Technical Education Journal : King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Vol. 12 No. 3 September - December 2021

ปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมสำหรับพื้นที่ฝังกลบขยะ

ชาญชัย ชาวสวนเจริญ[1*] วิไลลักษณ์ สระมูล[2] พานิช วุฒิพฤกษ์[3] และ ชัยรัตน์ ธีระวัฒนสุข[4]

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมสเปรดชีตไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซลสำหรับออกแบบความหนาชั้นกันซึมประเภทดินเหนียวบดอัดชนิดที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (CL) ที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันการซึมผ่านของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่วในพื้นที่ฝังกลบขยะสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ ความหนาที่ออกแบบจะสามารถระบุให้เหมาะสมกับอายุการใช้งาน 100 ปี และศึกษาเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่มีความเกี่ยวข้องกับการออกแบบความหนาของชั้นกันซึม ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง (D) ที่แตกต่างกันในช่วง 5.00×10^{-6}-1.00×10^{-8} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) ที่แตกต่างกันในช่วง 1.00×10^{-7}-1.00×10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที ค่าความพรุนของดิน (n) ที่แตกต่างกันในช่วง 0.20–0.60 และค่าตัวประกอบความหน่วง (R) ที่แตกต่างกันในช่วง 35–140 ผลจากการศึกษาพบว่าดินเหนียวที่มีความหนาตั้งแต่ 17 เซนติเมตรขึ้นไป สามารถป้องกันการซึมผ่านของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่วในพื้นที่ฝังกลบขยะสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติสำหรับอายุการใช้งาน 100 ปีได้ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลางกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านจะแปรผันตรงกับการออกแบบค่าความหนาของชั้นกันซึม ซึ่งแตกต่างจากค่าตัวประกอบความหน่วงกับค่าความพรุนของดินจะแปรผกผันกับการออกแบบค่าความหนาของชั้นกันซึม นอกจากนี้ เมื่อมีการออกแบบความหนาชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัด ตามมาตรฐานกรมควบคุมมลพิษ (2554) ที่ความหนา 60 เซนติเมตร จะสามารถป้องกันสารโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) สำหรับอายุการใช้งาน 1,080 ปี

คำสำคัญ: ดินเหนียวบดอัด; โลหะหนัก; สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง; ค่าตัวประกอบความหน่วง; ความหนาชั้นกันซึม

รับพิจารณา: 7 ตุลาคม 2564
แก้ไข: 3 พฤศจิกายน 2564
ตอบรับ: 11 พฤศจิกายน 2564

---

[1] นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[2] ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

[3] ศาสตราจารย์ ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[4] รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

[*] ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทร. +669 1880 3175 อีเมล: S6203062810057@email.kmutnb.ac.th

Factors Affecting Design of Liner Thickness for Landfill Waste

Chanchai Chawsuancharoen[1*] Wilailak Sramoon[2] Panich Voottipruex[3] and Chairat Teerawattanasuk[4]

Abstract

The objective of this study is to develop the Microsoft Excel spreadsheet program for designing suitable landfill liner thickness of compacted clay with low plasticity (CL) for protecting the infiltration of lead as a heavy metal solution in landfill waste into groundwater and natural water sources. The designed thickness can be specified to suit a service life of 100 years. Relevant parameters are compared with the design of the landfill liner thickness such as value of diffusion coefficient (D) in the range of 5.00×10^{-6}-1.00×10^{-8} cm^2/sec, hydraulic conductivity (k) in the range of 1.00×10^{-7}-1.00×10^{-9}cm/sec, soil porosity (n) in the range of 0.20–0.60 and retardation factor (R) in the range of 35–140. According to the study, it was found that the clay liner thickness of 17 centimeters was able to protect the infiltration of lead as a heavy metal solution in landfill waste into groundwater and natural water sources for a service life of 100 years. Diffusion coefficients (D) and hydraulic conductivity (k) were directly proportional to the design of the landfill liner thickness values, which differed from retardation factor (R) and porosity (n) to be inversely proportional to thickness of landfill liner design. In addition, the designed landfill clay liner thickness of 60 centimeters according to the standard of Pollution Control Department, Thailand, 2011 would be able to prevent leachate of the lead-type heavy metals for 1,080 years of service life.

Keywords: Compacted Clay; Heavy Metal; Diffusion Coefficient; Retardation Factor; Liner Thickness

Received: October 7, 2021
Revised: November 3, 2021
Accepted: November 11, 2021

[1] Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Mahanakorn University of Technology
[3] Professor, Department of Teacher Training in Civil Engineering, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
[4] Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
[*] Corresponding Author, Tel. +669 1880 3175 e-mail: S6203062810057@email.kmutnb.ac.th

1. บทนำ

การขยายตัวทางเศรษฐกิจและการปรับเปลี่ยนวิถีชีวิตจากสังคมเกษตรกรรมสู่สังคมเมืองในหลายพื้นที่ส่งผลให้ประชาชนในพื้นที่นั้นมีรายได้เพิ่มขึ้นและมีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ความสามารถในการจับจ่ายใช้สอยมากขึ้นด้วย ผลพวงที่ตามมาคือ การเพิ่มจำนวนของขยะมูลฝอย จากการสำรวจของกรมควบคุมมลพิษ [1] ข้อมูลปริมาณขยะมูลฝอยทั่วประเทศไทยมีปริมาณมากถึง 28.71 ล้านตัน โดยในจำนวนนี้มีการนำไปกำจัดอย่างถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลประมาณ 9.81 ล้านตัน และถูกนำไปใช้ประโยชน์ประมาณ 12.52 ล้านตัน ส่วนที่เหลือกว่า 6.38 ล้านตัน ยังคงถูกกำจัดอย่างไม่ถูกต้องตามหลักสุขาภิบาลด้วยวิธีการเทกอง ซึ่งอาจทำให้เกิดการปนเปื้อนของน้ำเสียจากกองขยะลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน จากการศึกษาคุณสมบัติของน้ำชะมูลฝอยในประเทศไทย พบว่ามีโลหะหนักหลายชนิดที่มีความเข้มข้นสูงปะปนอยู่ในน้ำชะมูลฝอย ในบรรดาโลหะหนักที่มีการตรวจพบการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมนั้น ตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักที่มีความเป็นพิษสูงต่อคนและสัตว์ การได้รับสารพิษตะกั่วสะสมเรื้อรังจะส่งผลต่อระบบประสาทและสมอง นอกจากนี้ สารตะกั่วถูกจัดว่าเป็นสารที่อาจก่อให้เกิดโรคมะเร็ง [2] มีปริมาณมากในขยะอิเล็กทรอนิกส์ จากสถานการณ์ปัญหาซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ในประเทศไทย พบว่ามีซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นทุกปีตามระดับความเจริญทางเศรษฐกิจ [3] แต่สารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่วสามารถถูกดูดซับได้โดยใช้ดินที่มีค่าความจุในการแลกเปลี่ยนประจุบวกสูงมาดูดซับสารละลาย [4] โลหะหนักเหล่านี้อาจรั่วซึมเป็นสารปนเปื้อนลงสู่ชั้นน้ำใต้ดินได้ [5] ทำให้น้ำใต้ดินบริเวณนั้นไม่สามารถนำมาบริโภคได้

สิ่งสำคัญที่สุดสำหรับระบบฝังกลบแบบถูกหลักสุขาภิบาลที่มีประสิทธิภาพคือจะต้องสามารถรองรับปริมาณขยะฝังกลบเพื่อกำจัดตามที่ออกแบบไว้อย่างมีเสถียรภาพ และสามารถป้องกันการรั่วซึมของน้ำชะขยะ (leachates) ซึ่งเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสุขอนามัยตลอดอายุการใช้งาน ดังนั้น เพื่อป้องกันการปนเปื้อนสู่แหล่งน้ำใต้ดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ จากน้ำชะขยะที่รั่วซึมจากบ่อฝังกลบดังกล่าว ชั้นวัสดุกันซึมใต้บ่อฝังกลบ (liner) จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติทึบน้ำสูง มาตรฐานการออกแบบหรือข้อกำหนดของระบบฝังกลบอย่างถูกหลักสุขาภิบาลกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำสูงสุดของดินเหนียวที่ใช้ทำชั้นวัสดุกันซึมน้อยกว่า 1.00×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที [6] และมีการกำหนดความหนาของชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัดน้อยที่สุดแตกต่างกัน ระหว่าง 60-100 เซนติเมตร โดยส่วนใหญ่ความหนาของชั้นกันซึมต้องไม่น้อยกว่า 60 เซนติเมตร [1]

อย่างไรก็ตามดินเหนียวที่ใช้ในการก่อสร้างชั้นกันซึมนอกจากจะมีค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (k) น้อยกว่า 1.00×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที [6] และมีการกำหนดความหนาของชั้นดินเหนียวกันซึมบดอัดไม่น้อยกว่า 60 เซนติเมตร [1] แต่ในการออกแบบความหนาชั้นดินเหนียวบดอัดกันซึมให้ได้ความหนาของชั้นกันซึมที่เหมาะสมนั้นยังมีค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับการออกแบบความหนาของชั้นกันซึม ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง ค่าความพรุนของดิน และค่าตัวประกอบความหน่วง ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโปรแกรมสเปรดชีตไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซลสำหรับออกแบบความหนาชั้นกันซึม และศึกษาเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน รวมถึงค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ ที่มีผลต่อการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) ผ่านดินเหนียวบดอัดที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุชั้นกันซึมในสถานที่ฝังกลบขยะมูลฝอย

2. วิธีการวิจัย

ดินเหนียวที่นำมาทำการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมสำหรับพื้นที่ฝังกลบขยะเป็นดินเหนียวที่มีความเป็นพลาสติกต่ำ (Low Plasticity Clay, CL) ตามวิธีการจำแนกแบบ Unified Soil Classification System มีค่าขีดจำกัดเหลวเท่ากับ 42.40%, ค่าขีดจำกัดพลาสติกเท่ากับ 19.20%, ค่าความหนาแน่นแห้งเท่ากับ 1,718 kg/m^3 และค่าความพรุนเท่ากับ 0.42

ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวที่นำมาใช้ในการออกแบบชั้นกันซึม [7] ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของดินเหนียวที่นำมาใช้ในการออกแบบชั้นกันซึม

ดินเหนียวตัวอย่าง				
สารละลายโลหะหนัก	D (cm^2/s)	k (cm/s)	R	n
Pb^{2+}	3.50×10^{-7}	3.39×10^{-8}	79.1	0.42

2.1 สมการที่ใช้ในการออกแบบความหนาของชั้นกันซึม โดยใช้สมการของ Shackelford [8] ดังสมการที่ (1)

โดยนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากผลการทดสอบดินเหนียวที่ทำการทดสอบแบบสดมภ์ (Column Test) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนที่ละลายอยู่ในน้ำผ่านชั้นดินเหนียวบดอัด

$$\frac{C(z,t)}{C_0} = \frac{1}{2}\left\{\operatorname{erfc}\left[\frac{1-T_R}{2\sqrt{\frac{T_R}{P_L}}}\right] + \exp(P_L)\operatorname{erfc}\left[\frac{1+T_R}{2\sqrt{\frac{T_R}{P_L}}}\right]\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned} C(z=0) &= C_0 = \text{constant} \\ C(z=L,t) &= C(z,t) = \text{constant} \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

โดยสมมติเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) ภายใต้สภาวะแบบ steady-state สำหรับการเคลื่อนที่แบบ 1 มิติ ดังสมการที่ (2)

เมื่อ $C(z,t)$ คือ ความเข้มข้นของสารละลายในดินที่ความลึก z และเวลา t

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นที่ต้นน้ำ

คำนวณค่าความชันทางชลศาสตร์ (i) จากสมการที่ (3) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (4)

$$i = \frac{h_L}{h_L + Z} \quad (3)$$

เมื่อ h_L คือ ความหนาของชั้นวัสดุปกคลุม โดยกำหนดความหนา เท่ากับ 30 เซนติเมตร [1]

Z คือ ความหนาของชั้นกันซึม

คำนวณค่าความเร็วในการไหลซึมของน้ำ (V_s) จากสมการที่ (4) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (5) และสมการที่ (6)

$$V_s = \frac{k \cdot i}{n} \quad (4)$$

เมื่อ k คือ สัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

i คือ ความชันทางชลศาสตร์

n คือ ความพรุนของดิน

คำนวณค่าพิกเลย์นัมเบอร์ (P_L) จากสมการที่ (5) และองค์ประกอบของเวลา (T_R) จากสมการที่ (6) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการที่ (1)

$$P_L = \frac{V_s \cdot Z}{D} \quad (5)$$

เมื่อ V_S คือ ความเร็วในการไหลซึมของน้ำ

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง

$$T_R = \frac{V_s \cdot t}{R \cdot Z} \quad (6)$$

เมื่อ T_R คือ องค์ประกอบของเวลา

R คือ ตัวประกอบความหน่วง

Z คือ ความหนาของดิน

การวิเคราะห์ความหนาของชั้นกันซึม สามารถทำได้โดยใช้หลักการที่ว่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (C_L) ที่จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นกันซึมไปสู่ชั้นดินด้านล่างจะต้องไม่มากกว่าความเข้มข้นโลหะตามมาตรฐานคุณภาพของน้ำใต้ดิน [9]

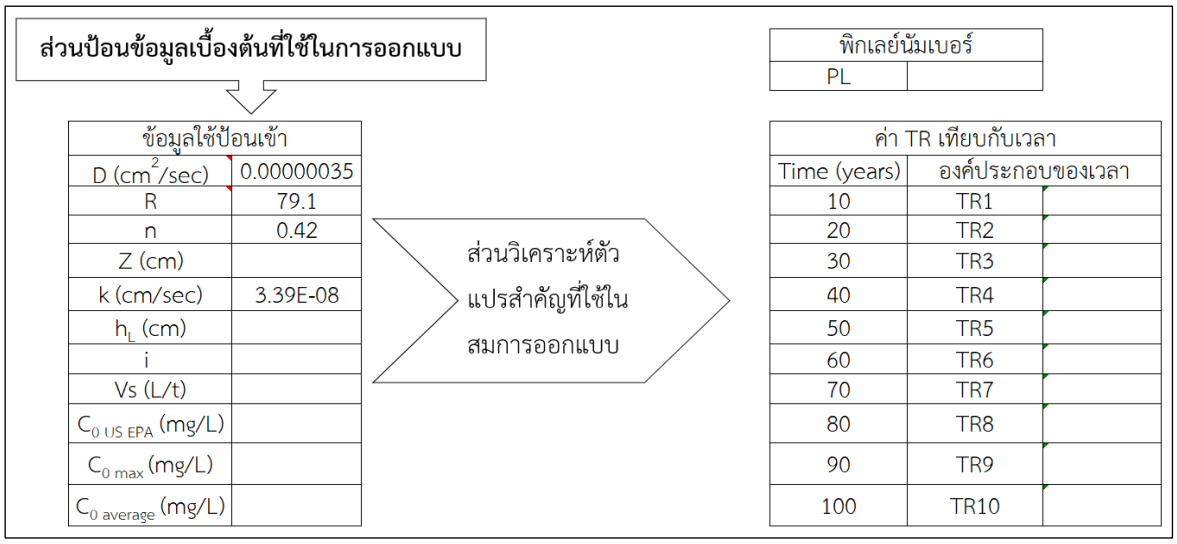
กำหนดค่าความหนาของชั้นกันซึม (Z) โดยให้ค่าความหนาของชั้นกันซึมมีค่าเท่ากับ 60 เซนติเมตร [1] ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านโดยต้องมีค่าไม่เกิน 1.00×10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที [6]

คำนวณหาค่าพิกเลย์นัมเบอร์ (P_L) จากสมการที่ (5) และค่าองค์ประกอบของเวลา (T_R) จากสมการที่ (6) จากนั้นคำนวณค่าเวลาในการเคลื่อนที่ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักต่อความเข้มข้นเริ่มต้น C_t/C_0 (Relative Effluent Concentration) โดยทำการแทนค่าพิกเลย์นัมเบอร์ (P_L) และค่าองค์ประกอบของเวลา (T_R) ลงในสมการที่ (1)

คำนวณค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อน C_L โดยนำค่า C_t/C_0 ที่ได้จากการคูณค่าเฉลี่ยของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) จากสถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่ง [7], [10], [11], [12] จากตารางที่ 2 ($C_{0\,avg}$) เท่ากับ 1.16 mg/L

2.2 ส่วนการป้อนข้อมูลสำหรับโปรแกรมสเปรดชีตไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซลออกแบบความหนาของชั้นกันซึม

นำข้อมูลค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนที่ของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง (D) ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) ค่าความพรุนของดิน (n) และค่าตัวประกอบความหน่วง (R) มาป้อนเข้าสู่โปรแกรมดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนการป้อนข้อมูล

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอย [7], [9], [10], [11], [12], [13]

	แหล่งข้อมูล	โลหะหนัก							
		Cadmium (Cd^{2+}) (mg/L)	Chromium (Cr^{2+}) (mg/L)	Chromium (Hexavalent) (Cr^{6+}) (mg/L)	Chromium Total (Cr) (mg/L)	Chromium Trivalent (Cr^{3+}) (mg/L)	Lead (Pb^{2+}) (mg/L)	Nickel (Ni) (mg/L)	Zinc (Zn) (mg/L)
ความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอย	สำนักรักษาความสะอาดกรุงเทพ (ข้อมูลเดือนมกราคม-มีนาคม 2546) [10]	<0.01	-	-	<0.05	-	<0.05	<0.05	-
	การบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากสถานที่ฝังกลบของเทศบาลอุดรธานีด้วยสารโพลีเฟอร์ริคซัลเฟต [11]	0.276	-	-	-	-	4.55	-	0.743
	รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการศึกษาความเหมาะสมและออกแบบรายละเอียดเพื่อปรับปรุงระบบกำจัดมูลฝอยเทศบาลนครขอนแก่น มีนาคม 2541 [12]	<0.02	<0.07	-	-	-	<0.05	-	0.57
	เทศบาลนครหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา (ข้อมูลในเดือนมกราคม 2546) [7]	<0.0005	-	<0.02	-	0.14	0.0023	<0.04	0.017
	US EPA, 1986 [9]	0-0.375	0.02-18	-	-	-	0.001-1.44	-	0.6-220
มาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 20 พ.ศ. 2543 (C_{sta}) [13]		<0.003	-	<0.05	-	-	<0.01	<0.02	<5

2.3 กำหนดค่าความหนาของชั้นกันซึม (Z) คำนวณหาค่าพิกเลย์นัมเบอร์ (P_L) และค่าองค์ประกอบของเวลา (T_R) เพื่อนำไปแทนค่าในสมการของ Shackelford [8] ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าพิกเลย์นัมเบอร์ และค่าองค์ประกอบของเวลา

พิกเลย์นัมเบอร์		
P_L	0.988338	
ค่า TR เทียบกับเวลา		
Time (years)	องค์ประกอบของเวลา	
10	TR1	0.055203
20	TR2	0.110406
30	TR3	0.165608
40	TR4	0.220811
50	TR5	0.276014
60	TR6	0.331217
70	TR7	0.386420
80	TR8	0.441622
90	TR9	0.496825
100	TR10	0.552028

นำสมการที่ 1 ที่เป็นสมการของ Shackelford [8] มาสร้างสูตรคำนวณในโปรแกรมสเปรดชีตไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซลออกแบบความหนาชั้นกันซึมของดินเหนียวบดอัดสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) ดังตารางที่ 4

หลังจากทำการคำนวณแล้วจะได้ค่า Relative Effluent Concentration (C_t/C_0) จากนั้นพิจารณาค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) ทั้ง 4 แห่ง [7], [10], [11], [12] จากตารางที่ 2 โดยนำค่า Relative Effluent Concentration (C_t/C_0) ที่ได้จากการแทนค่าลงในสมการที่ 1 มาคูณกับค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) จากสถานที่ฝังกลบทั้ง 4 แห่ง [7], [10], [11], [12] ($C_{0\ avg}$) เท่ากับ 1.16 mg/L, ค่าความเข้มข้นสูงสุดของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) จากสถานที่ฝังกลบ ($C_{0\ max}$) เท่ากับ 4.55 mg/L และค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) ตามมาตรฐานของ US EPA [9] ($C_{0\ US\ EPA}$) เท่ากับ 1.44 mg/L เพื่อพล็อต Breakthrough Curve และพิจารณาระยะเวลาที่อายุการใช้งาน 100 ปี

ตารางที่ 4 การคำนวณในโปรแกรมสเปรดชีต

Solution Equation							
Time (years)	Erfc1	1-TR	2*SQRT	exp	erfc2	1+Tr	2*SQRT
10	8.9543E-19	0.985688163	0.157556564	10.0354362	8.6767E-20	1.014311837	0.157556564
20	7.03698E-10	0.971376327	0.222818629	10.0354362	6.63876E-11	1.028623673	0.222818629
30	7.05869E-07	0.95706449	0.272895974	10.0354362	6.49001E-08	1.04293551	0.272895974
40	2.32622E-05	0.942752653	0.315113128	10.0354362	2.08631E-06	1.057247347	0.315113128
50	0.00019384	0.928440816	0.352307187	10.0354362	1.69724E-05	1.071559184	0.352307187
60	0.00080889	0.91412898	0.385933187	10.0354362	6.91866E-05	1.08587102	0.385933187
70	0.00226794	0.899817143	0.416855485	10.0354362	0.000189624	1.100182857	0.416855485
80	0.00495232	0.885505306	0.445637259	10.0354362	0.000404994	1.114494694	0.445637259
90	0.00914501	0.871193469	0.472669691	10.0354362	0.000731864	1.128806531	0.472669691
100	0.01500740	0.856881633	0.498237602	10.0354362	0.001175894	1.143118367	0.498237602

2.4 หาค่าความหนาชั้นกันซึม

โดยนำค่า Breakthrough Curve ที่ได้จากมาตรฐาน US EPA [9] ที่ระยะเวลา 100 ปี ในแต่ละช่วงความหนาที่กำหนด มาพล็อต Breakthrough Curve อีกครั้ง เพื่อหาค่าความหนาที่ต้องใช้ในการออกแบบสำหรับใช้งาน 100 ปี โดยพิจารณาค่าความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (C_L) กับค่ามาตรฐานความเข้มข้น (C_{Std}) โดยพล็อต Breakthrough Curve ในกรณีที่ค่า C_L มากกว่าค่า C_{Std} หมายความว่า ความหนาของชั้นกันซึมมีน้อยเกินไปต้องมีการเพิ่มความหนาของชั้นกันซึม เพื่อให้ค่า C_L ใกล้เคียงกับค่า C_{Std} และถ้ากรณีที่ค่า C_L น้อยกว่าค่า C_{Std} หมายความว่าความหนาของชั้นกันซึมมากเกินไปต้องมีการลดค่าความหนาของชั้นกันซึมเพื่อให้ค่า C_L ใกล้เคียงกับค่า C_{Std} ทำได้โดยการดูเส้นกราฟความสัมพันธ์ของสารละลายโลหะหนัก เมื่อเทียบกับเวลาได้ตัดผ่านค่ามาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดินสำหรับสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) มีค่า < 0.01 mg/L จะสามารถทราบถึงความหนาชั้นกันซึมที่เหมาะสมสำหรับอายุการใช้งาน 100 ปี

2.5 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน

โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง (D) ในช่วง 5.00×10^{-6}-1.00×10^{-8} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที, ค่าสัมประสิทธิ์การยอมให้น้ำซึมผ่าน (k) ในช่วง 1.00×10^{-7}-1.00×10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที, ค่าความพรุนของดิน (n) ในช่วง 0.20-0.60 และค่าองค์ประกอบความหน่วง (R) ในช่วง 35-140 มาป้อนในส่วนข้อมูลป้อนเข้าในโปรแกรมสเปรดชีตไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซลออกแบบความหนาชั้นกันซึมของดินเหนียวบดอัดสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมสำหรับพื้นที่ฝังกลบขยะ

2.6 เปรียบเทียบระยะเวลาการใช้งานและความหนาของชั้นกันซึมที่แตกต่างกัน

โดยกำหนดค่าความหนาของชั้นกันซึมที่แตกต่างกันในช่วง 40-80 เซนติเมตร มาป้อนในส่วนข้อมูลป้อนเข้าในโปรแกรมสเปรดชีตไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซลออกแบบความหนาชั้นกันซึมของดินเหนียวบดอัดสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) เพื่อหาระยะเวลาการใช้งานโดยใช้ความหนาของชั้นกันซึมที่แตกต่างกัน

3. ผลการวิจัย

เมื่อทำการคำนวณหาค่าความหนาของชั้นกันซึมที่อายุการใช้งาน 100 ปี และเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน รวมถึงเปรียบเทียบค่าความหนาของชั้นกันซึมที่แตกต่างกัน สามารถพล็อต Breakthrough Curve เพื่อพิจารณาระยะเวลาที่อายุการใช้งาน ซึ่งผลการศึกษาแสดงดังนี้

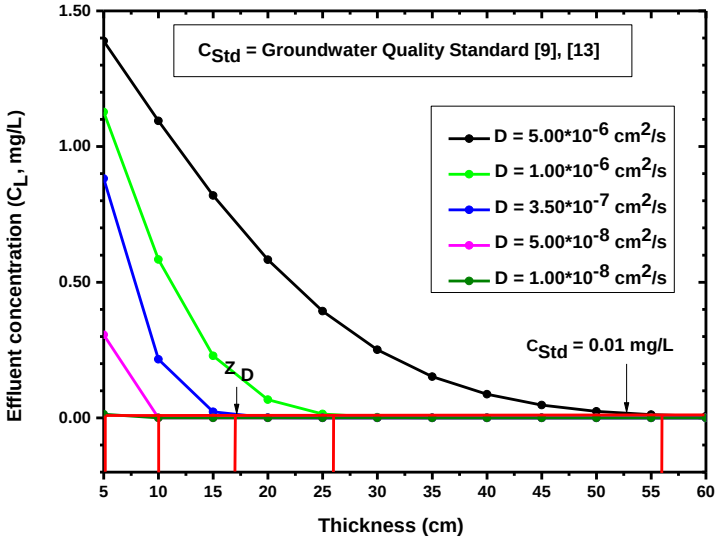
3.1 ผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลางต่อความหนาของชั้นกันซึม

Breakthrough Curve สำหรับความหนาที่ต้องการที่อายุการใช้งาน 100 ปี ของดินเหนียว โดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง (D) ที่แตกต่างกันในช่วง 5.00×10^{-6}-1.00×10^{-8} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที โดยที่ค่า k, n และ R เป็นไปตามค่าที่แสดงในตารางที่ 1

เส้นสีแดงที่ตัดผ่านข้างล่าง คือ เส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดินมีค่าของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ตามมาตรฐาน US EPA [9] และมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน [13] ดังรูปที่ 2

รูปที่ 2 แสดง Breakthrough Curve ของค่าความเข้มข้นสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] ($C_{0\ US\ EPA}$) ที่ระยะเวลา 100 ปี ในแต่ละช่วงความหนาตั้งแต่ 5-60 เซนติเมตร โดยแสดงออกมาในรูปของกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] กับความหนาที่ใช้ออกแบบชั้นกันซึม โดยเป็นเส้นความสัมพันธ์ Polynomial ดีกรีสามกับค่าความหนาของชั้นกันซึม จากกราฟแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาการใช้งานที่ 100 ปี โดยพิจารณาจากการตัดผ่านเส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดิน (เส้นสีแดง) ที่มีค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ของความเข้มข้นสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] ที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลางที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 2 มีค่า D เท่ากับ

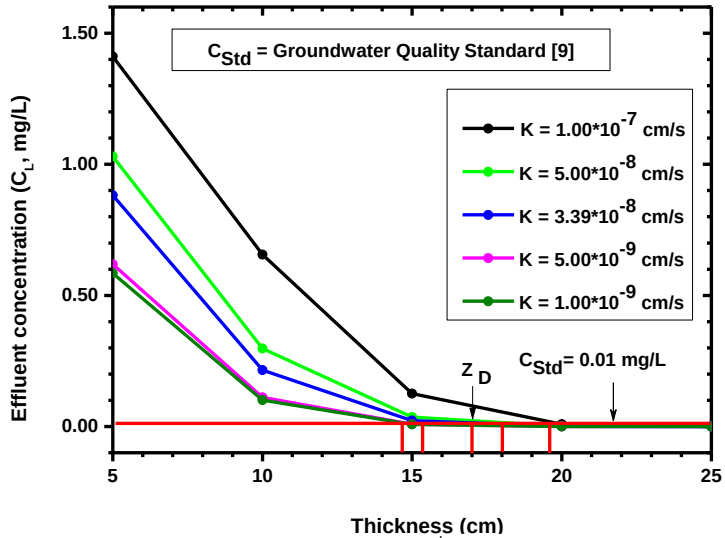
5.00×10^{-6}, 1.00×10^{-6}, 3.50×10^{-7}, 5.00×10^{-8} และ 1.00×10^{-8} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ที่ตัดผ่านคุณภาพน้ำใต้ดิน คำนวณค่าความหนาชั้นกันซึมได้เท่ากับ 56, 26, 17, 10 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 2 หากออกแบบความหนาที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ของดินเหนียวทดสอบในตารางที่ 1 จะได้ความหนาของดินเหนียวทดสอบที่เหมาะสม (Z_D) เท่ากับ 17 เซนติเมตร



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ระยะเวลา 100 ปี ในแต่ละช่วงความหนาโดยเปรียบเทียบค่า D ที่แตกต่างกัน

3.2 ผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านต่อความหนาของชั้นกันซึม

Breakthrough Curve สำหรับความหนาที่ต้องการระยะเวลาการใช้งานที่ 100 ปี ของดินเหนียวโดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) ที่แตกต่างกัน ในช่วง 1.00×10^{-7}-1.00×10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที โดยที่ค่า D, n และ R เป็นไปตามค่าที่แสดงในตารางที่ 1 เส้นสีแดงที่ตัดผ่านข้างล่าง คือ เส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดินมีค่าของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ตามมาตรฐาน US EPA [9] และมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน [13] ดังรูปที่ 3

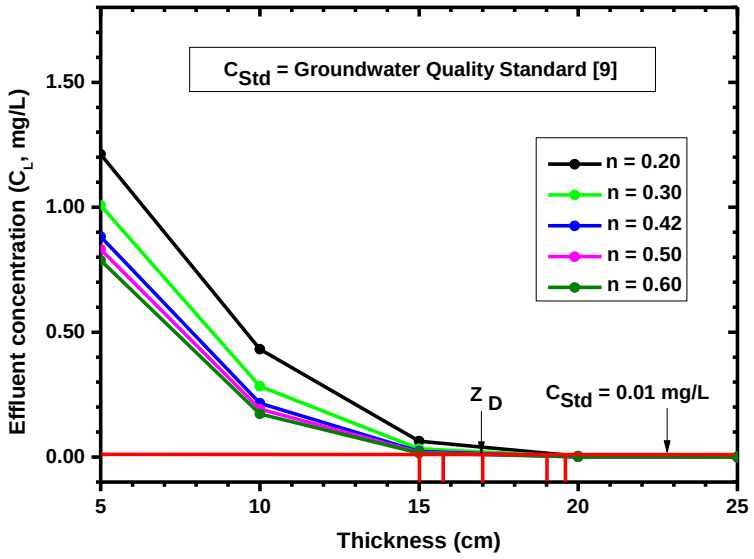


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ระยะเวลา 100 ปี ในแต่ละช่วงความหนาโดยเปรียบเทียบค่า k ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 3 แสดง Breakthrough Curve ของค่าความเข้มข้นสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] ($C_{0\ of\ US\ EPA}$) ที่ระยะเวลา 100 ปี ในแต่ละช่วงความหนาตั้งแต่ 5-25 เซนติเมตร โดยแสดงออกมาในรูปของกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตามมาตรฐาน กับความหนาที่ใช้ออกแบบชั้นกันซึม โดยเป็นเส้นความสัมพันธ์ Polynomial ดีกรีสามกับค่าความหนาของชั้นกันซึม จากกราฟแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาการใช้งานที่ 100 ปี โดยพิจารณาจากการตัดผ่านเส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดิน (เส้นสีแดง) ที่มีค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ของความเข้มข้นสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] ที่มีค่าการสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่แตกต่างกัน จากรูปที่ 3 มีค่า k ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1.00×10^{-7}, 5.00×10^{-8}, 3.39×10^{-8}, 5.00×10^{-9} และ 1.00×10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที ที่ตัดผ่านคุณภาพน้ำใต้ดิน คำนวณค่าความหนาชั้นกันซึมได้เท่ากับ 19.6, 18, 17, 15.3 และ 14.8 เซนติเมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 3 หากออกแบบความหนาที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ของดินเหนียวทดสอบในตารางที่ 1 จะได้ความหนาของดินเหนียวทดสอบที่เหมาะสม (Z_D) เท่ากับ 17 เซนติเมตร

3.3 ผลกระทบของค่าความพรุนของดินต่อความหนาของชั้นกันซึม

Breakthrough Curve สำหรับความหนาที่ต้องการระยะเวลาการใช้งานที่ 100 ปี ของดินเหนียว โดยเปรียบเทียบค่าความพรุนของดิน (n) ที่แตกต่างกันในช่วง 0.20-0.60 โดยที่ค่า D, k และ R เป็นไปตามค่าที่แสดงในตารางที่ 1 เส้นสีแดงที่ตัดผ่านข้างล่าง คือ เส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดินมีค่าของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ตามมาตรฐาน US EPA [9] และมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน [13] ดังรูปที่ 4

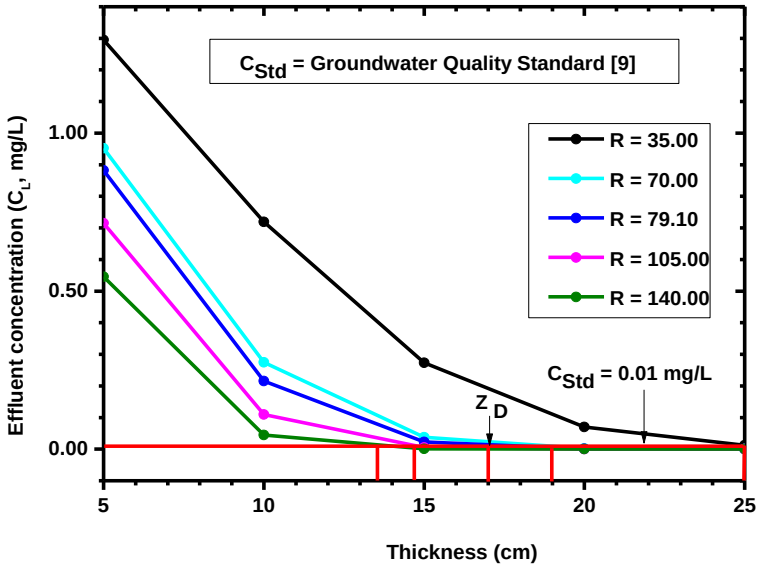


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ระยะเวลา 100 ปี ในแต่ละช่วงความหนาโดยเปรียบเทียบค่า n ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4 แสดง Breakthrough Curve ของค่าความเข้มข้นสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] ($C_{0\ of\ US\ EPA}$) ที่ระยะเวลา 100 ปี ในแต่ละช่วงความหนาตั้งแต่ 5-25 เซนติเมตร โดยแสดงออกมาในรูปของกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] กับความหนาที่ใช้ออกแบบชั้นกันซึม โดยเป็นเส้นความสัมพันธ์ Polynomial ดีกรีสามกับค่าความหนาของชั้นกันซึม จากกราฟแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาการใช้งานที่ 100 ปี โดยพิจารณาจากการตัดผ่านเส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดิน (เส้นสีแดง) ที่มีค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ของความเข้มข้นสารละลายตาม

มาตรฐาน US EPA [9] ที่มีค่าความพรุนที่ต่างกัน จากรูปที่ 4 มีค่า n ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.20, 0.30, 0.42, 0.50 และ 0.60 ที่ตัดผ่านคุณภาพน้ำใต้ดิน คำนวณค่าความหนาชั้นกันซึมได้เท่ากับ 19.5, 19, 17, 15.8 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากดินที่มีความพรุนสูงขึ้น ทำให้สารละลายโลหะหนักสามารถเกาะติดผิวได้มากขึ้นและทำให้อัตราการไหลลดลง จึงสามารถออกแบบความหนาชั้นกันซึมได้น้อยลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ พงศกร และเลิศ [14] อย่างไรก็ตาม ในการวิเคราะห์ออกแบบความหนาชั้นกันซึมที่เหมาะสมยังขึ้นกับค่าพารามิเตอร์อื่นที่เป็นองค์ประกอบทั้งจากค่า D, ค่า k และค่า R จากรูปที่ 4 หากออกแบบความหนาที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ของดินเหนียวทดสอบในตารางที่ 1 จะได้ความหนาของดินเหนียวทดสอบที่เหมาะสม (Z_D) เท่ากับ 17 เซนติเมตร

3.4 ผลกระทบของค่าตัวประกอบความหน่วงต่อค่าความหนาของชั้นกันซึมBreakthrough Curve สำหรับความหนาที่ต้องการระยะเวลาการใช้งานที่ 100 ปี ของดินเหนียว โดยเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความหน่วง (R) ที่แตกต่างกัน ในช่วง 35-140 โดยที่ค่า D, k และ n เป็นไปตามค่าที่แสดงในตารางที่ 1 เส้นสีแดงที่ตัดผ่านข้างล่าง คือ เส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดินมีค่าของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ตามมาตรฐาน US EPA [9] และมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน [13] ดังรูปที่ 5



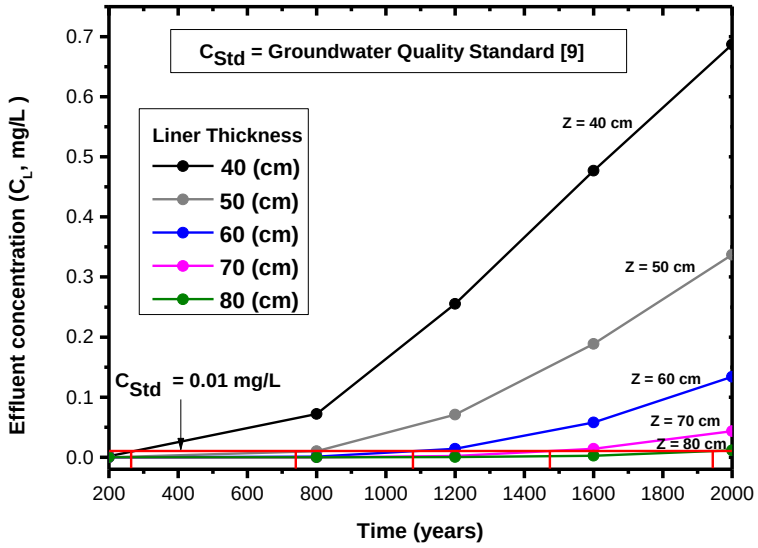
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายที่ระยะเวลา 100 ปี ในแต่ละช่วงความหนาโดยเปรียบเทียบค่า R ที่แตกต่างกัน

รูปที่ 5 แสดง Breakthrough Curve ของค่าความเข้มข้นสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] ($C_{0\ of\ US\ EPA}$) ที่ระยะเวลา 100 ปี ในแต่ละช่วงความหนาตั้งแต่ 5-25 เซนติเมตร โดยแสดงออกมาในรูปของกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] กับความหนาที่ใช้ออกแบบชั้นกันซึม โดยเป็นเส้นความสัมพันธ์ Polynomial ดีกรีสามกับค่าความหนาของชั้นกันซึม จากกราฟแสดงให้เห็นถึงระยะเวลาการใช้งานที่ 100 ปี โดยพิจารณาจากการตัดผ่านเส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดิน (เส้นสีแดง) ที่มีค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ของความเข้มข้นสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] ที่มีค่าตัวประกอบความหน่วงที่ต่างกัน จากรูปที่ 5 มีค่า R ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 35, 70, 79.1, 105 และ 140 ที่ตัดผ่านคุณภาพน้ำใต้ดิน คำนวณค่าความหนาชั้นกันซึมได้เท่ากับ 25, 19, 17, 14.8 และ 13.5 เซนติเมตร ตามลำดับ จากรูปที่ 5 หากออกแบบความหนาที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ของดิน

เหนียวทดสอบในตารางที่ 1 จะได้ความหนาของดินเหนียวทดสอบที่เหมาะสม (Z_D) เท่ากับ 17 เซนติเมตร

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาการใช้งานและความหนาของชั้นกันซึม

Breakthrough Curve สำหรับระยะเวลาการใช้งานที่สามารถป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) ตามความเข้มข้นมาตรฐานของ US EPA [9] ($C_{0\ US\ EPA}$) โดยเปรียบเทียบความหนาของดินเหนียวในช่วง 40-80 เซนติเมตร โดยที่ค่า D, k, n และ R เป็นไปตามค่าที่แสดงในตารางที่ 1 เส้นสีแดงที่ตัดผ่านข้างล่าง คือ เส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดินมีค่าของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ตามมาตรฐาน US EPA [9] และมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน [13] ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่ค่าความเข้มข้นที่ด้านล่างของชั้นกันซึมมากกว่าค่าความเข้มข้นมาตรฐาน

รูปที่ 6 แสดง Breakthrough Curve ของค่าความเข้มข้นสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] ($C_{0\ of\ US\ EPA}$) กำหนดให้ความหนาเท่ากับ 40-80 เซนติเมตร โดยแสดงออกมาในรูปของกราฟเส้นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] กับระยะเวลาที่ค่าความเข้มข้นที่ด้านล่างชั้นกันซึมมากกว่าค่าความเข้มข้นมาตรฐาน โดยเป็นเส้นความสัมพันธ์ Polynomial ดีกรีสามกับค่าความหนาของชั้นกันซึม จากกราฟแสดงให้เห็นถึงอายุการใช้งานชั้นกันซึมโดยพิจารณาจาก การตัดผ่านเส้นคุณภาพมาตรฐานน้ำใต้ดิน (เส้นสีแดง) ที่มีค่าความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) < 0.01 mg/L ของความเข้มข้นสารละลายตามมาตรฐาน US EPA [9] ที่มีค่าความหนาของชั้นกันซึมที่แตกต่างกัน ได้แก่ 40, 50, 60, 70 และ 80 เซนติเมตร จากรูปที่ 6 คำนวณอายุการใช้งานชั้นกันซึมได้เท่ากับ 260, 740, 1,080, 1,480 และ 1,950 ปี ตามลำดับ

4. สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมสเปรดชีตไมโครซอฟท์เอ็กซ์เซล และศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบความหนาชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) โดยเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง (D), ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k), ค่าความพรุนของดิน (n) และค่าตัวประกอบความหน่วง (R) ที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 สำหรับการใช้วัสดุดินเหนียวเป็นชั้นกันซึมของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่มีสารตะกั่ว (Pb^{2+}) เป็นสารปนเปื้อน พบว่าชั้นกันซึมดินเหนียวบดอัดที่มีความหนาตั้งแต่ 17 เซนติเมตรขึ้นไป ทำให้ค่าความเข้มข้นของตะกั่วมีค่า < 0.01 mg/L สามารถป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) สำหรับอายุการใช้งาน 100 ปีได้ ตามมาตรฐาน US EPA [9] และมาตรฐานคุณภาพน้ำใต้ดิน [13]

4.2 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลาง (D) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวกลางที่มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 5.00×10^{-6}, 1.00×10^{-6}, 3.50×10^{-7}, 5.00×10^{-8} และ 1.00×10^{-8} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที พบว่าสามารถคำนวณออกแบบความหนาได้น้อยลงตามค่า D ที่น้อยลง ได้ความหนาชั้นกันซึมเท่ากับ 56, 26, 17, 10 และ 5 เซนติเมตร ตามลำดับ

4.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (k) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1.00×10^{-7}, 5.00×10^{-8}, 3.39×10^{-8} และ 1.00×10^{-9} เซนติเมตรต่อวินาที พบว่าสามารถคำนวณออกแบบความหนาได้น้อยลงตามค่า k ที่น้อยลง ได้ความหนาชั้นกันซึมเท่ากับ 19.6, 18, 17, 15.3 และ 14.8 เซนติเมตร ตามลำดับ

4.4 ค่าความพรุนของดิน (n) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) เมื่อเปรียบเทียบความพรุนที่มีค่าแตกต่างกัน ได้แก่ 0.20, 0.30, 0.42, 0.50 และ 0.60 พบว่าสามารถคำนวณออกแบบความหนาได้น้อยลงตามค่า n ที่มากขึ้น ได้ความหนาชั้นกันซึมเท่ากับ 19.5, 19, 17, 15.8 และ 15 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องมาจากคุณสมบัติของดินที่มีความพรุนสูงขึ้น ทำให้สารละลายโลหะหนักสามารถเกาะติดผิวได้สูงกว่า จึงทำให้สามารถออกแบบความหนาของชั้นกันซึมได้น้อยลง อย่างไรก็ตาม ค่าความพรุนของดินจะมีความสัมพันธ์โดยขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ดังนั้น ในการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมจำเป็นต้องพิจารณาความสอดคล้องและสมมูลระหว่างค่าความพรุนและค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำควบคู่กัน

4.5 ค่าตัวประกอบความหน่วง (R) เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการออกแบบความหนาของชั้นกันซึมสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) เมื่อเปรียบเทียบค่าตัวประกอบความหน่วงที่มีค่าที่แตกต่างกัน ได้แก่ 35, 70, 79.1, 105 และ 140 พบว่าจะสามารถคำนวณออกแบบความหนาได้น้อยลงตามค่า R ที่มากขึ้น ได้ความหนาชั้นกันซึมเท่ากับ 25, 19, 17, 14.8 และ 13.5 เซนติเมตร ตามลำดับ

4.6 เมื่อออกแบบค่าความหนาที่ต่างกัน ได้แก่ 40, 50, 60, 70 และ 80 เซนติเมตร สามารถคำนวณออกแบบอายุการใช้งานชั้นกันซึมสำหรับป้องกันสารละลายโลหะหนักประเภทตะกั่ว (Pb^{2+}) ได้เท่ากับ 260, 740, 1,080, 1,480 และ 1,950 ปี ตามลำดับ

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Pollution Control, "Thailand State of Pollution Report," Style Creative House Co.,Ltd., Bangkok Thailand, 2019. (in Thai)

[2] O. Phuphisut and S. Sangrajang, "Electronic waste and hazardous substances," *Thai Journal of Toxicology,* vol. 25, no. 1, pp. 67-76, 2010. (in Thai)

[3] Department of Disease Control, Guidelines for surveillance, prevention, control of disease and health hazards Professionals collecting, sorting, recycling waste and people living around the landfill, Saraburi, 2016.

[4] T. Kongkeaw and P. Maekum , "Some Factors Affecting on Adsorption of Lead and Cadmium Contaminated Water by Clays," *Journal of Khon Kaen Agriculture,* vol. 34, no. 1, pp. 47-54, 2006. (in Thai)

[5] World Health Organization, "Decontamination or Consolidation of Metal-Contaminated Soils by Biological Means," in *Heavy Metals : Environmental Science, Springer*, Berlin, Heidelberg, Springer, 1995, pp. 141-149.

[6] M. H. Gleason, D. E. Daniel and G. Eykholt, "Calcium and Sodium Bentonite for Hydraulic Containment Applications," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,* vol. 123, no. 5, pp. 438-445, 1997.

[7] T.Chalermyanont, Compacted Sand Bentonite mixtures for hydralic containment liners, Songkhla: Prince of Songkla Universtity, 2005. (in Thai)

[8] C. D. Shackelford, "Critical Concept for Column Testing," *Journal of Geotechnical Engineering,* vol. 120, no. 10, pp. 1804-1828, 1994.

[9] United States Environment Protection Agency, "Subtitle D Study, Phase Report, EPA/50-Sw-86/054," vol. 116, U.S. Environmental Protection Agency, 1986.

[10] Department of Public Cleaning Bangkok, "Bangkok Solid Waste Information," 2003. [Online]. Available: http://203.155.220.217/dopc/info/ShowYear.asp. [Accessed 10 July 2019]. (in Thai)

[11] T. Wichienkruea, Treatment of leachate from Udon Thani municipal landfill with polyferric sulfate, Khonkaen: Khonkaen University, 2001. (in Thai)

[12] P. Phromthet, "The efficiency of leachate removal by the anaerobic septic-filter system together with the sand pile," Khon Kaen University, 2002. (in Thai)

[13] Department of Pollution Control, 15 September 2000. [Online]. Available: http://infofile.pcd.go.th/law/3_16_water.pdf?CFID=1250288&CFTOKEN=38578678. [Accessed 5 August 2019]. (in Thai)

[14] P. Kerdchaiyaphum and L. Punrattanasin, "The Sorption Capacity of Heavy Metals by Mukdahan Soil in Laboratory," *Engineering Journal of Research and Development,* vol. 23, no. 2, pp. 21-27, 2012. (in Thai)