

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบ

เพื่อการออกแบบดินกลบขยะของโรงเรียน

นายร้อยพระจุลจอมเกล้า

Preliminary Study for Final Landfill

Cover Design at the Chulachomklao

Royal Military Academy

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้าที่เกี่ยวข้องกับดินกลบขยะ ซึ่งรวมถึงประเภทของดินกลบขยะ ประสิทธิภาพ ในการป้องกันการไหลซึมของน้ำบนดินสู่หลุม กลบขยะ ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพ และราคา ค่าก่อสร้างของดินกลบขยะประเภทต่างๆ ถูกสรุปบทวนจากงานวิจัยที่ผ่านมา ผลจากงานวิจัยเหล่านี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับสภาพภูมิอากาศของโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

(ร.ร.จปร.) เพื่อการออกแบบดินกลบขยะของ ร.ร.จปร. จากการศึกษาเชิงเปรียบเทียบถึง ประสิทธิภาพของดินกลบขยะประเภทต่างๆ ต่อ สภาพภูมิอากาศของ ร.ร.จปร. พบว่า ดินกลบ ขยะแบบกำแพงดินผสมมีประสิทธิภาพสูงสุดและ เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของ ร.ร.จปร.

คำหลัก : ดินกลบขยะ, ประสิทธิภาพ, ราคา ค่า ก่อสร้างการจัดการขยะ

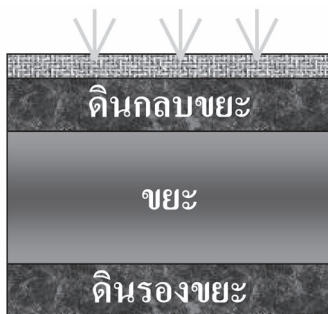
Abstract

Review of past studies of landfill covers was summarized. The review includes types of landfill covers being evaluated, design concepts, equivalency criteria, field performance, factors affecting the field performance, and cost comparison. Findings from literature review were utilized for design of landfill covers at the Chulachomklao Royal Military Academy (CRMA). Preliminary study indicates that the composite cover is the most effective cover in minimizing percolation into the underlying waste for the meteorological conditions at CRMA.

Key words : landfill covers, efficiency, construction cost, waste management

1. บทนำ

ดินกลบขยะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของหลุมกลบขยะซึ่งมีขยะวางบนชั้นดินรองขยะ (รูปที่ 1) โดยดินกลบขยะจะถูกใช้ในการปิดหลุมกลบขยะ เพื่อป้องกันการไหลผ่านของน้ำฝนและน้ำบนดินสู่ขยะและดินรองขยะ ซึ่งอาจทำให้เกิดสารปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำใต้ดินและเป็นอันตรายต่อการอุปโภคบริโภค



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของหลุมกลบขยะ

โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าเป็นสถานศึกษาที่มีสภาพเป็นชุมชนใหญ่ที่เป็นเอกเทศซึ่งมีปริมาณขยะจากครัวเรือน โรงพยาบาล และส่วนราชการต่างๆในพื้นที่ในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก ทว่ายังไม่มีการบริหารและจัดการขยะที่เป็นระบบของตนเอง นอกจากนั้นยังไม่มีข้อกำหนดหรือมาตรฐานเกี่ยวกับการออกแบบดินกลบขยะที่ออกมาเป็นกฎหมายบังคับใช้ในประเทศไทย

องค์การพิทักษ์สิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (United States Environmental Protection Agency: USEPA) ได้ออกข้อกำหนดการออกแบบดินกลบขยะหลักไว้สำหรับการป้องกันไม่ให้น้ำบนดินลงสู่บ่อเก็บขยะ นอกจากดินกลบขยะหลักตามข้อกำหนดแล้ว ทาง USEPA ได้เปิดโอกาสให้ดินกลบขยะทางเลือกที่มีการออกแบบที่แตกต่างจากข้อกำหนดเดิมได้ โดยที่ดินกลบขยะทางเลือกนั้นจะต้องสามารถป้องกันไม่ให้น้ำบนดินลงสู่บ่อเก็บขยะได้เทียบเท่าหรือดีกว่าดินกลบขยะตามข้อกำหนดเดิม⁽¹⁾ ซึ่งในการประเมินประสิทธิภาพของดินกลบขยะทั้งสองประเภทควรใช้เวลาอย่างต่ำ 5 ปี⁽²⁾

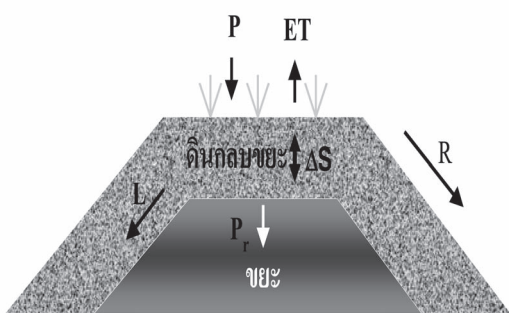
ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินผลประสิทธิภาพของดินกลบขยะที่มีการก่อสร้างในสถานที่ต่างๆ ในโลกมามากพอสมควร ซึ่งค่าปริมาณน้ำที่ไหลผ่านชั้นดินกลบขยะที่วัดได้จากสถานที่ทำการศึกษาวิจัยนั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและประเภทของดินกลบขยะ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ สรุปบททวนงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับ ประเภทของดินกลบขยะ ประสิทธิภาพและราคาค่าก่อสร้างของดินกลบขยะแต่ละประเภท และนำผลของงานวิจัยเหล่านี้มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาถึงประเภทของดินกลบขยะที่เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของ รร.จปร.

2. ความเป็นมา

ชั้นดินกลบขยะอยู่ระหว่างชั้นของขยะกับชั้นบรรยากาศของโลก ดังนั้น ดินกลบขยะจึงต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพดินฟ้าอากาศ อยู่ในสภาพดินที่ไม่อิ่มตัวโดยส่วนใหญ่ และอาศัยปฏิกิริยาระหว่างสภาพภูมิอากาศ มวลดิน และพืชในการป้องกันการไหลซึมของน้ำลงสู่หลุมขยะ

องค์ประกอบทางอุทกวิทยาของดินกลบขยะแสดงไว้ในรูปที่ 2 โดยที่ปริมาณน้ำฝน (P) ที่ตกลงสู่พื้นผิวของดินกลบขยะ ส่วนหนึ่งอาจไหลออกด้านข้าง (R) กลับคืนสู่ชั้นบรรยากาศโลกโดยการระเหยของน้ำในดินและการสังเคราะห์แสงของพืช (ET) และอีกส่วนหนึ่งไหลเข้าสู่ชั้นดินกลบขยะ ซึ่งส่วนหนึ่งก็อาจจะไหลออกทางด้านข้าง (L) ได้อีก ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ชั้นดินกลบขยะทำให้ความจุในการกักเก็บน้ำในชั้นดินกลบขยะ (S) เพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าสู่ชั้นดินกลบขยะมีปริมาณมากกว่าความจุในการกักเก็บน้ำในชั้นดินกลบขยะ น้ำจะไหลผ่านชั้นดินกลบขยะลงสู่ขยะ (P_r)



รูปที่ 2 องค์ประกอบทางอุทกวิทยาของดินกลบขยะ

ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางอุทกวิทยาของดินกลบขยะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta S = P - R - L - P_r - ET \quad (1)$$

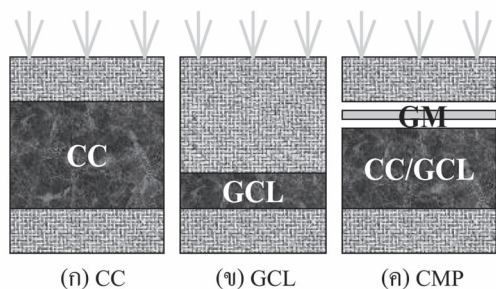
โดยที่ ΔS คือ ปริมาณที่เปลี่ยนแปลงของความจุในการกักเก็บน้ำในชั้นดินกลบขยะ

2.1 ประเภทของดินกลบขยะ

ดินกลบขยะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ดินกลบขยะหลักของ USEPA และดินกลบขยะทางเลือก โดยที่ดินกลบขยะทางเลือกที่ใช้ในปัจจุบันคือดินกลบขยะตามหลักสมดุลของน้ำ ดินกลบขยะทั้ง 2 ประเภทใช้หลักการออกแบบที่แตกต่างกัน

ดินกลบขยะหลักถูกออกแบบเสมือนกำแพงกันน้ำ โดยพยายามทำให้ปริมาณน้ำบนดินถูกปิดออกทางด้านข้างให้มากที่สุด เพื่อที่จะได้ให้มีปริมาณน้ำไหลผ่านดินกลบขยะในแนวตั้งให้น้อยที่สุด รูปแบบต่างๆของดินกลบขยะหลักถูกแสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยที่ดินกลบขยะแบบกำแพงดินกันน้ำอาจเป็นดินเหนียวอัดแน่น (Compacted Clay Barrier: CC) (รูปที่ 3ก) ดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Geosynthetic Clay Liner: GCL) (รูปที่ 3ข) หรือดินกลบขยะแบบกำแพงดินผสม (Composite Cover: CMP) โดยที่ดินกลบขยะแบบกำแพงดินผสม ประกอบด้วยแผ่นพลาสติกหนาปกคลุมบนชั้นของดินเหนียวอัดแน่น หรือดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (รูปที่ 3ค) ซึ่งการเลือกประเภทของดินกลบขยะหลักนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของดินกลบขยะตามหลักสมดุลของน้ำ อาศัยขบวนการทางธรรมชาติและปฏิกิริยาระหว่างสภาพภูมิอากาศ มวลดิน และพืชในการป้องกันการไหลซึมของน้ำลงสู่หลุมขยะ โดยอาศัยความสามารถในการกักเก็บน้ำของชั้นดิน

อนุภาคเล็ก (Fine-textured soils) ในช่วงฤดูฝน และความสามารถในการปลดปล่อยน้ำกลับสู่ชั้นบรรยากาศในช่วงฤดูแล้ง โดยขบวนการระเหย และการสังเคราะห์แสงของพืช⁽³⁾

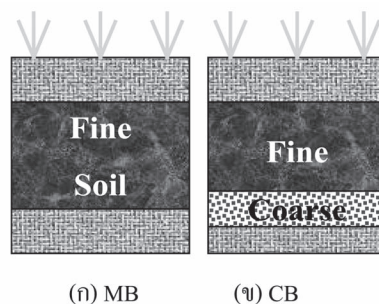


รูปที่ 3 รูปแบบของดินกลบขยะหลักแบบกำแพงกันน้ำดินรองขยะ⁽¹⁾

รูปแบบของดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4 ซึ่งอาจถูกออกแบบเป็นดินกลบขยะชั้นดินชนิดเดียวล้วน (Monolithic Barrier: MB) (รูปที่ 4ก) หรือดินกลบขยะชั้นดินซ้อน (Capillary Barrier: CB) (รูปที่ 4ข) โดยที่ดินกลบขยะแบบชั้นดินซ้อนประกอบด้วยชั้นดินอนุภาคเล็ก (Fine-textured soils) อยู่บนชั้นดินอนุภาคใหญ่ (Coarse-textured soils) ซึ่งจะให้เกิดแรงต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นจากขบวนการ Capillary และโดยทางทฤษฎีจะทำให้ความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้น^(4, 5) อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นของดินกลบขยะแบบชั้นดินซ้อนอาจแตกต่าง ขึ้นอยู่กับชนิดของดินอนุภาคเล็ก⁽²⁾

2.2 ประสิทธิภาพของดินกลบขยะ

ที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินผลประสิทธิภาพของดินกลบขยะที่มีการก่อสร้างในสถานที่ต่างๆทั่วโลกมามากพอสมควร แต่โดยส่วนมากพื้นที่ศึกษาจะอยู่ ณ ตำแหน่งเดียว ซึ่งไม่สามารถบ่งชี้ประสิทธิภาพของดินกลบขยะได้อย่างชัดเจนโดยภาพรวม เนื่องจากแต่ละพื้นที่



รูปที่ 4 รูปแบบของดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำ

ศึกษามีสภาพภูมิอากาศและการออกแบบที่แตกต่างกัน

ผู้เขียนได้ทำการศึกษาดังประสิทธิผลในการป้องกันการไหลซึมของน้ำลงสู่หลุมกลบขยะโดยรวบรวมงานวิจัยการศึกษาประสิทธิผลของดินกลบขยะทั้งจากโครงการ The Alternative Cover Assessment Program (ACAP) ของ USEPA และจากงานวิจัยโครงการอื่นๆ ทั่วโลก โดยเลือกเฉพาะดินกลบขยะที่ใช้ดินตามธรรมชาติ และที่มีการวัดค่าการไหลซึมออกของน้ำโดยตรงเท่านั้น เพื่อบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของดินกลบขยะที่แท้จริง โดยมีดินกลบขยะแบบกำแพงกันน้ำ 12 ตัวอย่างและดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำจากโครงการ ACAP 15 ตัวอย่าง และ 32 ดินกลบขยะแบบกำแพงกันน้ำและ 36 ดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำจากโครงการอื่นๆ ทั่วโลก ช่วงปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยต่อปี และประสิทธิผลในการป้องกันการไหลซึมของน้ำผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝน แสดงไว้ในตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 เห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพของดินกลบขยะแต่ละประเภทสูงมากกว่า 90% และมีความแตกต่างกันน้อยกว่า 8% โดยที่ดินกลบขยะแบบกำแพงดินผสม (CMP) มีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพในการป้องกันการไหลซึมของน้ำผ่านสูงสุด (99.8%) เมื่อเทียบกับดินกลบขยะประเภทอื่นๆ

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบถึงช่วงของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยต่อปี และประสิทธิผลในการป้องกันการไหลซึมของน้ำผ่านดินกลบขยะเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝน พบว่ามีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ยกตัวอย่างเช่น ช่วงของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยต่อปีน้อยกว่า 5 มม./ปี และช่วงของค่าประสิทธิผลน้อยกว่า 1% ของดินกลบขยะแบบกำแพงดินผสม (CMP) ขณะที่ช่วงของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยต่อปีแตกต่างกันถึง 375 มม./ปี และช่วงของค่าประสิทธิผลมีความแตกต่างกันถึง 78.2% สำหรับดินกลบขยะดินชนิดเดียวกัน ความแตกต่างของช่วงประสิทธิผลของดินกลบขยะแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อประสิทธิผลของดินกลบขยะ

ตารางที่ 1 ช่วงปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยต่อปี และประสิทธิผลในการป้องกันการไหลซึมของน้ำผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝน⁽²⁾

ประเภทของดินกลบขยะ	ช่วงปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยต่อปี (มม./ปี)	ประสิทธิผลในการป้องกันการไหลซึมของน้ำผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝน (%)
CC	0-241	94.1 (73.2-100)
GCL	0-142	92.5 (83.2-100)
CMP	0-5	99.8 (99.3-100)
MB	0-375	92.0 (21.8-100)
CB	0-358	96.5 (64.1-100)

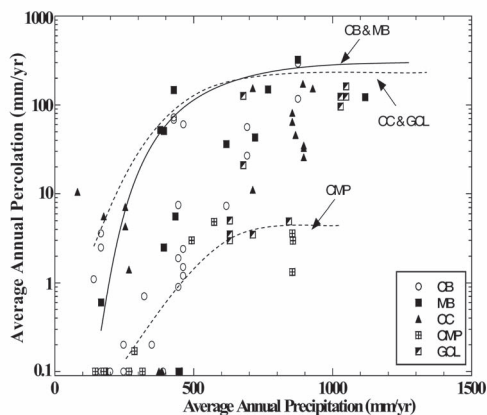
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิผลของดินกลบขยะ

2.3.1 สภาพภูมิอากาศ

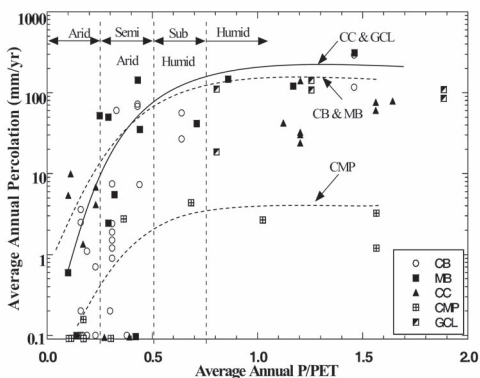
หนึ่งในค่าดัชนีหลักทางภูมิอากาศที่มีผลกระทบต่อประสิทธิผลในการป้องกันการไหลซึมของน้ำลงสู่หลุมกลบขยะคือ ปริมาณน้ำฝน และอัตราส่วนค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนต่อศักยภาพในการปลดปล่อยน้ำกลับสู่ชั้นบรรยากาศ (P/PET)

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะจากดินกลบขยะแต่ละประเภท กับ ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนต่อปี (P_o) และอัตราส่วนค่าเฉลี่ยต่อปีของ P/PET_o ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ โดยที่กราฟเส้นประและเส้นทึบในรูปที่ 5 และ 6 เป็นค่า 95th percentile ของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะจากดินกลบขยะแต่ละประเภทเฉลี่ยต่อช่วง 100 มม./ปี ของปริมาณน้ำฝน และต่อช่วง P/PET_o ทุกๆ 0.25

ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะจากดินกลบขยะดินเหนียวอัดแน่นและดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นโพลีเอทิลีน แสดงเป็นเส้นเดียวกัน ขณะที่ปริมาณน้ำจากดินกลบขยะชั้นดินชนิดเดียวและชั้นดินซ้อน แสดงเป็นเส้นเดียวกัน เนื่องจากมีค่าที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนั้นข้อมูลในรูปที่ 6 ยังถูกแบ่งตามสภาพภูมิอากาศตามข้อกำหนดของ UNESCO⁽⁶⁾ (แห้งแล้ง (Arid): $P/PET_o < 0.25$, ค่อนข้างแห้งแล้ง (Semi-arid): $0.25 < P/PET_o < 0.50$, ค่อนข้างชุ่มชื้น (Sub-humid): $0.50 < P/PET_o < 0.75$, และชุ่มชื้น (Humid): $P/PET_o > 0.75$) ซึ่งแสดงโดยเส้นประในแนวดิ่งในรูปที่ 6



รูปที่ 5 ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะจากดินกลบขยะแต่ละประเภทกับค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนต่อปี



รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะจากดินกลบขยะแต่ละประเภทกับอัตราส่วนค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนต่อศักยภาพในการปลดปล่อยน้ำกลับสู่ชั้นบรรยากาศ

โดยทั่วไปค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะจากดินกลบขยะทุกประเภทเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณน้ำฝนหรืออัตราส่วน P/PET_0 เพิ่มขึ้น (สภาพภูมิอากาศชุ่มชื้นมากขึ้น) ข้อมูลในรูปที่ 5 ยังบอกถึงว่า $P = 250$ มม./ปี และ $P/PET_0 = 0.15$ สำหรับดินกลบขยะแบบกึ่งดินผสม และ $P = 200$ มม./ปี และ $P/PET_0 = 0.10$ สำหรับ

ดินกลบขยะแบบดินชนิดเดียวล้วนและดินกลบขยะแบบชั้นดินซ้อน เป็นค่าที่น้อยที่สุดที่น้ำสามารถผ่านดินกลบขยะได้ ขณะที่ข้อมูลของดินกลบขยะแบบกึ่งดินเหนียวอัดแน่นและดินกลบขยะแบบกึ่งดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ ไม่สามารถบ่งชี้ถึงค่าที่น้อยที่สุดที่น้ำสามารถผ่านดินกลบขยะได้ อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะแบบกึ่งดินเหนียวอัดแน่นและดินกลบขยะแบบกึ่งดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ในพื้นที่ที่มีความแห้งแล้ง ($P < 200$ มม./ปี และ $P/PET_0 = 0.0$) มีค่าน้อยกว่า 10 มม./ปี

นอกจากนั้น ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะจากดินกลบขยะทุกประเภทแปรผันกับค่า P และ P/PET_0 ในสภาพภูมิอากาศที่แห้งแล้งมากกว่า ($P < 500$ มม./ปี และ $P/PET_0 < 0.5$) (รูปที่ 6) โดยที่ค่าปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะสามารถแตกต่างกันได้มากถึงกว่า 100 เท่า และจะค่อนข้างคงตัวเมื่อ $P > 250$ มม./ปี และ $P/PET_0 > 0.15$

นอกจากค่า P และ P/PET_0 แล้ว ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะจากดินกลบขยะยังขึ้นอยู่กับช่วงฤดูที่ฝนตก ปริมาณหิมะที่ตกและละลายพร้อมกับฝนที่ตกในฤดูใบไม้ผลิ สภาพอากาศชื้นแบบชายทะเลซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในรอบปีค่อนข้างน้อย^(2, 7, 8)

2.3.2 ประเภทของดินกลบขยะ

สำหรับดินกลบขยะแบบกึ่งดินเหนียวอัดแน่น ปริมาณน้ำที่ต่ำมากที่สุดที่ไหลผ่านดินกลบขยะแบบกึ่งดินผสมบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการป้องกันน้ำที่สูงของแผ่นพลาสติกหนา^(9, 10, 11) ขณะที่ปริมาณน้ำที่สูงมากกว่าที่ไหลผ่านดินกลบขยะแบบกึ่งดินเหนียวอัดแน่นและดินกลบขยะ

แบบกำแพงดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นโพลีเอทิลีนที่เกิดจากค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในดินเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไป^(11, 12) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำในดินเหนียวเพิ่มขึ้นของชั้นดินเหนียวอัดแน่น เกิดจากรอยแยกของดินเหนียวที่เกิดในช่วงอากาศที่แห้งแล้ง การแข็งตัวของดินจากอากาศที่เย็นจัด หรือการขยายตัวของรากพืช ทำให้น้ำไหลผ่านรอยแยกโดยตรง (preferential flow)^(11, 12, 13, 14, 15) ขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การไหลซึมของน้ำที่เพิ่มขึ้นของชั้นดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นโพลีเอทิลีนที่เกิดจากรอยแยกของดินเหนียวและการแลกเปลี่ยนประจุบวกบนพื้นผิวดิน⁽¹¹⁾

สำหรับปริมาณน้ำที่สูงที่ไหลผ่านดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำ ทั้งแบบดินชนิดเดียวล้วนและดินกลบขยะแบบชั้นดินซ้อน อาจเกิดจากการออกแบบที่มีความสามารถในการกักเก็บน้ำที่น้อยเกินไป มีความเอียงทางลาดน้อยเกินไป การไม่ปลูกพืชคลุมดิน^(9, 16, 17, 18) หรือเกิดจากประสิทธิภาพของพืชในการดึงน้ำออกจากดินกลบขยะที่มีพืชปกคลุมลดลง ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณน้ำฝนที่ตกมาก ประกอบกับการระบายน้ำของดินไม่ดี หรือเกิดจากสภาพที่แห้งแล้งจัด⁽²⁾

ผู้เขียนได้ทำการศึกษาถึงผลกระทบของสภาพภูมิอากาศและการออกแบบของดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำ ต่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะทั้งแบบดินชนิดเดียวล้วนและดินกลบขยะแบบชั้นดินซ้อน และได้คิดค้นสมการในการประมาณค่าปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำโดยใช้วิธีทางสถิติแบบ Stepwise regression ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \log P_r = & 0.334 + 0.021 P_a^{1/2} - 0.0018 (1858 - 2.58RH_a) \\ & + 0.494 P_{ss} + 0.111 P_a^{1/2} S_p \\ & + 0.0019 P_a P/PET_a - 0.119 S_a/S_r \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ P_r คือ ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะต่อปี P_a คือ ปริมาณน้ำฝนต่อปี P/PET_a คือ อัตราส่วนปริมาณน้ำฝนต่อปริมาณน้ำที่ไหลออกจากดินกลบขยะจากการระเหยของน้ำในดินและการสังเคราะห์แสงของพืชในหนึ่งปี RH_a คือ ค่ารวมของความชื้นสัมพัทธ์ในแต่ละวันต่อปี P_{ss} คือ ปริมาณน้ำที่ละลายจากหิมะและฝนที่ตกในช่วงฤดูใบไม้ผลิในรอบหนึ่งปี โดยที่ $P_{ss} = 1$ (ถ้าไม่มีหิมะ), 2 (ถ้าหิมะและฝนน้อยกว่า 200 มม./ปี), 3 (ถ้าหิมะและฝนอยู่ระหว่าง 200-300 มม./ปี) และ 4 (ถ้าหิมะและฝนมากกว่า 300 มม./ปี) และ S_p คือ ฤดูของฝน โดยที่ S_p เท่ากับ 1 ถ้าฝนส่วนมากตกในฤดูใบไม้ร่วงและฤดูหนาว (ธ.ค.-เม.ย.) และเท่ากับ 0 ถ้าฝนส่วนมากตกในฤดูใบไม้ผลิและฤดูร้อน (พ.ค.-พ.ย.) หรือ ตกตลอดปี S_a คือ ความสามารถในการกักเก็บน้ำของดินกลบขยะ S_r คือ ความจุน้ำชั้นต่ำที่ดินกลบขยะควรมี

สมการ (2) มีข้อจำกัดในการใช้กับสภาพภูมิอากาศที่มีค่า $P/PET_a < 1.14$ หรือค่า $P_a < 1500$ มม./ปี สำหรับพื้นที่ที่มีฝนตกชุกในช่วงฤดูใบไม้ร่วงและฤดูหนาว จะใช้ได้กับค่า $P_a < 546$ มม./ปี อันเนื่องมาจากจำนวนข้อมูลที่มีจำกัด

2.4 ราคาค่าก่อสร้าง

Dwyer ได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างดินกลบขยะขนาด 13 x 50 ม. ที่มีการออกแบบต่างชนิดกันจำนวน 6 ประเภทในโครงการวิจัยชื่อ The Alternative Landfill Cover Demonstration (ALCD) ที่ Sandia

National Laboratory มลรัฐนิวเม็กซิโก สหรัฐอเมริกา⁽¹⁹⁾

ดินกลบขยะทั้ง 6 ประเภทประกอบด้วยดินกลบขยะแบบดินเหนียวบดอัดแน่น (CC) หนา 600 มม. ดินกลบขยะแบบกึ่งดินผสมดินเหนียวบดอัดแน่น (CMP-CC) หนา 1500 มม. ดินกลบขยะแบบกึ่งดินผสมดินเหนียวบดอัดแน่นหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (CMP-GCL) หนา 900 มม. ดินกลบขยะแบบชั้นดินซ้อน (CB1) หนา 1420 มม. และ (CB2) หนา 1050 มม. และดินกลบขยะแบบดินชนิดเดียวล้วน (MB) หนา 1080 มม. รายละเอียดของดินกลบขยะแต่ละประเภทสามารถหาได้จากรายงานของ Dwyer⁽¹⁹⁾

ราคาค่าก่อสร้างต่อหนึ่งหน่วยตารางเมตรของดินกลบขยะแต่ละประเภทถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยราคาค่าก่อสร้างที่แสดงในตารางที่ 2 นี้ไม่รวมราคาของเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆ เมื่อเปรียบเทียบราคาค่าก่อสร้างของดินกลบขยะทั้งหมดพบว่า ดินกลบขยะแบบกึ่งดินผสมมีราคาแพงที่สุด (USD 157.58 สำหรับดินกลบขยะแบบกึ่งดินผสมดินเหนียวบดอัดแน่นหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ และ USD 92.89 สำหรับดินกลบขยะแบบกึ่งดินผสมดินเหนียวบดอัดแน่น) รองลงมาเป็นดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำ (USD 72.66-96.45) ขณะที่ดินกลบขยะแบบดินเหนียวบดอัดแน่นมีราคาค่าก่อสร้างถูกที่สุด (USD 52.42)

ตารางที่ 2 ราคาค่าก่อสร้างดินกลบขยะประเภทต่างๆ ต่อหนึ่งหน่วยตารางเมตร⁽¹⁹⁾

ดินกลบขยะ	ประเภทของดินกลบขยะ	ราคาค่าก่อสร้าง (ดอลลาร์สหรัฐ/ตร.ม.)
1	CC	52.42
2	CMP-CC	92.89
3	CMP-GCL	157.58
4	CB1	96.45
5	CB2	74.92
6	MB	72.66

3. พื้นที่ศึกษา

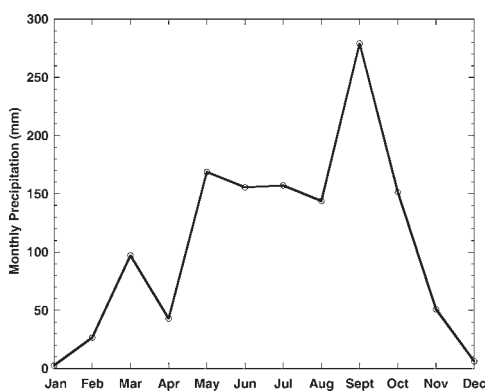
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้าตั้งอยู่ที่ ต.พรหมณี อ.เมือง จ.นครนายก สภาพภูมิอากาศโดยประมาณของ รร.จปร. ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 3 ขณะที่ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนต่อเดือนของ รร.จปร. ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 7 ข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากสถานีของกรมอุตุนิยมวิทยาที่

ตารางที่ 3 สภาพภูมิอากาศโดยประมาณของ รร.จปร.

ดัชนีภูมิอากาศ	ค่าเฉลี่ย	ค่าสูงสุด
ปริมาณน้ำฝนต่อปี (มม./ปี)	1400	1818
PET (มม./ปี)	1350	1200
P/PET	1.04	1.51
อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	29.2 (24.2-34.1)	
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	71.8 (53.8-89.7)	
ความชื้นสัมพัทธ์สะสม (วัน)	262 (196-326)	

จังหวัดปทุมธานี ซึ่งเป็นสถานที่ใกล้เคียงกับ รร.จปร. ที่สุด และเป็นข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2543-2549 ขณะที่ค่าเฉลี่ยของ PET มาจาก GRID-Geneva, UNESCO (1994)

จากตารางที่ 3 รร.จปร. ถือว่าตั้งอยู่ในสภาพภูมิอากาศชุ่มชื้น ($P/PET > 0.75$) ตามหลักเกณฑ์ของ UNESCO นอกจากนั้น โดยทั่วไป รร.จปร. จะมีปริมาณน้ำฝนตกหนักในช่วงระหว่างเดือน พ.ค. ถึง เดือน ต.ค. (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนต่อเดือนของ รร.จปร.

ปริมาณขยะของ รร.จปร. โดยเฉลี่ยมีประมาณ 12 ตันต่อวัน โดยที่ 61% ของปริมาณขยะทั้งหมดเป็นเศษอาหาร, 14% เป็นพลาสติก, และ 8% เป็นกระดาษ ขณะที่ปริมาณของแก้ว โลหะ กิ่งไม้ และวัสดุอื่นๆ มีน้อยกว่า 5% ของปริมาณขยะทั้งหมด⁽²⁰⁾

การจัดการขยะของ รร.จปร. มีการดำเนินการเป็นลักษณะการนำไปทิ้งที่อื่น โดยใช้รถบรรทุกขนขยะจำนวน 2 คัน ทำการเก็บขยะจากบ้านพักและส่วนราชการต่างๆ ของ รร.จปร. จากเส้นทาง 2 เส้นทาง ภายใน รร.จปร. และนำไปทิ้งที่หลุมกลบขยะที่ อบต. พรหมณี จ. นครนายก และที่ จ. ปราจีนบุรี โดยทำการเก็บขยะวันละหนึ่งรอบต่อวัน ทุกๆ วันยกเว้นวันเสาร์ ราย

ละเอียดของเส้นทางการเก็บขยะภายใน รร.จปร. สามารถหาได้จาก⁽²⁰⁾

ค่าใช้จ่ายในการเก็บและขนขยะของ รร.จปร. เป็นค่าน้ำมันของรถบรรทุกขนขยะจาก รร.จปร. ไปที่หลุมกลบขยะที่ อบต. พรหมณี และที่ จ. ปราจีนบุรี โดยมีระยะทางขนส่งไปกลับประมาณ 20 กม. ซึ่งใช้น้ำมันประมาณ 5 ลิตร/วัน สำหรับเส้นทาง รร.จปร. - อบต. พรหมณี และประมาณ 120 กม. ซึ่งใช้น้ำมันประมาณ 30 ลิตร/วัน สำหรับเส้นทาง รร.จปร.-ปราจีนบุรี นอกจากนั้น ยังมีค่าธรรมเนียมในการทิ้งขยะอีก 2000 บาท/เดือน

ปัญหาของการจัดการขยะที่มีการดำเนินการอยู่ในปัจจุบันของ รร.จปร. มีคือ สถานที่ที่นำขยะไปทิ้งและมาตรฐานของหลุมกลบขยะ ซึ่งสถานที่ที่นำขยะไปทิ้งไม่สามารถรองรับปริมาณขยะจาก รร.จปร. ได้ โดยในปัจจุบันจะใช้สถานที่ทิ้งขยะที่ อบต. พรหมณี เท่านั้น ซึ่งในบางช่วงก็ไม่สามารถรองรับปริมาณขยะจาก รร.จปร. ได้ ทำให้ต้องนำขยะไปทิ้งในพื้นที่ด้านหลังสนามกอล์ฟของ รร.จปร. นอกจากนั้นสถานที่ที่ทิ้งขยะในแต่ละที่ไม่ได้มีการออกแบบทางวิศวกรรม ซึ่งทำให้สถานที่ที่ทิ้งขยะเหล่านี้อาจเป็นแหล่งของสารพิษที่ลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน

4. ผลการประยุกต์ใช้ผลงานวิจัยที่ผ่านมาในการออกแบบดินกลบขยะของ SS.จปร.

ในการออกแบบดินกลบขยะของ รร.จปร. ประเภทของดินกลบขยะจะถูกเลือกโดยการประยุกต์ใช้ผลงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับประสิทธิภาพและราคาของดินกลบขยะต่อสภาพภูมิอากาศของ รร.จปร.

ปริมาณน้ำที่คาดว่าจะไหลผ่านดินกลบขยะประเภทต่างๆ ที่ รร.จปร. ถูกแสดงไว้ในตารางที่

4 ซึ่งหามาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะต่อปีกับค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำฝนและอัตราส่วน P/PET₀ (รูปที่ 5 และ 6) โดยใช้เส้น 95th Percentile ของปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะต่อปีแต่ละประเภท และจากการใช้สมการ (2) โดยสมมติให้ดินกลบขยะถูกออกแบบมาให้มีความสามารถในการกักเก็บน้ำได้อย่างเพียงพอ ($\frac{S_a}{S^2} = 1$) ขณะที่ค่าของสภาพภูมิอากาศของ รร.จปร. จะใช้ค่าจากตารางที่ 3 โดยทั่วไปดินกลบขยะจะถูกออกแบบโดยใช้ค่าที่สูงสุดของสภาพภูมิอากาศ แต่เนื่องจากค่าสูงสุดของปริมาณน้ำฝนและอัตราส่วน P/PET₀ ของ รร.จปร. มากกว่าช่วงที่สามารถใช้สมการ (2) และปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะที่ได้จากรูปที่ 5 และ 6 โดยใช้ค่าสูงสุดมีค่าเท่ากับค่าที่ได้โดยใช้ค่าเฉลี่ย ดังนั้น จึงใช้ค่าเฉลี่ยสภาพภูมิอากาศของ รร.จปร. ในการออกแบบดินกลบขยะ

ปริมาณน้ำที่น้อยที่สุดที่ไหลลงสู่หลุมกลบขยะที่ รร.จปร. ที่ได้จากรูปที่ 5 และ 6 มาจากดินกลบขยะแบบกึ่งแฉกดินผสม (3.5-4.0 มม./ปี) รองลงมา มาจากดินกลบขยะแบบดินเหนียวบดอัดแน่นหรือดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (160-200 มม./ปี) และดินกลบขยะแบบชั้นดินชนิดเดียวล้วนหรือชั้นดินซ้อน (210-250 มม./ปี) ขณะที่ปริมาณน้ำที่คาดว่าจะไหลผ่านดินกลบขยะแบบชั้นดินชนิดเดียวล้วนหรือชั้นดินซ้อนที่ได้จากสมการ (2) เท่ากับ 133 มม./ปี

สาเหตุที่ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะตามหลักสมมูลของน้ำที่ได้จากสมการ (2) น้อยกว่าที่ได้จากจุดตัดระหว่างเส้น 95th Percentile กับปริมาณน้ำฝนและอัตราส่วน P/PET₀ ในตารางที่ 4 อาจเนื่องมาจากผลกระทบของปัจจัยอื่นๆ ทางภูมิอากาศที่ใช้ในสมการ (2) และความผันผวนของตัวเลขที่สูงของ log scale

จากปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะในตารางที่ 4 จะเห็นว่าดินกลบขยะแบบกึ่งแฉกดินผสมมีประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันปริมาณน้ำที่ไหลผ่านลงสู่หลุมกลบขยะ ถึงแม้ว่าดินกลบขยะประเภทนี้จะมีราคาค่าก่อสร้างสูงกว่าดินกลบขยะ แบบดินเหนียวบดอัดแน่น ดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ ดินกลบขยะแบบชั้นดินชนิดเดียวล้วนหรือชั้นดินซ้อน ถึง 2-3 เท่า (ตารางที่ 2) แต่เนื่องจากปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะเหล่านี้สูงมากกว่า 200 มม./ปี ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงอัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพในการป้องกันปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะต่อราคาค่าก่อสร้าง (Cost-Performance Analysis) จึงไม่จำเป็นต้องทำ และอาจสรุปได้ว่า ดินกลบขยะแบบกึ่งแฉกดินผสมมีประสิทธิภาพดีที่สุดและมีความเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของ รร.จปร.

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำที่คาดว่าจะไหลผ่านดินกลบขยะลงสู่หลุมเก็บขยะของ รร.จปร.

ประเภทของดินกลบขยะ	ปริมาณน้ำที่ไหลผ่านดินกลบขยะโดยเฉลี่ยต่อปี (มม./ปี)		
	P	P/PET	สมการ (2)
CMP	3.5	4.0	-
CC/GCL	200	160	-
CB/MB	250	210	133

5. สรุป

ประเภทของดินกลบขยะ ราคาค่าก่อสร้าง ประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของดินกลบขยะประเภทต่างๆ ถูกสรุปบททวนจากงานวิจัยที่มีการศึกษาค้นคว้าที่ผ่านมา และนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการออกแบบดินกลบขยะของ รร.จปร.

ดินกลบขยะที่มีการออกแบบและค้นคว้าวิจัยประกอบด้วย ดินกลบขยะแบบดินเหนียวบดอัดแน่น ดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ ดินกลบขยะแบบชั้นดินชนิดเดียวล้วนหรือชั้นดินซ้อน และดินกลบขยะแบบกำแพงดินผสม

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของดินกลบขยะประเภทต่างๆ ประกอบด้วยสภาพภูมิอากาศและองค์ประกอบของดินกลบขยะแต่ละประเภท โดยที่ดินกลบขยะแบบกำแพงดินผสมมีประสิทธิภาพในการป้องกันการไหลผ่านของน้ำบนดินลงสู่หลุมกลบขยะสูงที่สุด ขณะที่ดินกลบขยะแบบดินเหนียวบดอัดแน่น ดินเหนียวหุ้มด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ และดินกลบขยะแบบชั้นดินชนิดเดียวล้วนหรือชั้นดินซ้อนมีประสิทธิภาพพอๆกัน

ด้านราคาค่าก่อสร้าง ดินกลบขยะแบบกำแพงดินผสมมีราคาค่าก่อสร้างแพงที่สุด รองลงมาเป็นดินกลบขยะแบบชั้นดินชนิดเดียวล้วนหรือชั้นดินซ้อน ขณะที่ดินกลบขยะแบบดินเหนียวบดอัดแน่นมีราคาถูกที่สุด

ในการประยุกต์ใช้ผลของงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อการออกแบบดินกลบขยะของ รร.จปร. พบว่าดินกลบขยะที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศของ รร.จปร. คือ ดินกลบขยะแบบกำแพงดินผสม ซึ่งถึงแม้ดินกลบขยะประเภทนี้มีราคาค่าก่อสร้างที่สูงมาก แต่มีประสิทธิภาพในการป้องกันการไหลผ่านของน้ำ

บนดินลงสู่หลุมกลบขยะสูงที่สุด อย่างไรก็ตามควรมีการพัฒนางานวิจัยเพื่อค้นคว้าหาดินกลบขยะทางเลือกใหม่ที่มีค่าก่อสร้างถูกกว่าและมีประสิทธิภาพเท่าเทียมหรือดีกว่าดินกลบขยะแบบกำแพงดินผสม เพื่อใช้กับพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศชุ่มชื้นอย่างเช่น รร.จปร.

กิตติกรรมประกาศ

ข้อมูลหลักส่วนใหญ่ของผลงานวิจัยที่ผ่านมาในเอกสารวิชาการฉบับนี้ มาจากโครงการวิจัย The Alternative Cover Assessment Project (ACAP) ซึ่งได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจาก USEPA โดยผ่านทางโครงการ Superfund Innovative Technology Evaluation (SITE) การก่อสร้างแบบจำลองดินกลบขยะในแต่ละพื้นที่ศึกษาของโครงการเป็นความร่วมมือระหว่างบริษัท Science Applications International Corporation (SAIC) สถาบัน The Desert Research Institute of the University and Community College System of Nevada สถาบัน Battelle Memorial Institute และมหาวิทยาลัยวิสคอนซิน-แมดิสัน สหรัฐอเมริกา เจ้าของพื้นที่ศึกษาเป็นผู้ออกค่าก่อสร้างแบบจำลองดินกลบขยะ ข้อสรุปและความคิดเห็นใดๆ ในเอกสารนี้เป็นของผู้เขียนแต่เพียงผู้เดียว และไม่ได้เป็นข้อกำหนดหรือระเบียบของ USEPA หรือสถาบันใดๆที่เกี่ยวข้อง

เอกสารอ้างอิง

- (1) Code of Federal Regulations, "Criteria for Municipal Solid Waste Landfills, Subpart F-Closure and Post-Closure Care," Title 40, Volume 22, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 2003.
- (2) Apiwantragoon, P., "Field Hydrological Evaluation of Final Covers for Waste Containment," Ph.D. Dissertation., Department of Civil and Environ. Engr., Univ. of Wisconsin—Madison, 2006.
- (3) Benson C.H. and Khire M. V., "Earthen covers for semi-arid and arid climates," Landfill Closures, ASCE, GSP No. 53, J. Dunn and U. Singh (eds.), 1995, pp. 201-217.
- (4) Khire M.V., C.H. Benson, and P.J. Bosscher, "Capillary Barriers: Design Variables and Water Balance," J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 126, 2000, pp. 695-708.
- (5) Morris, C.E. and J.C. Stormont, "Capillary barriers and subtitle D covers: estimating equivalency," J. Environ. Eng., 1997, pp. 123:3-10.
- (6) Hills, E.S. (eds.), Arid Lands: A Geographical Appraisal, UNESCO, London, 1966.
- (7) Hakonson, T.E., K.V. Bostic, G. Trujillo, K.L. Maines, R.W. Warren, L.J. Lane, J.S. Kent, and W. Wilson, "Hydrologic evaluation of four landfill cover designs at Hill Air Force Base, Utah," LA-UR-93-4469, Los Alamos Natl. Lab., Los Alamos, NM, 1994.
- (8) Karr L., B. Harre., and T.E. Hakonson, "Infiltration control landfill cover demonstration at Marine Corps Base, Hawaii," Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, Tech. Rep. no. TR-2108-ENV, 1999.
- (9) Albright W.H., C.H. Benson, G.W. Gee, A.C. Roesler, T. Abichou, P. Apiwantragoon, B.F. Lyles, and S.A. Rock, "Field water balance of landfill covers," J. Environ. Qual., Vol. 3, 2004, pp. 2317-2332.
- (10) Melchior S., "In-situ studies of the performance of landfill caps (compacted soil liners, geomembranes, geosynthetic clay liners, capillary barriers," Land Contamination Reclamation, Vol. 5, 1997, p. 209.
- (11) Melchior S., Field studies and excavations of geosynthetic clay barriers in landfill covers. Clay Geosynthetic Barriers, Zanzinger, Koerner & Gartung (eds), Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 380 8, 2002.
- (12) NCASI, "A field-scale study of the use of paper industry sludges in landfill cover systems: final report," National Council for Air and Stream Improvement, Tech. Bulletin, No. 750, 1997.
- (13) Albright, W.H., C.H. Benson, G.W. Gee, T. Abichou, E.V. McDonald, S.W. Tyler, and S.A. Rock, "Field performance of a compacted clay landfill final cover at a humid site," J. Geotech. Geoenviron. Engr., Vol. 132, 2006, pp. 1393-1403.
- (14) Khire M.V., C.H. Benson, and P.J. Bosscher, "Water balance modeling of earthen landfill covers," J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 123, 1997, pp. 744-754.
- (15) Montgomery R.J. and L.J. Parsons, "The Omega Hills Cover Test Plot Study: Fourth Year Data Summary," Proc. 22nd Mid-Atlantic Industrial Waste Conf., Drexel University, July 24-27, 1990.
- (16) Gee G.W., D.G. Felmy, J.C. Ritter, M.D. Campbell, J.L. Downs, M.J. Fayer, R.R. Kirkham, and S.O. Link, "Field lysimeter test facility status report IV: FY 1993," DE-AC06-76RL0 1830, PNL-8911 UC-902, 1993.
- (17) Nyhan, J.W., T.G. Schofield, and R.H. Starmer, "A water balance study of four landfill cover designs varying in slope for semiarid regions," J. Environ. Qual., Vol. 26, 1997, pp. 1385-1392.
- (18) Nyhan, J.W., "A seven-year water balance study of an evapotranspiration landfill cover varying in slope for semiarid regions," Vadose Zone J., Vol. 4, 2005, pp. 466-480.
- (19) Dwyer S.F., "Large-scale field study of landfill covers at Sandia National Laboratories," Sandia Report SAND98-2021, September 1998.
- (20) พรภิการุณย์ อ., อ. ศิริช่วง, อ. มหาสิริวัศมี, ส. แสงแดง, และ ส. สุทธิพงศ์พันธ์, การวิเคราะห์การจัดการขยะในโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า, โครงการค้นคว้าวิจัยและสัมมนา, กองวิชาวิศวกรรมโยธา ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า นครนายก, 2006.