บทที่ 3
ทบทวนเอกสารและทฤษฎีที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

3.1 ทบทวนเอกสาร

3.1.1 ขยะมูลฝอย

ตามพจนานุกรมฉบับราชบัณฑิตยสถานฉบับ พ.ศ. 2525 ให้คำจำกัดความของคำว่า "มูลฝอย" ว่าหมายถึง เศษสิ่งของที่ทิ้งแล้ว หยากเยื่อ และคำว่า "ขยะ" หมายถึง หยากเยื่อ มูลฝอย ดังนั้น คำว่า "ขยะ" และ "มูลฝอย" มีความหมายเดียวกัน จึงใช้แทนกันได้

ตามพระราชบัญญัติสาธารณสุข พ.ศ. 2535 คำว่า "มูลฝอย" หมายถึง เศษกระดาษ เศษผ้า เศษอาหาร เศษสินค้า ถุงพลาสติกใส่อาหาร ภาชนะ เถ้า หรือซากสัตว์ รวมถึงวัตถุอื่นใดซึ่งเก็บกวาดจากถนน ตลาด ที่เลี้ยงสัตว์ หรือที่อื่น ๆ

ในทางวิชาการ "มูลฝอย" หมายถึง บรรดาสิ่งของที่ไม่ต้องการใช้แล้ว

3.1.2 วิธีกำจัดมูลฝอย

วิธีการกำจัดมูลฝอยโดยทั่วไปมีอยู่ 3 วิธี คือ

3.1.2.1 การหมักทำปุ๋ย (Composting) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยอาศัยขบวนการทางชีววิทยาของจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ให้ได้แร่ธาตุที่ค่อนข้างคงรูป ซึ่งมีคุณค่าใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดิน

3.1.2.2 การเผาในเตาเผา (Incineration) หมายถึงขบวนการเผาไหม้มูลฝอยทั้งส่วนที่เป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยใช้ความร้อนสูง และทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์

3.1.2.3 การฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) เป็นการนำมูลฝอยมาฝังหรือกองในพื้นที่ซึ่งจัดเตรียมไว้ และใช้เครื่องจักรกลเกลี่ยและบดอัดให้ยุบตัวลง แล้วใช้ดินกลบทับและบดอัดให้แน่นอีกครั้ง หลังจากนั้นนำมูลฝอยมาเกลี่ยและบดอัดอีกเป็นชั้น ๆ สลับด้วยชั้นดินกลบเพื่อป้องกันปัญหาในด้านกลิ่น แมลง และน้ำฝนชะล้าง และเหตุรำคาญอื่น ๆ

3.1.3 การฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล

วิธีการฝังกลบมูลฝอยสำหรับมูลฝอยชุมชนที่ใช้กันอยู่มี 3 วิธีคือ

3.1.3.1 วิธีฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench Method) เหมาะกับบริเวณที่มีวัสดุที่ใช้ในการกลบทับอย่างพอเพียง และมีระดับน้ำใต้ดินอยู่ลึก ดินที่ถูกขุดขึ้นมาจะถูกนำไปใช้ในการกลบทับมูลฝอยในแต่ละวัน ร่องที่เตรียมไว้มีการปูพื้นด้วยวัสดุป้องกันการรั่วซึมของก๊าซและน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝัง

หอสมุดกลาง สถาบัน...
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.3.2 วิธีฝังกลบบนพื้นที่ราบ (Area Method) วิธีนี้จะถูกนำมาใช้เมื่อบริเวณที่ใช้ในการฝังกลบมูลฝอยไม่เหมาะที่จะทำการขุดเป็นร่อง และยังใช้กับบริเวณที่มีระดับน้ำใต้ดินอยู่ใกล้ผิวดิน มีการเตรียมพื้นที่โดยการปูวัสดุป้องกันการซึมและระบบควบคุมน้ำชะมูลฝอย วัสดุที่ใช้ในการกลบทับจะต้องขนมาจากที่อื่น หรืออาจใช้วัสดุกลบทับชั่วคราวที่สามารถนำออกได้เมื่อจะทำการฝังกลบในชั้นบน

3.1.3.3 วิธีฝังกลบบนพื้นลาด (Depression Method) เป็นการฝังกลบมูลฝอยตามเนินเขาหรือพื้นที่ลาดเอียง เทคนิคที่ใช้ขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรณีวิทยาของพื้นที่ ประเภทของระบบควบคุมน้ำชะมูลฝอยและก๊าซที่ใช้ และเส้นทางเข้าไปยังพื้นที่ จะต้องมีการป้องกันการสะสมของน้ำทางด้านหลังของเนิน วิธีการกลบทับก็เช่นเดียวกับวิธีฝังกลบบนพื้นที่ราบ วัสดุที่ใช้ในการกลบทับได้มาจากการขุดเนินในช่วงเตรียมพื้นที่ฝังกลบ ถ้าวัสดุกลบทับมีไม่พอก็ต้องขนมาจากที่อื่น

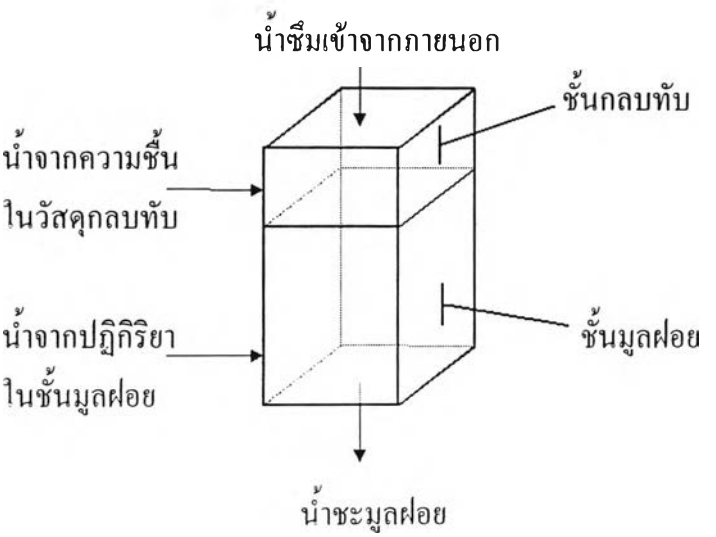
3.1.4 น้ำชะมูลฝอย

ในทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมคำว่า น้ำชะมูลฝอย(leachate) หมายถึง ของเหลวที่ซึมผ่านขยะมูลฝอย แล้วชะเอาสารละลายหรือสารแขวนลอยเจือปนออกมาด้วย ในหลุมฝังกลบมูลฝอยส่วนมากน้ำชะมูลฝอยจะประกอบด้วยน้ำที่มาจากภายนอกหลุมฝังกลบขยะ เช่น น้ำฝน น้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน กับน้ำที่เกิดจากการเน่าเปื่อยของขยะในชั้นฝังกลบ

3.1.4.1 การเกิดน้ำชะมูลฝอย

ปกติแล้วน้ำชะมูลฝอยจะเกิดจาก

- น้ำซึมเข้าจากกายนอก เช่นน้ำฝน น้ำใต้ดิน เป็นต้น



รูปที่ 3.1 การเกิดน้ำชะมูลฝอย

- ปฏิกิริยาทางชีวภาพภายในขยะ ภายในหลุมฝังกลบขยะจะเกิดปฏิกิริยาขึ้น ทั้งแบบใช้ออกซิเจนในขณะที่มีออกซิเจนเพียงพอ และแบบไม่ใช้ออกซิเจนเมื่อออกซิเจนได้ถูกใช้ไปหมดแล้ว ทำให้มีน้ำเกิดขึ้น ซึ่งน้ำที่เกิดขึ้นนี้เมื่อผ่านชั้นขยะออกมาจะกลายเป็นน้ำชะมูลฝอย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการดังนี้

ปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจน

สารอินทรีย์ + ออกซิเจน + สารอาหาร $\xrightarrow{\text{แบคทีเรีย}}$ เซลล์ใหม่ + สารอินทรีย์ที่เหลือ + คาร์บอนไดออกไซด์ + น้ำ + แอมโมเนีย + ซัลเฟต + ... + ความร้อน

ปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน

สารอินทรีย์ + น้ำ + สารอาหาร $\longrightarrow$ เซลล์ใหม่ + สารอินทรีย์ที่เหลือ + คาร์บอนไดออกไซด์ + มีเทน + แอมโมเนีย + ไฮโดรเจนซัลไฟด์ + ความร้อน

- ความชื้นของวัสดุกลบทับ

3.1.4.2 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย

เมื่อน้ำซึมผ่านขยะมูลฝอยที่เกิดการย่อยสลาย ทั้งองค์ประกอบทางชีวภาพและเคมีจะถูกชะปนเปื้อนออกมาด้วย ข้อมูลลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยแสดงดังตารางที่ 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำชะมูลฝอยอยู่ในช่วงที่กว้างขึ้นอยู่กับอายุของหลุมฝังกลบและช่วงเวลาที่ทำการเก็บน้ำตัวอย่าง เช่น ถ้าเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยในช่วงระยะการย่อยสลายในสภาวะกรด ค่า pH จะต่ำและความเข้มข้นของ BOD_5, TOC, COD, สารอาหาร และโลหะหนัก จะสูง ในขณะที่ถ้าเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยในช่วงระยะการเกิดมีเทน ค่า pH จะอยู่ในช่วง 6.5 ถึง 7.5 และค่า BOD_5, TOC, COD จะต่ำกว่ามาก ค่าโลหะหนักก็จะต่ำกว่าเนื่องจากโลหะส่วนใหญ่ละลายน้ำได้น้อยที่ pH เป็นกลาง สำหรับตารางที่ 3.2 แสดงลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยชอยอ่อนนุช

3.1.4.3 การควบคุมน้ำชะมูลฝอย

เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบทางเคมีและชีวภาพมากมายดังกล่าวข้างต้น จึงไม่ควรปล่อยให้ไปเกิดการปนเปื้อนกับน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินได้ หลุมฝังกลบขยะทุกแห่งจะต้องมีการป้องกันการปนเปื้อนของน้ำชะมูลฝอยอย่างเหมาะสมดังนี้

- ลดการซึมเข้าของน้ำจากภายนอกลงสู่ชั้นฝังกลบ
- ชะลอการซึมออกของน้ำชะมูลฝอยจากชั้นฝังกลบ
- รวบรวมน้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบ เพื่อนำไปบำบัดก่อนปล่อยทิ้งลงแหล่งน้ำ

ตารางที่ 3.1 ลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยทั่วไป (Tchobanoglous และคณะ, 1993)

ส่วนประกอบ	ค่าที่วัดได้, มก/ล		
	หลุมฝังกลบใหม่ (อายุต่ำกว่า 2 ปี)		หลุมฝังกลบเก่า
	ช่วงที่เป็นไปได้	ค่าทั่วไป	(อายุมากกว่า 10 ปี)
BOD_5	2,000-30,000	10,000	100-200
TOC	1,500-20,000	6,000	80-160
COD	3,000-60,000	18,000	100-500
ของแข็งแขวนลอย	200-2,000	500	100-400
สารอินทรีย์ไนโตรเจน	10-800	200	80-120
แอมโมเนียไนโตรเจน	10-800	200	20-40
ไนเตรต	5-40	25	5-10
ฟอสฟอรัส	5-100	30	5-10
ความเป็นด่าง (as $CaCO_3$)	1,000-10,000	3,000	200-1,000
pH	4.5-7.5	6	6.6-7.5
ความกระด้าง (as $CaCO_3$)	300-10,000	3,500	200-500
แคลเซียม	200-3,000	1,000	100-400
แมกนีเซียม	50-1,500	250	50-200
โปแตสเซียม	200-1,000	300	50-400
โซเดียม	200-2,500	500	100-200
คลอไรด์	200-3,000	500	100-400
ซัลเฟต	50-1,000	300	20-50
เหล็ก	50-1,200	60	20-200

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์น้ำที่ซึมออกจากขยะชอยอ่อนนุช (เป็นค่าเฉลี่ยในฤดูฝนและฤดูแล้ง) (สำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร, 2539)

ข้อมูลที่ทำการศึกษา	ที่ฐานของ Landfill จุดที่ 1		ที่ฐานของ Landfill จุดที่ 2	
	ฤดูฝน	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	ฤดูร้อน
pH	8.25	8.33	8.0	7.75
BOD (มก/ล)	39.70	48.17	47.75	47.80
$COD^{(KMnO4)}$ (มก/ล)	350.0	648	392	902
SS (มก/ล)	515.0	71	305	28
Pb (มก/ล)	0.30	0.13	0.14	0.08
Fe(ละลาย) (มก/ล)	4.27	5.65	2.88	7.15
Total-N (มก/ล)	141.5	123.7	139.6	212.7
NH_3-N (มก/ล)	71.9	61.6	78.0	155.3
NO_3^--N (มก/ล)	8.50	2.68	1.83	2.39
Cl^- (มก/ล)	1,615	1,630	1,720	1,817
ซัลไฟด์ (มก/ล)	3.68	3.30	3.98	4.38
คอลิฟอร์ม (จำนวน/มล)	365	651	290	368
ตะกอนตกค้างจากการระเหย (มก/ล)	4,885	7,620	7,805	10,140
มวลที่สูญเสียจากการเผาไหม้ (มก/ล)	1,305	1,803	1,410	1,873

การลดการซึมของน้ำจากภายนอกและชะลอการซึมออกของน้ำชะมูลฝอยทำได้โดยอาศัยวัสดุป้องกันการซึมที่ลดการซึมผ่านให้อยู่ที่อัตรา 10^{-6} ถึง 10^{-7} เซนติเมตรต่อวินาที ปัจจุบันนิยมใช้แผ่นกันซึมสังเคราะห์ HDPE หรือใช้ชั้นดินเหนียว หรือทั้ง 2 อย่างประกอบกัน เป็นวัสดุป้องกันการซึม

การลดการซึมของน้ำจากภายนอกต้องทำให้ผิวบนของหลุมฝังกลบลาดลงสู่คูรับน้ำข้างหลุมฝังกลบ โดยปูวัสดุกันซึมที่ผิวบนหลังจากฝังกลบขยะในแต่ละวัน หรือหลังจากทำการกลบทับในชั้นสุดท้ายเสร็จแล้ว ส่วนการชะลอการซึมของน้ำชะมูลฝอยออกจากชั้นฝังกลบต้องปูวัสดุกันซึมที่ก้นหลุมตั้งแต่ช่วงเตรียมพื้นที่ฝังกลบขยะ

การรวบรวมน้ำชะมูลฝอยทำได้โดยวางท่อบนวัสดุกันซึมที่ก้นหลุมให้สามารถรับน้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นได้ทั่วทั้งหลุม

3.1.5 การระเหย

การระเหย (evaporation) คือการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวหรือของแข็งไปเป็นสถานะก๊าซ และแพร่สู่บรรยากาศ

3.1.5.1 กลไกการระเหย

ถ้าขยายหยดน้ำเล็ก ๆ ให้ใหญ่ขึ้น จะเห็นว่าโมเลกุลเหล่านั้นไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเดียวกันทั้งหมด บางโมเลกุลจะเคลื่อนที่เร็วกว่าโมเลกุลอื่น พลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่นี้เรียกว่า พลังงานจลน์ (kinetic energy) อุณหภูมิของน้ำหรือสสารต่าง ๆ ก็เป็นการวัดพลังงานจลน์เฉลี่ยของสารนั้น หรือกล่าวได้ว่า อุณหภูมิคือค่าความเร็วเฉลี่ยของโมเลกุล ถ้าเพิ่มพลังงานให้กับน้ำ โมเลกุลของน้ำก็จะเคลื่อนที่เร็วขึ้น และอุณหภูมิก็จะสูงขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าเอาพลังงานออก โมเลกุลก็จะเคลื่อนที่ช้าลง และอุณหภูมิก็ลดลง

กระบวนการการเคลื่อนที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ผิวน้ำ โมเลกุลที่มีความเร็วพอเพียงและเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เหมาะสมจะหลุดออกจากผิวของเหลวเข้าสู่บรรยากาศ โมเลกุลเหล่านี้เปลี่ยนจากสถานะของเหลวไปเป็นไอในกระบวนการที่เรียกว่า "การระเหย" ขณะที่มีบางโมเลกุลหลุดออกจากของเหลวก็มีส่วนที่กลับเข้ามาจากสถานะไอเป็นของเหลว เรียกกระบวนการนี้ว่า "การควบแน่น" ดังนั้นที่ผิวของเหลวเราจะพบว่ามีทั้งโมเลกุลที่ระเหย (หนีออกไป) และที่ควบแน่น (กลับเข้ามา)

3.1.5.2 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการระเหย

การระเหยจะเกิดขึ้นได้จะต้องมีปัจจัยต่อไปนี้

3.1.5.2.1 มีแหล่งน้ำ

3.1.5.2.2 มีแหล่งความร้อน ซึ่งอาจเป็นจาก

- พลังงานแสงอาทิตย์, R_s

- จากกระแสอากาศ, H

- จากพื้นดิน, G

- จากพื้นน้ำ, R_s

3.1.5.2.3 มีผลต่างของความดันไอน้ำอิ่มตัวที่ผิวน้ำกับความดันไอน้ำในบรรยากาศเป็นบวก ($e_s - e_d > 0$)

3.1.5.3 องค์ประกอบที่ควบคุมการระเหยของน้ำ

อัตราการระเหยของน้ำขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่อไปนี้

3.1.5.3.1 องค์ประกอบทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่

- รังสีดวงอาทิตย์ แปรตามละติจูด ฤดูกาล เวลาของวัน และสภาพของท้องฟ้า

- ความดันไอน้ำ อัตราการระเหยของน้ำแปรตามค่าผลต่างระหว่างความดันไอน้ำของน้ำกับความกดไอน้ำของอากาศเหนือผิวน้ำดังสมการของดาลตัน

$$E = f(u)(e_s - e_d) \quad \text{..... (3.1)}$$

โดยที่ E = ค่าอัตราการระเหย

f(u) = ฟังก์ชั่นของความเร็วลม

e_s = ความดันไอน้ำที่ผิวน้ำ

e_d = ความดันไอน้ำในบรรยากาศ ณ ความสูงหนึ่ง

ถ้าผลต่างของความดันไอน้ำมีค่าเป็นบวกการระเหยของน้ำจะเกิดขึ้น จนกระทั่งค่าผลต่างของไอน้ำมีค่าเป็นศูนย์การระเหยของน้ำก็จะหยุดลง

- อุณหภูมิของอากาศ เมื่ออากาศมีอุณหภูมิสูง โมเลกุลของไอน้ำที่อยู่ในอากาศก็จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เมื่อไอน้ำชนกับอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศก็จะเป็นการชนแบบสะท้อนกลับ แต่เมื่ออากาศมีอุณหภูมิต่ำ โมเลกุลของไอน้ำจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ เมื่อไอน้ำชนกับอนุภาคที่ลอยอยู่ในอากาศก็จะเป็นการชนแบบเกาะติด ทำให้อนุภาคในอากาศมีขนาดและมวลเพิ่มขึ้น เมื่อการชนเกิดขึ้นหลายครั้งก็จะกลายเป็นละอองน้ำขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในอากาศและตกลงสู่ผิวน้ำในที่สุดเมื่อมีมวลมากพอ ดังนั้นการที่อากาศมีอุณหภูมิต่ำ โอกาสที่โมเลกุลของน้ำในบรรยากาศจะกลับลงสู่พื้นน้ำจะมีมากขึ้น ทำให้อัตราการระเหยต่ำกว่าเมื่ออากาศมีอุณหภูมิสูง

- ลม ดังสมการของดาลตัน (สมการที่ 3.1) อัตราการระเหยแปรผันตรงกับฟังก์ชั่นของความเร็วลม โดยที่ลมจะทำให้เกิดความแปรปรวนของกระแสอากาศเหนือผิวน้ำ จึงเกิดการพาไอน้ำที่อยู่บริเวณผิวน้ำออกไปสู่บรรยากาศเร็วขึ้น ทำให้ความดันไอน้ำในบรรยากาศลดต่ำลง โมเลกุลของน้ำที่ผิวน้ำจึงมีโอกาสจะหลุดเข้าสู่บรรยากาศมากขึ้น นอกจากนั้นลมยังช่วยในการถ่ายเทพลังงานให้กับโมเลกุลของน้ำที่ผิวน้ำอีกด้วย

- ความกดของบรรยากาศ ในบริเวณที่มีความกดอากาศสูงจะมีโมเลกุลของอากาศอยู่หนาแน่น ทำให้โอกาสที่โมเลกุลของน้ำที่หลุดเข้าสู่บรรยากาศจะชนกับโมเลกุลของอากาศและกลับเข้าสู่พื้นน้ำมีมากขึ้น

3.1.5.3.2 คุณภาพของน้ำ

น้ำที่ถูกเจือปนจะมีความดันไอของน้ำนั้นลดลง เป็นผลให้การระเหยลดต่ำลง นอกจากนั้นความขุ่นและสีของน้ำเจือปนยังมีผลต่อการดูดกลืนและการสะท้อนพลังงานความร้อนทำให้พลังงานและอุณหภูมิของแหล่งน้ำนั้นเปลี่ยนแปลงไป อัตราการระเหยจึงเปลี่ยนไป

3.1.5.4 การคำนวณหาค่าการระเหยของน้ำ การหาค่าน้ำระเหยไม่สามารถวัดได้โดยตรง ต้องหาโดยการคำนวณจากสมการต่าง ๆ ดังนี้

3.1.5.4.1 วิธีสมดุลของน้ำ

อาศัยหลักการสมดุลน้ำ

น้ำเข้า = น้ำออก

$$I + P + \Delta S = O + O_g + E \qquad \text{..... (3.2)}$$

โดยที่ E = ค่าน้ำระเหย

ΔS = การเปลี่ยนแปลงน้ำในการกักเก็บน้ำ

I = น้ำไหลเข้า

P = น้ำฝน

O = น้ำไหลออก

O_g = น้ำซึมออก

ในทางปฏิบัติมีข้อผิดพลาดในการวัดปริมาณน้ำไหลเข้า-ออก และมีการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำกักเก็บมาก ทำให้ได้ค่าการระเหยของน้ำที่ผิดพลาดและเวลาที่ใช้ในการหาน้ำระเหยควรจะใช้เวลานานพอที่จะทำให้ค่าการระเหยมีมากเมื่อเทียบกับเทอมอื่น ๆ

3.1.5.4.2 วิธีสมดุลของพลังงาน

อาศัยหลักการของกฎทรงพลังงานได้สมการ

$$R_n = H + G + LE + R_s + R_p + R_i \qquad \text{..... (3.3)}$$

โดยที่ R_n = ปริมาณรังสีรวมที่ผิวน้ำได้รับ

$= R_c(1-r) - R_b$

R_c = ปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์

r = อัตราการสะท้อนรังสีที่บรรยากาศ

R_b = ปริมาณรังสีที่สะท้อนกลับ ณ ผิวน้ำ

H = ความร้อนที่ถ่ายเทจากอากาศสู่ผิวน้ำ หรือในทิศทางตรงข้าม

G = ความร้อนที่เข้าสู่พื้นดิน

LE = ความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนของเหลวให้กลายเป็นไอ โดยที่ L เป็นความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ และ E เป็นค่าการระเหย

R_s = ความร้อนที่เก็บอยู่ในน้ำ

R_p = ความร้อนที่เปลี่ยนเป็นพลังงานเคมี ในกระบวนการสังเคราะห์แสง

R_i = ความร้อนที่เข้าหรือออกจากระบบ โดยการไหลเข้าหรือออกจากน้ำ

ค่า R_p ไม่ค่อยนำมาใช้เนื่องจากมักมีค่าต่ำกว่า 1% ค่า R_s และ R_i สามารถหาได้จากอุณหภูมิและปริมาตรของน้ำ ค่า G อาจนำมาคิดรวมกับ R_s ได้ ดังนั้นจึงแปรรูปสมการใหม่โดยใช้ค่า R แทนค่า $R_n - G - R_s - R_i$ และตัด R_p ออกจากสมการ จะได้

$$R = H + LE \qquad \text{..... (3.4)}$$

กำหนดอัตราส่วนของโบเวนไว้ดังนี้

$$\beta = \frac{H}{LE} \qquad \text{..... (3.5)}$$

$$\beta = \frac{\rho C_p K_H \partial T/\partial z}{\rho L K_W \partial q/\partial z} \qquad \text{..... (3.6)}$$

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta q} \qquad \text{..... (3.7)}$$

จากสมการที่ (3.4) และสมการที่ (3.5) จะได้

$$E = \frac{R}{L(1+\beta)}$$

$$E = \frac{R}{L} \frac{1}{[1 + \gamma (T_s - T_a)/(e_s - e_d)]} \qquad \text{..... (3.8)}$$

โดยที่ C_p = ค่าความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

T_s = อุณหภูมิที่ผิวน้ำ

T_a = อุณหภูมิอากาศ

e_s = ความดันไอน้ำที่ผิวน้ำ

e_d = ความดันไอน้ำจริงที่บรรยากาศ

K_H = สัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อน

K_W = สัมประสิทธิการถ่ายเทไอน้ำ

q = ความชื้นจำเพาะ

ซึ่ง T_a และ e_d ต้องวัดที่ระดับความสูงเดียวกัน

วิธีสมดุลของพลังงานนี้ให้ผลที่ดีกว่าวิธีอื่น ๆ แต่การตรวจวัดหาค่าของเทอมต่าง ๆ มีความยุ่งยาก

3.1.5.4.3 วิธีอากาศพลศาสตร์ (Aerodynamic approach)

อาศัยสมการของดาลตัน

$$E = f(u)(e_s - e_d) \quad \text{..... (3.9)}$$

ซึ่ง f(u) เป็นฟังก์ชั่นของความเร็วลมที่อยู่ในรูป a (1 + bu) โดยที่ a และ b เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความสูงที่วัด e_d และ u และขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผิวน้ำระเหย

ทฤษฎีพื้นฐานของสมการคือการถ่ายเทไอน้ำจากผิวน้ำไปสู่บรรยากาศทำให้เกิดกระบวนการแปรปรวนซึ่งสามารถหาได้ในรูปของความเร็วลมและความดันไอน้ำ แล้วจึงแปลงเป็นค่าอัตราการระเหยดังความสัมพันธ์ในสมการของดาลตัน

3.1.5.4.4 วิธีผสมระหว่างอากาศพลศาสตร์และสมการสมดุลพลังงาน จะได้

$$E = \frac{R\Delta/L + E_a\gamma}{\Delta + \gamma} \quad \text{..... (3.10)}$$

โดยที่ $E_a = f(u)(e_a - e_d)$

e_a = ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่บรรยากาศ

และ $\Delta = \frac{e_s - e_a}{T_s - T_a}$

3.1.6 เทคนิคในการเร่งการระเหย

3.1.6.1 โดยการจุ่มขดลวดความร้อนเพื่อให้ของเหลวได้รับความร้อนอย่างทั่วถึง

3.1.6.2 โดยการผ่านกระแสก๊าซร้อนลงในท่อที่ขดอยู่ในของเหลว

3.1.6.3 โดยการทำให้เป็นฟิล์มบางที่อุณหภูมิสูง

3.1.6.4 โดยการพ่นเป็นฝอยที่อุณหภูมิสูง

3.1.6.5 โดยการฉีดพ่นไปยังที่อุณหภูมิสูงและความดันต่ำ

3.1.6.6 โดยการเผาก๊าซภายในของเหลว

3.1.7 บ่อระเหย

เป็นวิธีการจัดการน้ำชะมูลฝอยที่สะดวกที่สุดวิธีหนึ่ง มักใช้กับพื้นที่ที่ไม่ให้มีการปล่อยน้ำชะมูลฝอยออกสู่แหล่งน้ำ ในบริเวณที่มีฝนตกชุกบ่อระเหยจะถูกคลุมด้วยแผ่นกันซึมเพื่อป้องกันน้ำฝนตกลงไปในบ่อ น้ำชะมูลฝอยที่ถูกรวบรวมไว้จะถูกกำจัดออกโดยการระเหยในช่วงฤดูร้อนโดยการนำแผ่นกันซึมออก และโดยการพ่นน้ำเป็นฝอยบนหลุมฝังกลบขยะ ก๊าซที่เกิดขึ้นถูกระบายออกทางท่อระบายก๊าซ มีการเติมอากาศในช่วงฤดูร้อนเพื่อควบคุมการเกิดกลิ่น

<u>ข้อดีของการใช้บ่อระเหยในการจัดการน้ำชะมูลฝอย</u>

- ไม่มีน้ำไหลออกเนื่องจากน้ำชะมูลฝอยทั้งหมดถูกระเหยกลายเป็นไอในระหว่างกระบวนการ
- การใช้พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นแหล่งพลังงานในการระเหย ทำให้ไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานในระบบ

<u>ข้อเสียของการใช้บ่อระเหยในการจัดการน้ำชะมูลฝอย</u>

- ตะกอนที่เหลือจากการระเหยอาจเป็นของเสียอันตราย
- ค่าใช้จ่ายสำหรับที่ดินที่ใช้ในการก่อสร้างบ่อระเหย ค่อนข้างสูง ยกเว้นในแถบอากาศร้อน

3.1.8 การระเหยของหยดน้ำ

ในการพ่นน้ำให้เป็นฝอยจะทำให้อัตราการระเหยของน้ำสูงขึ้นเนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของน้ำที่รับพลังงานความร้อนจากบรรยากาศโดยรอบ จึงทำให้โมเลกุลนั้นมีพลังงานสูงพอที่จะแยกออกจากโมเลกุลอื่นในหยดน้ำเป็นอิสระกลายเป็นไอน้ำได้เร็วขึ้น

การระเหยของหยดน้ำที่เกิดจากการพ่นน้ำเป็นฝอยจะเกิดได้ดีเมื่อ

3.1.8.1 มีความเสียดทานระหว่างอากาศกับหยดน้ำมาก

3.1.8.2 มีความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่ำ

3.1.8.3 มีพลังงานความร้อนสูง

3.1.9 สีและการดูดแสง

วัตถุที่มีสีดำและสีเข้มสามารถดูดแสงและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ดี ในขณะที่วัตถุที่มีสีขาวและสีอื่นจะดูดแสงและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้น้อยกว่าเนื่องจากเกิดการสะท้อนที่ผิววัตถุได้มากกว่า

3.2 ทฤษฎีที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

3.2.1 การประมาณปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้น

3.2.1.1 ปฏิกิริยาทางชีวภาพในหลุมฝังกลบขยะ

3.2.1.1.1 ปฏิกิริยาแบบใช้ออกซิเจน

จากสมการปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ + ออกซิเจน + สารอาหาร $\xrightarrow{\text{แบคทีเรีย}}$ เซลล์ใหม่ + สารอินทรีย์ที่เหลือ
+ คาร์บอนไดออกไซด์ + น้ำ + แอมโมเนีย
+ ซัลเฟต + ... + ความร้อน

กำหนดให้สูตรเคมีของสารอินทรีย์อยู่ในรูป $C_aH_bO_cN_d$ ไม่คิดการเกิดของเซลล์ใหม่และซัลเฟต และสูตรเคมีของสารอินทรีย์มีเหลือจากปฏิกิริยาเป็น $C_wH_xO_yN_z$ ดังนั้นสามารถดุลโมลของสมการได้ดังนี้

$$C_aH_bO_cN_d + 0.5(ny + 2s + r - c)O_2 \longrightarrow nC_wH_xO_yN_z + sCO_2 + rH_2O + (d - nz)NH_3$$

โดยที่ $r = 0.5\,[b - nx - 3(d-nz)]$

$s = a - nw$

หาค่า a, b, c และ d ได้โดยการทำ Ultimated analysis เพื่อแยกส่วนประกอบของขยะ และหาปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดเมื่อออกซิเจนถูกใช้ไปจนหมดและเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแทน

จากสมการ เมื่อทราบปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ จะสามารถหาปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาได้ พร้อมทั้งค่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกใช้ไป และที่เหลือจากปฏิกิริยา

3.2.1.1.2 ปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน

จากสมการปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ + น้ำ + สารอาหาร $\longrightarrow$ เซลล์ใหม่ + สารอินทรีย์ที่เหลือ + คาร์บอนไดออกไซด์
+ มีเทน + แอมโมเนีย + ไฮโดรเจนซัลไฟด์
+ ความร้อน

ในการนำสมการมาใช้ เราสามารถเขียนสมการการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็น มีเทน, คาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย ได้ดังนี้

$$C_aH_bO_cN_d \longrightarrow nC_wH_xO_yN_z + mCH_4 + sCO_2 + rH_2O + (d - nz)NH_3$$

โดยที่ $s = a - nw - m$

$r = c - ny - 2s$

จากสมการ จะต้องทราบค่าอัตราส่วน s : m ซึ่งมักมีค่าประมาณ 2.7 : 3.9 (สำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร) และปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลือจากปฏิกิริยาการย่อย

สลายแบบใช้ออกซิเจนหลังจากที่ออกซิเจนได้ถูกใช้จนหมดแล้ว ก็จะสามารถหาปริมาณน้ำที่เกิดขึ้นได้

ปริมาณน้ำที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ทั้งแบบใช้ออกซิเจน และแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อนำมารวมกัน แล้วหักล้างด้วยปริมาณน้ำที่สามารถกักเก็บได้ในชั้นกลบฝังกลบ ก็จะได้เป็นปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นจากหลุมฝังกลบขยะ

3.2.1.2 การหาส่วนประกอบของขยะ

สำหรับขยะมูลฝอยที่เป็นขยะอินทรีย์ เมื่อกำหนดให้สูตรเคมีของสารอินทรีย์อยู่ในรูป $C_aH_bO_cN_d$ จะสามารถหาสูตรเคมีของขยะอินทรีย์ได้โดยการใช้ Ultimate analysis ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของขยะโดยแยกย่อยเป็นส่วน ๆ ทีละขั้นจนถึงระดับอะตอม ดังแสดงในตารางที่ 3.3 แล้วจึงนำมาคำนวณหาสูตรโมเลกุลของขยะอินทรีย์โดยนำค่าความชื้นของขยะมาคิดด้วย

ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างข้อมูลจากการวิเคราะห์หาส่วนประกอบขยะชุมชน (Tchobanoglous และคณะ, 1993)

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์โดยมวล					
	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	ไนโตรเจน	ซัลเฟอร์	ขี้เถ้า
สารอินทรีย์						
เศษอาหาร	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
กระดาษ	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
กระดาษแข็ง	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
พลาสติก	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
ผ้า	55.0	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
ยาง	78.0	10.0	-	2.0	-	10.0
หนัง	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
เศษใบไม้	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
ไม้	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
สารอนินทรีย์						
แก้ว	0.5	0.1	0.4	<0.1	-	98.9
โลหะ	4.5	0.6	4.3	<0.1	-	90.5
เศษผง, ขี้เถ้า	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0

3.2.2 การหาค่าพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำชะมูลฝอย

จากการทดลองต้มน้ำกลั่นและน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบขยะพร้อมกันบนแผ่นให้ความร้อน ที่ควบคุมให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พบว่า ทั้งน้ำกลั่นและน้ำชะมูลฝอยถูกระเหยเป็นปริมาณเท่ากัน และวัดจุดเดือดของของเหลวทั้ง 2 ได้เท่ากัน ดังนั้น ค่าพลังงานที่ใช้ในการระเหยของเหลวทั้ง 2 จึงใกล้เคียงกัน

ในการวิจัยนี้จึงใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำและค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำในการหาพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำชะมูลฝอย

ค่าความจุความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ = 1 แคลอรี/กรัม-องศาเซลเซียส

ค่าความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ = 540 แคลอรี/กรัม

หาค่าพลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการระเหยจากสูตร

พลังงานที่ถูกใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำ = $mc\Delta T$

โดยที่ c = ค่าความจุความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของของเหลว

m = มวลของของเหลว

พลังงานที่ถูกใช้ไปในการระเหยน้ำเดือด = mL

โดยที่ m = มวลของของเหลวที่กลายเป็นไอ

L = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของของเหลว

เมื่อน้ำชะมูลฝอยมีอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส

จุดเดือดของน้ำชะมูลฝอยประมาณเท่ากับจุดเดือดของน้ำกลั่น(จากการทดลอง) ซึ่งเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส

ดังนั้นพลังงานที่ต้องใช้ในการระเหยน้ำชะมูลฝอย = (100-30) แคลอรีต่อมิลลิลิตร

+ 540 แคลอรีต่อมิลลิลิตร

= 610 แคลอรีต่อมิลลิลิตร

= 610 กิโลแคลอรีต่อลิตร

3.2.3 สมการการระเหย

ในการทดลองนี้ต้องนำข้อมูลการระเหยและสภาพอากาศที่วัดได้มาหาความสัมพันธ์ในรูปของสมการ เพื่อนำไปใช้ประมาณค่าการระเหยที่เกิดขึ้น ณ สภาพอากาศต่างๆ ในช่วงเดือนต่างๆ ของปี โดยปัจจัยที่จำกัดค่าการระเหยคือค่าผลต่างของความดันไอน้ำอิ่มตัวกับความดันไอน้ำในบรรยากาศ (e_a-e_d)

ดังนั้นค่าการระเหยที่ได้อยู่ในรูป

$$E = k(e_a-e_d)^d$$

เมื่อ k เป็นค่าจากปัจจัยอื่นๆ และ d เป็นค่าคงที่

ปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดการระเหยคือ

1. การถ่ายเทมวลสารจากน้ำสู่บรรยากาศโดยไม่ขึ้นกับลมและแสงอาทิตย์ ซึ่งสมมุติเป็น a

2. การถ่ายเทพลังงานจากลมสู่ผิวน้ำ และการพัดพาไอน้ำเหนือผิวน้ำซึ่งเป็นการลดความดันไอน้ำเหนือผิวน้ำ สมมุติเป็น bU โดยที่ U คือความเร็วลม

3. การถ่ายเทพลังงานจากแสงอาทิตย์สู่ผิวน้ำ สมมุติเป็น cR โดยที่ R คือค่าพลังงานแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่

เมื่อค่า k เป็นผลรวมของปัจจัยทั้ง 3 ดังนั้น

$$k = a + bU + cR$$

จึงได้รูปสมการการระเหยเป็น

$$E = (a + bU + cR)(e_a - e_d)^d$$

ซึ่งมีรูปแบบคล้ายกับสมการของดาลตัน(สมการที่ 3.9)