัติดังกล่าวของดินได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้เวลาสั้นลง จึงเป็นโจทย์วิจัยที่ท้าทาย นาโนเซลลูโลสเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากธรรมชาติและมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรม ด้วยสมบัติที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงถึง 153-284 ตร.ม. ต่อ ก. (Sehaqui et al., 2011) สามารถดูดซับน้ำได้มากถึงร้อยละเก้าโดยน้ำหนัก (Jiang and Hsieh, 2014) เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Bauli et al., 2021) นอกจากนี้นาโนเซลลูโลสยังใช้เป็นสารเชื่อมเกาะยึดอนุภาคดินได้ด้วย เช่นในพื้นที่แห้งแล้งของประเทศจีนได้มีการนำนาโนเซลลูโลสมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บน้ำและการเกาะยึดกันของอนุภาคดินช่วยลดการเคลื่อนย้ายอนุภาคโดยลมและช่วยชะลอการเกิดสภาพทะเลทรายได้อีกด้วย แม้จะได้ผลดีแต่ต้นทุนนาโนเซลลูโลสค่อนข้างสูงเพราะยังมีการผลิตน้อย (Yi and Zhao, 2016) จากการศึกษาของ Demitri et al. (2013) พบว่า การใช้ cellulose-based superabsorbent hydrogel ช่วยเพิ่มความสามารถในการเก็บน้ำของดินและรักษาระดับความชื้นในดินได้ยาวนานขึ้น และ Bauli et al. (2021) รายงานว่า การใช้ carboxymethyl cellulose (CMC) hydrogel ผสมนาโนเซลลูโลสและแบรินเหนียวชนิดต่าง ๆ ที่มีสมบัติในการดูดซับสูง จากนั้นนำไปผสมกับดินในเขตแห้งแล้ง พบว่า ตำรับที่มีนาโนเซลลูโลสสามารถเพิ่มความสามารถในการเก็บน้ำและรักษาความชื้นในดินได้ยาวนานขึ้น นอกจากนี้ยังเพิ่มการยึดเกาะของอนุภาคดินให้เป็นเม็ดดินที่มีความคงทน ซึ่งช่วยลดปัญหาการกร่อนดินในพื้นที่ดังกล่าวได้อีกด้วย แม้ว่านาโนเซลลูโลสจะเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพสูงใช้เวลาน้อยในการปรับปรุงดิน แต่การนำมาใช้งานทางด้านการเกษตรยังมีการศึกษาค้นคว้าค่อนข้างน้อยในประเทศไทย เนื่องจากยังมีราคาค้นทุนการผลิตสูง หากมีการศึกษาและมีผลการทดลองที่สนับสนุนมากขึ้น อาจจะทำให้นำมาซึ่งความร่วมมือของหน่วยงานต่าง ๆ ในการพัฒนาเพื่อให้อุตสาหกรรมนาโนเซลลูโลสลดลงและเป็นประโยชน์ต่อการเกษตรมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้นาโนเซลลูโลสกับงานทางด้านการเกษตร โดยนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินทำหน้าที่สารเชื่อมอนุภาคดินเหนียวเพื่อส่งเสริมการเกิดโครงสร้างหรือเม็ดดินขนาดเล็ก ที่จะช่วยเพิ่มความสามารถในการระบายน้ำและอากาศของดินเนื้อละเอียด เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดิน

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ใช้ดินเนื้อละเอียด ชุดดินตาคลี (Tk), Loamy-skeletal, carbonatic, isohyperthermic Entic Haplustolls พิกัด ละติจูด 14.8735099 และลองจิจูด 99.7107238 ในพื้นที่ ต.หนองมะค่าโมง อ.ด่านช้าง จ.สุพรรณบุรี มีเนื้อดินเป็นดินเหนียว (clay) ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินประกอบด้วยอนุภาคทราย 14.37 เปอร์เซ็นต์ ทรายแป้ง 25.20 เปอร์เซ็นต์ และดินเหนียว 60.43 เปอร์เซ็นต์ นำตัวอย่างดินมาร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มม. ใช้ตัวอย่างดิน 100 ก. ผสมกับนาโนเซลลูโลส (สนับสนุนผลิตภัณฑ์นาโนเซลลูโลสโดย บริษัท ภัทร จักรดำ) โดยวางแผนการทดลองแบบ completely randomized design (CRD) ประกอบด้วยอัตราส่วนความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลส 4 ระดับ ดังนี้ 1, 1.3, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ (ร้อยละของนาโนเซลลูโลสต่อดินโดยน้ำหนัก) คลุกเคล้าดินและนาโนเซลลูโลสให้เข้ากันทิ้งไว้ประมาณ 1 วัน แล้วนำเข้าสู่ตู้อบอุณหภูมิ 105

องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 วัน (การทดสอบความสามารถในการอุ้มน้ำต้องทำให้ของผสมแห้งใกล้เคียงกันเมื่อเริ่มต้น) เมื่อของผสมเย็นทำการบดและร่อนตัวอย่างของผสมผ่านตะแกรงขนาด 8 มม. (ขนาดโตที่สุดของโครงสร้างดินแบบเม็ดดินที่ใช้ทดสอบ) นำส่วนผสมไปตรวจวัดความสามารถในการอุ้มน้ำ (water-holding capacity; WHC) (Williams et al., 1983; Hazelton and Murphy, 2007) ส่วนผสมที่ผ่านขั้นตอนนี้ถือว่าผ่านสภาพเปียกแล้วหนึ่งครั้ง จากนั้นทำให้ส่วนผสมแห้งโดยการผึ่งลมประมาณ 2-3 วัน จะได้ตัวอย่างที่ผ่านสภาพเปียกสลับแห้ง (wetting-drying cycle; WD) รอบที่ 1 ปฏิบัติเช่นเดียวกันในรอบที่ 2 และ 3 ตามลำดับ (แต่ละรอบการแห้งตัวอย่างของผสมจะเหลือความชื้นโดยมวลไม่เกิน 0.35 กรัมของน้ำต่อกรัมของดินแห้ง) ตัวอย่างของผสมที่ผ่านสภาพเปียกสลับแห้งในแต่ละรอบจะถูกนำไปร่อนแบบแห้งและแบบเปียก เพื่อประเมินขนาดเฉลี่ยของเม็ดดินแบบถ่วงน้ำหนัก (mean weighted diameter; MWD_{dry} and MWD_{wet}) จากนั้นจึงประเมินสมบัติต่าง ๆ ดังนี้ 1) การเปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยเม็ดดินแบบถ่วงน้ำหนัก (change in mean weighted diameter, $CMWD = MWD_{dry} - MWD_{wet}$) โดยที่ $CMWD$ มีค่าน้อย หมายถึง เม็ดดินมีความคงทนแม้ผ่านการร่อนในน้ำ 2) ประเมินสถานะการเกิดเม็ดดินจากน้ำหนักดินในแต่ละชั้นตะแกรงที่ผ่านการร่อนแบบเปียก (state of aggregation; SA หมายถึง เปอร์เซ็นต์โดยมวลของเม็ดดินที่มีขนาดโตกว่าขนาดมาตรฐาน 1 มม.) (สัญญาธิ์ ภูเงิน, 2558; Field et al., 1997; Hazelton and Murphy, 2007) (ค่า $CMWD$ และ SA ประเมินโดยการชั่งน้ำหนักดินที่ค้างบนตะแกรงขนาดต่าง ๆ ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 3 ตำแหน่ง) และ 3) การกระจายขนาดของช่อง (pore-size distribution) โดยนำตัวอย่างของผสมที่ผ่านสภาพเปียกสลับแห้งสามรอบมาหาเส้นโค้งลักษณะความชื้นของดิน (soil water characteristic) จากนั้นจึงประเมินเป็นสัดส่วนช่องแบ่งออกเป็น 3 ขนาด ได้แก่ โตกว่า $30\ \mu m$ (macropore), $30-0.2\ \mu m$ (mesopore) และ เล็กกว่า $0.2\ \mu m$ (micropore) วิเคราะห์ความแปรปรวนของลักษณะที่ศึกษา (F-test) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบ Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ผลการศึกษาและวิจารณ์

อิทธิพลของสัดส่วนนาโนเซลลูโลสต่อความสามารถในการอุ้มน้ำ

การเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการอุ้มน้ำ (water-holding capacity; WHC) ของดินเนื้อละเอียดเมื่อผสมนาโนเซลลูโลสในสัดส่วนต่าง ๆ ภายใต้สภาพการเปียกสลับแห้ง (wetting-drying; WD) (Table 1) พบว่า ภายใต้สภาพเปียกสลับแห้งรอบที่ 1 และ 2 ค่าเฉลี่ย WHC ทุกระดับความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ในรอบที่ 3 พบว่า ค่าเฉลี่ย WHC มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) หากพิจารณาค่าเฉลี่ย WHC ทั้ง 3 รอบการเปียกสลับแห้ง ที่ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสทั้ง 4 ระดับ พบว่า มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) โดยที่สัดส่วนของนาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้นสูงสุด (4 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่าเฉลี่ยของ WHC มากที่สุดอยู่ที่ 61 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ ที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ย WHC เท่ากับ 53 เปอร์เซ็นต์ ที่สัดส่วนนาโนเซลลูโลส 2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ย WHC เท่ากับ 52 เปอร์เซ็นต์ และสัดส่วน 1.3 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเฉลี่ย WHC น้อยที่สุด เท่ากับ 51 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลส 1, 1.3 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ อาจกล่าวได้ว่า ค่า WHC ของดินเนื้อละเอียดจากการทดลองนี้มีค่าผันแปรโดยตรงตามปริมาณนาโนเซลลูโลส ที่ความเข้มข้นนาโนเซลลูโลสสูงทำให้ค่า WHC สูงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากนาโนเซลลูโลสมีพื้นที่ผิวจำเพาะค่อนข้างสูงมาก (153-284 ตร.ม. ต่อ ก.) มีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลของน้ำได้สูงถึง 100 เท่า (Sehaqui et al., 2011; Jiang and Hsieh, 2014; Abitbol et al., 2016) มีพื้นที่ผิวเป็นกลุ่มไฮดรอกซิลเมื่อแตกตัวจับกับโมเลกุลไฮโดรเจนของน้ำได้ ทำให้เมื่อผสมกับดินจึงทำให้ค่า WHC สูงขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Choudhary et al. (1995) ที่กล่าวว่า สัดส่วนของนาโนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินเพิ่มขึ้นด้วย อีกงานวิจัยของ Demitri et al. (2013) ที่ทำการศึกษาศักยภาพของ cellulose-based superabsorbent hydrogels ซึ่งพบว่า นาโนเซลลูโลสสามารถเพิ่มการดูดซับน้ำและรักษาระดับความชื้นในดินได้ยาวนานขึ้น และ Barajas-Ledesma et al. (2021) พบว่า ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ carboxylated nanocellulose superabsorbent (SAP) ลงไปในดิน SAP ช่วยเพิ่มแรงดูดซับน้ำในดินและรักษาระดับความชื้นในดินได้ยาวนานขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้ Bauli et al. (2021) รายงานว่า carboxymethyl cellulose (CMC) ที่ผสมนาโนเซลลูโลสและแบรินเหนียวในระดับที่แตกต่างกันนั้น ดำรับที่มีนาโนเซลลูโลสสามารถเพิ่มการดูดซับน้ำได้ดี

Table 1 Statistical analysis of water-holding capacity of fine-textured soil mixed with nanocellulose in different ratios under wetting-drying cycle (WD1 = 1st wetting-drying, WD2 = 2nd wetting-drying, WD3 = 3rd wetting-drying).

Nanocellulose ratios (%)	Water-holding capacity (%)			mean WHC
	WD1	WD2	WD3	
1	47.2	50.2	62.9ab	53.4
1.3	51.3	47.9	54.3a	51.2
2	52.5	50.8	51.4a	51.7
4	57.5	53.2	72.3c	60.9
F-test	ns	ns	*	
P-value	0.25	0.90	0.04	

* = Significant difference at $P < 0.05$, ns = non-significant difference.

Different letters within a column indicate significant difference at $P < 0.05$ by Duncan's new multiple range test.

อิทธิพลของสภาพเปียกสลับแห้งต่อความสามารถในการอุ้มน้ำ

พิจารณาอิทธิพลของสภาพเปียกสลับแห้งต่อค่า WHC ของดินเนื้อละเอียดเมื่อผสมกับนาโนเซลลูโลส (Table 2) พบว่า ที่ระดับความเข้มข้นนาโนเซลลูโลสต่ำ (1 เปอร์เซ็นต์) และ สูง (4 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่าเฉลี่ย WHC ในแต่ละรอบการเปียกสลับแห้งแตกต่างกันทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่ที่ระดับความเข้มข้นต่ำ 1.3 และ 2 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ย WHC ไม่แตกต่างกันในแต่ละรอบเปียกสลับแห้ง หากพิจารณาค่าเฉลี่ยทุกระดับความเข้มข้นภายใต้สภาพการเปียกสลับแห้ง พบว่า ค่าเฉลี่ย WHC แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ โดยที่สภาพเปียกสลับแห้ง 3 รอบ มีค่าเฉลี่ย WHC สูงที่สุดซึ่งมีค่าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือ 1 รอบ (52 เปอร์เซ็นต์) และ 2 รอบ (50 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ จากกราฟ (Figure 2) อาจกล่าวได้ว่า สภาพเปียกสลับแห้ง 1 ถึง 2 รอบนั้น ให้ค่าเฉลี่ย WHC ที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ) ส่วนรอบที่ 3 ให้ค่า WHC ที่ค่อนข้างสูงกว่า 2 รอบแรก (มีความแตกต่างทางสถิติ) สอดคล้องกับรายงานของ Sayem and Kong (2016) ที่ศึกษาอิทธิพลของการเปียกสลับแห้ง 8 รอบต่อการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้งลักษณะความชื้นดิน (soil-water characteristic curve) กล่าวว่า สภาพการเปียกสลับแห้งในรอบแรกนั้นค่า WHC ของดินมีความแปรปรวนค่อนข้างสูงแต่ค่าดังกล่าวจะสมดุลเมื่อผ่านรอบการเปียกสลับแห้งอย่างน้อย 4 รอบขึ้นไป และงานวิจัยของ Zhang et al. (2018) ที่รายงานว่า ความสามารถในการเก็บน้ำของดินมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยในช่วง 1-3 รอบ ของสภาพเปียกสลับแห้งจากการทดลองทั้งหมด 9 รอบ ความสามารถในการอุ้มน้ำสูงสุดของดินจะเริ่มเกิดขึ้นในรอบที่ 4 ของสภาพเปียกสลับแห้ง ดังนั้น การเพิ่มรอบการเปียกสลับแห้งให้มากขึ้นกับตัวอย่างดินที่ผสมนาโนเซลลูโลสมีแนวโน้มที่จะทำให้ดินมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีขึ้น ทั้งนี้สอดคล้องกับผลวิจัยของ Choudhary et al. (1995) ที่ทำการทดสอบวัสดุโพลีเมอร์ที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำสูงภายใต้สภาพเปียกสลับแห้ง 16 รอบในดินเนื้อปูน (calcareous soil) ซึ่งผลการทดลองชี้ว่าความเข้มข้นของสารโพลีเมอร์ที่ใส่ลงไปในดินช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดินได้ ช่วยลดการระเหยน้ำจากผิวดิน รักษาระดับความชื้นในดินได้ยาวนานขึ้น

Table 2 The effect of wetting drying cycles on water-holding capacity of fine-textured soil mixed with nanocellulose in different ratios.

wetting-drying cycle	Nanocellulose ratios (%)				mean WHC
	1	1.3	2	4	
WD1	47.19a	51.25	52.53	57.47a	52.1
WD2	50.15a	47.93	50.81	53.22a	50.5
WD3	62.87b	54.35	51.43	72.30b	60.2
F-test	*	ns	ns	*	
P-value	0.03	0.65	0.94	0.04	

* = Significant difference at $P < 0.05$, ns = non-significant difference.

Different letters within a column indicate significant difference at $P < 0.05$ by Duncan's new multiple range test.

อิทธิพลของสัดส่วนนาโนเซลลูโลสต่อสถานะการเกิดเม็ดดิน

การเปลี่ยนแปลงขนาดเฉลี่ยเม็ดดินแบบถ่วงน้ำหนัก (change in mean weighted diameter; CMWD) และสถานะการเกิดเม็ดดิน (state of aggregation; SA) (Table 3) เป็นดัชนีประเมินโครงสร้างดินในกรณีศึกษา ซึ่งค่า CMWD ที่น้อยแสดงถึงความคงทนต่อการสลายตัวของเม็ดดินในน้ำ ผลการศึกษาพบว่า สัดส่วนของนาโนเซลลูโลสมีผลต่อค่า CMWD ของดินเนื้อละเอียดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P -value < 0.05) ในทุกรอบของสภาพการเปียกสลับแห้ง โดยที่สัดส่วนนาโนเซลลูโลสที่ความเข้มข้นสูง (2 และ 4 เปอร์เซ็นต์) ทำให้ค่า CMWD น้อยกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ (1 และ 1.3 เปอร์เซ็นต์) สำหรับค่า CMWD ที่น้อยที่สุดเท่ากับ 1 มม. ซึ่งเกิดขึ้นในรอบที่ 2 ของการเปียกสลับแห้ง สำหรับความเข้มข้นนาโนเซลลูโลสที่ต่ำ (1 เปอร์เซ็นต์) ค่าเฉลี่ย CMWD พบว่า มีค่ามากที่สุด ในทุกรอบการเปียกสลับแห้ง (ค่า CMWD เท่ากับ 3.1 2.9 และ 3.2 มม. สำหรับการเปียกสลับแห้ง 1, 2 และ 3 รอบ ตามลำดับ) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สัดส่วนของนาโนเซลลูโลสที่เข้มข้นจะส่งผลให้โครงสร้างดินที่แข็งแรง มีความคงทนต่อการสลายตัวในน้ำ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Bauli et al. (2021) กล่าวว่า การใช้ carboxymethyl cellulose (CMC) hydrogel ผสมนาโนเซลลูโลสและแร่ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ ช่วยเพิ่มการยึดเกาะของอนุภาคดินให้เป็นเม็ดดินที่มีความคงทน ทั้งนี้เนื่องจากนาโนเซลลูโลสเป็นสารอินทรีย์ทำหน้าที่สารเชื่อมคล้ายอินทรีย์วัตถุ มีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงทำให้สามารถเชื่อมยึดอนุภาคดินให้เกาะยึดกันด้วยพันธะที่แข็งแรง (Phanthong et al., 2018) เกิดเป็นเม็ดดินที่มีความคงทนมากขึ้น ไม่แตกสลายง่ายในน้ำ นาโนเซลลูโลสที่มีปริมาณมากเสมือนมีอินทรีย์วัตถุในดินมากทำให้อนุภาคของดินเหนียวเกิดการรวมกลุ่มกันได้ดีกว่าปริมาณนาโนเซลลูโลสที่น้อย

เมื่อพิจารณาสถานะการเกิดเม็ดดิน (SA) (Table 3) ซึ่งในที่นี้ใช้สัดส่วนร้อยละโดยมวลของเม็ดดินที่มีขนาดโตกว่า 1 มม. แสดงถึงสถานะการเกิดเม็ดดิน ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสส่งผลต่อค่า SA อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (Table 1) โดยที่ขึ้นอยู่กับรอบของการเปียกสลับแห้ง กล่าวคือ การเปียกสลับแห้งรอบแรกที่ระดับความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสสูง (2 และ 4 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่าเฉลี่ย SA สูงด้วยเช่นกัน (ค่า SA เท่ากับ 61.4 และ 59.8 เปอร์เซ็นต์) และสูงกว่าที่ความเข้มข้นนาโนเซลลูโลสต่ำ โดยที่ระดับความเข้มข้นนาโนเซลลูโลส 1.3 เปอร์เซ็นต์ มีค่า SA เท่ากับ 45.3 เปอร์เซ็นต์ และที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ มีค่า SA เท่ากับ 53.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนการเปียกสลับแห้งรอบที่ 2 ความเข้มข้นนาโนเซลลูโลสที่สูงที่สุด (4 เปอร์เซ็นต์) ให้ค่าเฉลี่ย SA สูงที่สุดเท่ากับ 72.1 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือที่ความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ (44.5 เปอร์เซ็นต์), 1.3 เปอร์เซ็นต์ (43.8 เปอร์เซ็นต์) และ 1 เปอร์เซ็นต์ (40.2 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ และสำหรับการเปียกสลับแห้งรอบที่ 3 ความเข้มข้นนาโนเซลลูโลสที่ 2 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าเฉลี่ย SA สูงที่สุดเท่ากับ 61.4 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือที่ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ (52.2 เปอร์เซ็นต์), 1 เปอร์เซ็นต์ (29.4 เปอร์เซ็นต์) และ 1.3 เปอร์เซ็นต์ (18.7 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ความเข้มข้นนาโนเซลลูโลสที่สูง (2 และ 4 เปอร์เซ็นต์) ส่งผลให้ดินเนื้อละเอียดมีสถานะของการเกิดเม็ดดินและเม็ดดินที่คงทนดีกว่าระดับความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสต่ำ (1 และ 1.3 เปอร์เซ็นต์) ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากนาโนเซลลูโลสทำหน้าที่เสมือนสารเชื่อมอินทรีย์มีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง และพื้นที่ผิวของนาโนเซลลูโลสช่วยดูดซับน้ำไว้และกระจายความชื้นบนผิวอนุภาคดินจะส่งเสริมการเกาะยึดของอนุภาคดินเหนียวให้เกาะยึดกันเกิดโครงสร้างเป็นเม็ดดิน (Cao et al., 2017; Phanthong et al., 2018)

Table 3 Change in mean weighted diameter (CMWD) and state of aggregation (SA) of fine-textured soil mixed with nanocellulose in different ratios under wetting-drying cycle.

Nanocellulose ratios (%)	CMWD ^{1/} (mm)			SA ^{2/} (%)		
	WD1	WD2	WD3	WD1	WD2	WD3
1	3.1d	2.9d	3.2bc	53.6b	40.2a	29.4b
1.3	2.6c	1.8bc	3.5c	45.3a	43.8b	18.7a
2	1.5ab	2.2c	2.9a	61.4d	44.5bc	61.4d
4	1.7a	1.1a	2.9a	59.8cd	72.1d	52.2c
F-test	**	**	*	**	**	**
P-value	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00

^{1/}CMWD = Change in mean weighted diameter (CMWD = $MWD_{dry} - MWD_{wet}$).

^{2/}SA = State of aggregation (percentage of aggregation size > 1mm).

* = Significant difference at $P < 0.05$, ** = Significant difference at $P < 0.01$, ns = non-significant difference.

Different letters within a column indicate significant difference at $P < 0.05$ by Duncan's new multiple range test.

Table 4 Change in mean weighted diameter (CMWD) and state of aggregation (SA) under wetting-drying cycle of each nanocellulose ratio.

wetting-drying cycle	CMWD ^{1/} (mm)				SA ^{2/} (%)			
	1%	1.3%	2%	4%	1%	1.3%	2%	4%
WD1	3.1	2.5b	1.4a	1.7b	53.6c	45.3c	61.4b	59.8b
WD2	2.9	1.8a	2.2b	1.1a	40.2b	43.8bc	44.5a	72.1c
WD3	3.2	3.5c	2.9c	2.9c	29.4a	18.7a	61.4b	52.2a
F-test ^{1/}	ns	**	**	**	**	**	*	**
P-value	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00

^{1/}CMWD = Change in mean weighted diameter (CMWD = $MWD_{dry} - MWD_{wet}$).

^{2/}SA = State of aggregation (percentage of aggregation size > 1mm).

* = Significant difference at $P < 0.05$, ** = Significant difference at $P < 0.01$, ns = non-significant difference.

Different letters within a column indicate significant difference at $P < 0.05$ by Duncan's new multiple range test.

อิทธิพลของสภาพการเปียกสลับแห้งต่อสถานะการเกิดเม็ดดิน

พิจารณาอิทธิพลของสภาพเปียกสลับแห้งต่อสถานะการเกิดเม็ดดิน (Table 4) พบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่า CMWD และ SA ในแต่ละรอบการเปียกสลับแห้งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลส กล่าวคือ ค่าเฉลี่ย CMWD ที่ระดับความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสต่ำ (1 เปอร์เซ็นต์) ทั้งสามรอบการเปียกสลับแห้งไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ในขณะที่ระดับความเข้มข้นสูงขึ้น (1.3, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์) พบว่า ค่าเฉลี่ย CMWD ในแต่ละรอบการเปียกสลับแห้งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) โดยที่การเปียกสลับแห้งรอบที่ 3 จะให้ค่าเฉลี่ยของ CMWD สูงกว่าสองรอบแรก ค่า CMWD ที่มากขึ้นชี้ให้เห็นว่า รอบการเปียกสลับแห้งที่เพิ่มขึ้นมีแนวโน้มทำให้เม็ดดินสลายตัวในน้ำมากขึ้นหรือเม็ดดินมีความคงทนลดลง Tang et al. (2016) รายงานว่า สภาพการเปียกสลับแห้งของดินเหนียวในสภาพแปลงช่วงเริ่มต้นก่อนถึงรอบที่สาม ช่วงแห้งความกว้างของรอยแตกเฉลี่ยจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขนาดเม็ดดินเฉลี่ยจะลดลงตามจำนวนรอบการเปียกสลับแห้งเพิ่มขึ้น

สำหรับค่าเฉลี่ย SA พบว่า ในแต่ละรอบการเปียกสลับแห้งมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P\text{-value} < 0.05$) โดยที่ระดับความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสต่ำ (1 และ 1.3 เปอร์เซ็นต์) ค่าเฉลี่ย SA สูงสุดที่รอบแรกของการเปียกสลับแห้ง (53.6 และ 45.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้น 1 และ 1.3 ตามลำดับ) และลดลงตามจำนวนรอบการเปียกสลับแห้งที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่ามีการสลายตัวของเม็ดดินในน้ำ จึงทำให้สัดส่วนของเม็ดดินที่โตกว่ามาตรฐาน (1 มม.) มีปริมาณลดลง อาจเนื่องจากการเกาะยึดกันของอนุภาคดินเป็นการเกาะตัวแบบหลวม ๆ เพราะสารเชื่อมมีปริมาณน้อยและระยะเวลาการเกิดเม็ดดินไม่ยาวนาน สภาพการเปียกสลับแห้งหลายรอบส่งผลให้สารเชื่อมละลายและเสื่อมสภาพ (Neramitkornburi et al., 2015) ส่วนที่ระดับความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสที่สูง (2 และ 4 เปอร์เซ็นต์) พบว่า ค่าเฉลี่ย SA ไม่ได้ผันแปรตามจำนวนรอบของการเปียกสลับแห้ง เนื่องจากในดินยังมีปริมาณสารเชื่อมที่คงอยู่ในดินยังทำหน้าที่ยึดเกาะอนุภาคดินไว้ด้วยกัน

การกระจายขนาดของช่องของดินผสมนาโนเซลลูโลสภายใต้สภาพการเปียกสลับแห้งสามรอบ

วัดการกระจายขนาดของช่อง (pore-size distribution; PSD) ในดินเนื้อละเอียดที่ผสมนาโนเซลลูโลสในสัดส่วนต่าง ๆ (Figure 1) หลังผ่านสภาพเปียกสลับแห้ง 3 รอบ ผลการทดลองพบว่า สัดส่วนของช่องขนาดใหญ่ ($> 30 \mu\text{m}$) เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสที่มากขึ้น กล่าวคือ ที่ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสต่ำ (1 เปอร์เซ็นต์) มีสัดส่วนของช่องขนาดใหญ่เท่ากับ 26.96 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้น 1.3, 2 และ 4 เปอร์เซ็นต์ มีสัดส่วนช่องขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 28.94, 34.25 และ 39.78 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่สัดส่วนของช่องขนาดกลาง ($30\text{--}0.2 \mu\text{m}$) ไม่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลส โดยพบว่า สัดส่วนของช่องขนาดกลางในทุกระดับความเข้มข้นมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 21.34–22.77 เปอร์เซ็นต์ สำหรับสัดส่วนของช่องขนาดเล็ก ($< 0.2 \mu\text{m}$) พบว่า มีค่าลดลงตามความเข้มข้นนาโนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนช่องขนาดเล็กมีค่าสูงสุดที่ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ (50.27 เปอร์เซ็นต์) และมีค่าต่ำสุดที่ความเข้มข้น 4 เปอร์เซ็นต์ (38.72 เปอร์เซ็นต์) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ปริมาณนาโนเซลลูโลสที่มากขึ้นสามารถส่งเสริมการเกาะยึดกันของอนุภาคดินเหนียวจน

เกิดเป็นเม็ดดินและส่งผลให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ในดินชนิดนี้เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kalkan (2011) ที่ศึกษาผลกระทบการเปียกสลับแห้งต่อการยึดตัวของดินเหนียว รายงานว่า การเปียกสลับแห้งตามธรรมชาติมีผลต่อการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของดิน และมีช่องว่างขนาดใหญ่ในดินเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนนี้จะเกิดขึ้นหลังจากการเปียกสลับแห้งมากกว่า 3 รอบขึ้นไป ในงานวิจัยของ Bodner et al. (2013) ที่รายงานว่า วัฏจักรการเปียกสลับแห้งของดินมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติและกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของดิน ซึ่งความถี่ของรอบการเปียกสลับแห้งคือ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการกระจายขนาดของช่องในดิน จำนวนรอบของสภาพเปียกสลับแห้งที่เพิ่มขึ้นช่วยส่งเสริมการเกิดช่องขนาดใหญ่ในดินได้ Tang et al. (2011) ได้ทำการตรวจสอบผลของการเปียกสลับแห้งจำนวน 5 รอบ ต่อการเกิดรอยแตกในชั้นดินเหนียวในห้องปฏิบัติการ ผลการทดลองพบว่า การเปียกสลับแห้งหลาย ๆ รอบ ส่งผลต่อการเกิดรอยแตกในชั้นดินเหนียว จำนวนรอบของการเปียกสลับแห้งก็ส่งผลต่อขนาดและความลึกของรอยแยกนั้นเช่นกัน ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนช่องขนาดใหญ่ในดินเหนียว

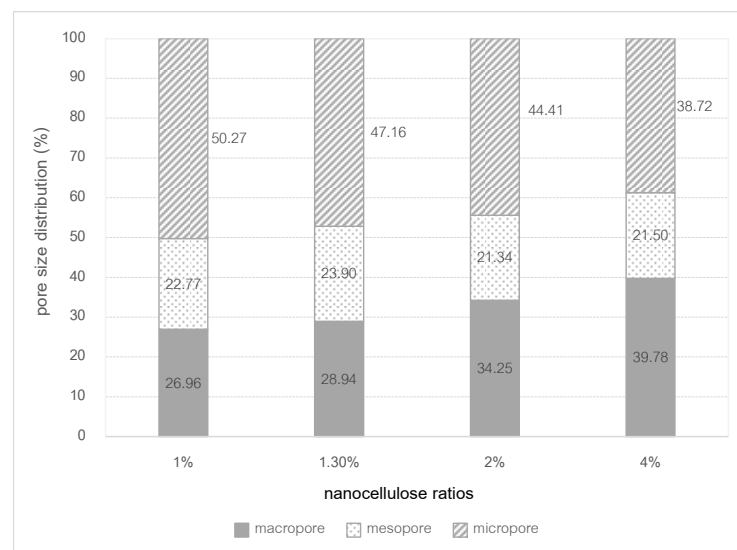


Figure 1 Pore size distribution of fine-textured soil under wetting-drying cycle; macropore ($> 30 \mu\text{m}$), mesopore ($30\text{--}0.2 \mu\text{m}$) and micropore ($< 0.2 \mu\text{m}$).

สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า นาโนเซลลูโลสมีสมบัติช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำของดินเนื้อละเอียดได้ ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสที่สูง (2 และ 4 เปอร์เซ็นต์) ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินเพิ่มขึ้นมากกว่าความเข้มข้นที่ต่ำ (1 และ 1.3 เปอร์เซ็นต์) ส่วนสภาพการเปียกสลับแห้งมีอิทธิพลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำของดินเพียงเล็กน้อย โดยที่ความสามารถในการอุ้มน้ำของดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อสภาพการเปียกสลับแห้งหลายรอบ ในกรณีของสภาวะการเกิดเม็ดดิน พบว่า นาโนเซลลูโลสส่งเสริมการเกิดสภาวะเม็ดดินหรือโครงสร้างดินที่ดีในดินเนื้อละเอียด โดยที่ความเข้มข้นของนาโนเซลลูโลสสูง (2 และ 4 เปอร์เซ็นต์) ส่งผลต่อการเกิดสภาวะเม็ดดินและทำให้เม็ดดินมีความคงทนต่อการสลายตัวในน้ำ ส่วนสภาพเปียกสลับแห้ง พบว่ามีอิทธิพลต่อการเกิดสภาวะเม็ดดิน ผลการทดลองชี้ว่า ถ้าจำนวนรอบของการเปียกสลับแห้งมากขึ้น จะส่งผลต่อสภาวะการเกิดเม็ดดินและความคงทนของเม็ดดินลดลง นอกจากนี้ นาโนเซลลูโลสยังสามารถเพิ่มสัดส่วนของช่องขนาดใหญ่ในดินเนื้อละเอียดได้ด้วย ดังนั้นนาโนเซลลูโลสสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นสารปรับปรุงบำรุงดินเนื้อละเอียดได้ โดยทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมอนุภาคดินให้เกาะยึดกันเป็นเม็ดดินที่คงทน แข็งแรง และส่งผลให้ดินเนื้อละเอียดมีโครงสร้างดินที่ดี มีการระบายน้ำและอากาศดีขึ้นด้วย หากมีการขยายผลการศึกษาการใช้วัสดุนาโนเซลลูโลสร่วมกับการไถพรวนที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดสภาพการเปียกสลับแห้งที่สมดุล อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการจัดการโครงสร้างของดินเนื้อละเอียดได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ บริษัท ภัทร จำกัด ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัยและผลิตภัณฑ์นาโนเซลลูโลส ขอบพระคุณภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่สนับสนุนห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ของดินสำหรับการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2541. *ปฐพีวิทยาเบื้องต้น*. พิมพ์ครั้งที่ 9. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พิมพ์นธ์ เจริญสวัสดิพงษ์. 2549. *สมบัติและสภาวะทางฟิสิกส์ของดิน*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สัญชัย ภูเงิน. 2558. *คู่มือปฏิบัติการ วิชาการวิเคราะห์ดินทางฟิสิกส์*. นครปฐม: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- Abitbol, T., Rivkin, A., Cao, Y., Nevo, Y., Abraham, E., Ben-Shalom, T., Lapidot, S., and Shoseyov, O. 2016. Nanocellulose, a tiny fiber with huge applications. *Current Opinion in Biotechnology* 39: 76-88.
- Bauli, C.R., Lima, G.F., de Souza, A.G., Ferreira, R.R., and Rosa, D.S. 2021. Eco-friendly carboxymethyl cellulose hydrogels filled with nanocellulose or nanoclays for agriculture applications as soil conditioning and nutrient carrier and their impact on cucumber growing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 623: 126771. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126771> (8 September 2021).
- Bodner, G., Scholl, P., and Kaul, H.P. 2013. Field quantification of wetting–drying cycles to predict temporal changes of soil pore size distribution. *Soil & Tillage Research* 133(2013): 1-9.
- Cao, Y., Wang, B., Guo, H., Xiao, H., and Wei, T. 2017. The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the loess plateau. *Ecological Engineering* 102(2017): 270-279.
- Choudhary, M.I., Shalaby, A.A., and Al-Omran, A.M. 1995. Water holding capacity and evaporation of calcareous soils as affected by four synthetic polymers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 26(13-14): 2205-2215.
- Demitri, C., Scalera, F., Madaghiele, M., Sannino, A., and Maffezzoli, A. 2013. Potential of cellulose-based superabsorbent hydrogels as water reservoir in agriculture. *International Journal of Polymer Science* 2013: 1-6.
- Field, D. J., McKenzie, D. C., and Koppi, A. J. 1997. Development of an improved vertisol stability test for SOILpak. *Australian Journal of Soil Research* 35: 843-852.
- Hazelton, P., and Murphy, B. 2007. Water-holding properties. In *Interpreting Soil Test Results: What do all the numbers mean?*. Australia: CSIRO Publishing.
- Jiang, F., and Hsieh, Y. 2014. Super water absorbing and shape memory nanocellulose aerogels from TEMPO-oxidized cellulose nanofibrils via cyclic freezing–thawing. *Journal of Materials Chemistry A* 2: 350-359.
- Kalkan, E. 2011. Impact of wetting–drying cycles on swelling behavior of clayey soils modified by silica fume. *Applied Clay Science* 52: 345-352.
- Neramtornburi, A., Horpibulsuk, S., Shen, S.L., Chinkulkijniwat, A., Arulrajah, A., and MiriDisfani, M. 2015. Durability against wetting–drying cycles of sustainable lightweight cellular cemented construction material comprising clay and fly ash wastes. *Construction and Building Materials* 77(2015): 41-49.
- Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Xu, G., Abudula, A., and Guan, G. 2018. Nanocellulose: extraction and application. *Carbon Resources Conversion* 1(2018): 32-43.
- Picek, T., Šimek, M., and Šantrúcková, H. 2000. Microbial responses to fluctuation of soil aeration status and redox conditions. *Biology and Fertility of Soils* 31: 315-322.
- Sayem, H. M., and Kong, L. 2016. Effects of drying-wetting cycles on soil-water characteristic curve. In *2016 International Conference on Power Engineering & Energy, Environment (PEEE 2016)* ISBN: 978-1-60595-376-2.
- Sehaqui, H., Zhou, Q., Ikala, O., and Berglund, L.A. 2011. Strong and tough cellulose nanopaper with high specific surface area and porosity. *Biomacromolecules* 12(10): 3638-3644.
- Tang, C. S., Cui, Y. J., Shi, B., Tang, A. M., and Liu, C. 2011. Desiccation and cracking behaviour of clay layer from slurry state under wetting–drying cycles. *Geoderma* 166(2011): 111-118.
- Tang, C. S., Cui, Y. J., Shi, B., Tang, A. M., and An, N. 2016. Effect of wetting-drying cycles on soil desiccation cracking behaviour. In *3rd European Conference on Unsaturated Soils – “E-UNSAT 2016”*. E3S Web of Conferences: Vol. 9, 12003.

Williams, J., Prebble, R. E., Williams, W. T., and Hignett, C. T. 1983. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. *Australian Journal of Soil Research* 21: 15-32.

วันรับบทความ (Received date) : 5 ต.ค. 64

วันแก้ไขบทความ (Revised date) : 11 มี.ค. 65

วันตอบรับบทความ (Accepted date) : 9 พ.ค. 65