

การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการไหลผ่านช่องทางเปิด

จรัญ บุญกาญจน์¹, สมทิพย์ ด้านธีรวิชย์², จันทิมา ชั่งสิริพร³ และ จรรยา อินทมนต์⁴

Abstract

Bunyakan, C., Danteravanich, S., Chungsiriporn, J., and Intamane, J.

Ammonia Removal from Water using Channel Flow Method

Ammonia removal is an important step in skim rubber sheet production. The most commonly used technique to remove ammonia from skim latex is a channel flow method where the skim latex was forced to flow through the shallow channel for a long distance. This technique requires large space and long operating time. Thus, it needs to be improved. This research was aimed to investigate the influence of ammonia volatilization from open channel. The ammonia volatilization from open channel was performed in open channel which is 0.23 m wide and 20 m long. The water flow rate through the channel was varied from 10 to 50 L/min. The overall mass transfer coefficients of ammonia were determined and compared to those obtained from ammonia volatilization from water due to agitation and wind speed which was previously investigated. The results have shown that the mass transfer coefficients of ammonia by using channel flow method were significantly higher than those of agitation and there was lower than those of wind speed method, as expected. The magnitude of mass transfer coefficient of channel flow method suggested that the ammonia volatilization rate from water due to flow effect is high enough for ammonia removal from skim latex. In order to reduce space and minimize operating time of channel flow method, we, however, recommended the use of channel flow method in cooperate with the wind speed method. From this work, we have found that both the flow effect and the wind speed over water surface significantly enhance the mass transfer coefficient of ammonia. Thus, the combination of these effects will definitely enhance the ammonia transfer rate. The removal efficiency of this combine system will definitely higher than that of conventional one which only agitation or channel flow was applied.

Key words: Ammonia , Volatilization, Mass Transfer Coefficient, Air pollution

¹Ph.D. (Chemical Engineering) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วศ.ม. (วิศวกรรมเคมี) อาจารย์ วท.บ. (เคมี) ครูชำนาญการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 ²Ph.D. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โครงการจัดตั้งวิทยาเขตสุราษฎร์ธานี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.เมือง จ.สุราษฎร์ธานี

Corresponding e-mail: bcharun@ratree.psu.ac.th

บทคัดย่อ

การกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำอย่างเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตยางสกิม วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม คือการให้หางน้ำยางไหลหมุนเวียนไปตามรางส่งหางน้ำยางภายในโรงงานซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องใช้พื้นที่มากและใช้เวลานาน และต้องการการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อศึกษาปัจจัยของการไหลผ่านช่องทางเปิดต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิด

การศึกษาการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดดำเนินการในช่องทางเปิด กว้าง 0.23 m ยาว 20 m อัตราการไหลของน้ำผ่านช่องทางเปิดที่ศึกษาอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 L/min ทำการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่อัตราการไหลต่างๆและเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ที่วัดได้จากการศึกษานี้ที่ได้กับค่าที่ได้จากการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำเนื่องจากผลของการกวนและผลของความเร็วลมที่ได้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี ผลการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่ได้จากการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่มีการกวนอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่ระเหยจากน้ำที่มีกระแสลมพัดผ่านตามที่คาดไว้ จากขนาดของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่ระเหยจากน้ำเนื่องจากผลการไหลผ่านช่องทางเปิดที่วัดได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำเนื่องจากการไหลผ่านช่องทางเปิดมีค่าสูงและสามารถใช้วิธีการดังกล่าวในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางได้ อย่างไรก็ตามเพื่อลดพื้นที่และเวลาที่ใช้ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางโดยวิธีการดังกล่าว ควรใช้วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดควบคู่กับการใช้ลมเป่าบนผิวน้ำ จากการศึกษานี้พบว่าทั้งผลของการไหลในช่องทางเปิดและผลกระแสลมที่เป่าไปบนผิวน้ำทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การใช้วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดควบคู่กับการใช้ลมเป่าเป็นการรวมผลของทั้งการไหลและผลของความเร็วลมเข้าด้วยกัน ดังนั้นการใช้วิธีการจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางสูงกว่าการใช้วิธีแบบเก่าซึ่งนิยมใช้วิธีการกวนหางน้ำยางหรือการปล่อยให้หางน้ำยางไหลหมุนเวียนในรางเพียงอย่างเดียว

บทนำ

การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำในขณะไหลผ่านช่องทางเปิดเป็นกระบวนการที่พบได้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้น การไหลของของเหลวในลักษณะที่เป็นการไหลผ่านช่องทางเปิดที่พบในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้น ได้แก่ การไหลของหางน้ำยางที่ออกจากเครื่องปั่นแยกไปยังบ่อพัก ซึ่งจะปล่อยให้หางน้ำยางไหลไปตามรางเปิดที่ออกแบบให้มีการไหลหมุนเวียนเป็นระยะทางยาวๆ ก่อนไหลลงสู่บ่อพัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางก่อนการจับตัว แม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางได้โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำแต่มีข้อเสียก็คือแอมโมเนียจะถูกปล่อยสู่บรรยากาศโดยตรงโดยไม่ได้ผ่านการบำบัดซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อบรรยากาศและสิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้นได้ การศึกษาเพื่อประเมินอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำในขณะไหลผ่านช่องทางเปิดจึงเป็นสิ่งจำเป็น การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อศึกษาวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากน้ำในขณะไหลผ่านช่องทางเปิด และทำการเปรียบเทียบผลกับการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการอื่นๆ ที่ได้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้เช่น โดยวิธีการกวนและการใช้พัดลมเป่าเป็นต้น การเปรียบเทียบระหว่าง 3 วิธีที่ศึกษาจะนำไปสู่ข้อสรุปที่เป็นประโยชน์สำหรับใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาปรับปรุงวิธีการหรือกระบวนการกำจัดแอมโมเนียจากหางน้ำยางได้ ในขณะเดียวกันความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียกับตัวแปรดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการไหลผ่านช่องทางเปิดที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ในการประมาณปริมาณของแอมโมเนียที่ระเหยจากน้ำสู่บรรยากาศในขณะไหลผ่านช่องทางเปิดในโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางข้นได้

อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การศึกษาการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำโดยการไหลผ่านช่องทางเปิดกระทำในชุดทดลองขนาดโรงงานต้นแบบที่ประกอบด้วยช่องทางเปิดขนาด ยาว 20 เมตร กว้าง 0.2 เมตร และสูง 0.1 เมตร ดังปิดสำหรับบรรจุสารละลายแอมโมเนียบีมสำหรับบีมสารละลาย และระบบท่อส่งสารละลาย โดยช่องทางเปิดวางอยู่บนฐานรองที่มีความชันเล็กน้อย ปลายด้านด้านทางออกของช่องทางเปิดถูกเชื่อมต่อเข้าไปในถังปิดโดยตรง ที่ก้นของถังติดตั้งบีมซึ่งใช้บีมสารละลายจากถังไปบ่อนยัง ปลายด้านทางเข้าของช่องทางเปิดและไหลผ่านช่องทางเปิดกลับลงสู่ถัง เนื่องจากระบบท่อและถังเป็นระบบปิดประกอ กับปลายด้านทางออกของช่องทางเปิดถูกเชื่อมต่อเข้าไปในถังปิดโดยตรงจึงสามารถประมาณได้ว่ากระเหยทั้งหมดเกิดขึ้น เฉพาะในส่วนช่องทางเปิดที่เปิดสู่บรรยากาศเท่านั้น ไดอะแกรมแสดงชุดการทดลองการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำในที่ไหลผ่านช่องทางเปิดแสดงดัง Figure 1 การทดลองที่สภาวะต่างๆจะเริ่มด้วยการเตรียมสารละลายแอมโมเนียโดยการละลายสารละลายแอมโมเนียในน้ำปริมาตร 120 L ให้มีความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียตามต้องการ สารละลายดังกล่าวถูกบีมเข้าสู่ถังเก็บสารละลายแอมโมเนียของชุดทดลอง เปิดบีมของถังเก็บสารละลายเพื่อบีมสารละลายแอมโมเนียด้วยอัตราการไหลที่ต้องการจากถังเก็บสารละลายไปยังทางเข้าของช่องทางเปิด สารละลายที่บีมเข้าสู่ช่องทางเปิดถูกปล่อยให้ไหลผ่านช่องทางเปิดเป็นระยะทางยาวประมาณ 20 m และไหลกลับลงสู่ถังเก็บสารละลายอีกครั้ง สารละลายแอมโมเนียจะไหลหมุนเวียนแบบนี้ไปอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาจนสิ้นสุดการทดลอง ในแต่ละการทดลองหลังจากที่ปล่อยให้สารละลายไหลหมุนเวียนในระบบไประยะเวลาหนึ่ง (ประมาณ 30 นาที) จึงเริ่มการทดลองโดยเก็บตัวอย่างสารละลายที่ตำแหน่งต่างๆ 3 ตำแหน่งคือ ที่ทางเข้าของช่องทางเปิด (แสดงด้วย sampling 1 ใน Figure 1) ที่ทางออกของช่องทางเปิด (แสดงด้วย sampling 2 ใน Figure 1) และภายในถังเก็บสารละลาย (แสดงด้วย sampling 3 ใน Figure 1) จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆข้างต้นทุก 1 ชั่วโมงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองซึ่งจะใช้เวลาประมาณ ตั้งแต่ 5-9 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับ

อัตราการไหลของสารละลาย อัตราการไหลของสารละลายผ่านช่องทางเปิดที่ใช้ในการศึกษานี้อยู่ในช่วง 10-50 L/min สภาวะเริ่มต้นของการทดลองเพื่อศึกษาการระเหยของแอมโมเนียจากสารละลายแอมโมเนียที่ไหลผ่านช่องทางเปิดแสดงใน Table 1 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอมโมเนียในตัวอย่างของสารละลายที่เก็บที่เวลาต่างๆ ใช้วิธีมาตรฐาน Phenate method (APHA, AWWA, and WPCF, 1995) ซึ่งจะวิเคราะห์ความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในตัวอย่าง ข้อมูลความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียที่เปลี่ยนไปกับเวลาจะถูกนำมาใช้หาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนีย จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียกับตัวแปรดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการไหลผ่านช่องทางเปิดโดยใช้วิธีการทำการถดถอยพหุคูณ

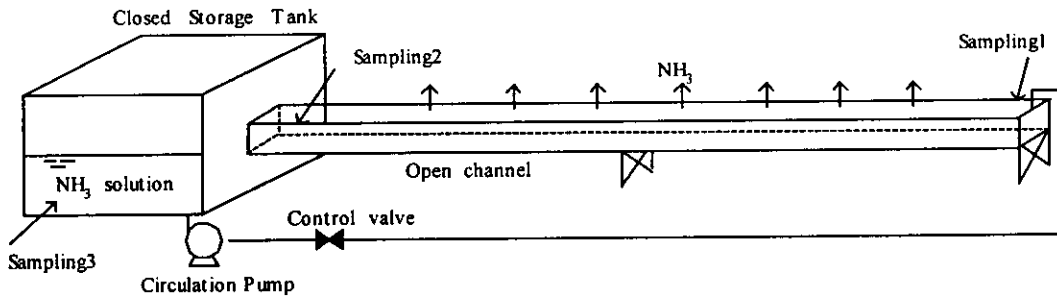


Figure 1 The experimental setup to investigate the ammonia removal rate from water channel flow

Table 1 Initial condition for studying the influence of flow in open channel on ammonia removal rate from water at $27 \pm 1^\circ\text{C}$

Run No.	Liquid Flow Rate, Q, (L/min)	Initial Ammonia Concentration in Solution at Various Positions (mg/L)			
		Channel Inlet	Channel Outlet	Storage Tank	Average
1	10	459	462	559	493
2	20	321	334	360	338
3	30	453	445	440	446
4	40	442	425	445	437
5	50	516	497	493	502

ผลการทดลองและวิจารณ์

การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นกับเวลา

จากการวัดความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียจากการทดลองระเหยแอมโมเนียในชุดทดลองตาม Figure 1 ที่เวลาใด ๆ ที่ตำแหน่งต่างๆ 3 ตำแหน่งคือ ตำแหน่ง 1 ที่ทางเข้าของช่องทางเปิด (แสดงด้วย sampling 1 ใน Figure 1) ตำแหน่ง 2 ที่ทางออกของช่องทางเปิด (แสดงด้วย sampling 2 ใน Figure 1) และตำแหน่ง 3 ภายในถังเก็บสารละลาย (แสดงด้วย sampling 3 ใน Figure 1) พบว่าความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในทั้ง 3 ตำแหน่งที่ตรวจวัดมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยในตอนเริ่มต้นแต่เมื่อปล่อยให้ระบบดำเนินการไปประมาณ 30 นาที พบว่าความเข้มข้นรวมของแอมโมเนีย ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ตรวจวัดที่เวลาใดๆ มีค่าที่ใกล้เคียง แต่จะแปรเปลี่ยนกับเวลาโดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงโดยทั่วไปของความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียกับเวลาและตำแหน่งที่ตรวจวัด แสดงดัง Figure 3 ถึง Figure 5 สำหรับอัตราการไหลผ่านช่องทางเปิดเท่ากับ 10, 30 และ 50 L/min ตามลำดับ ความเข้มข้นเฉลี่ยของระบบที่เวลาใดๆ ได้จากค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นที่วัดได้จาก 3 ตำแหน่งดังกล่าว ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเฉลี่ยกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงดัง Figure 6 การลดลงของความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียในระบบกับเวลาเกิดจากการระเหยของแอมโมเนียในบริเวณช่องทางเปิดซึ่งเป็นบริเวณเดียวของระบบที่เปิดสู่อากาศและมีความปั่นป่วนของสารละลายแอมโมเนียเนื่องจากการไหลผ่านช่องทางแคบๆ จากข้อมูลการลดลงของความเข้มข้นกับเวลาสามารถนำมาสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของการไหลผ่านช่องทางเปิดต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำได้ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

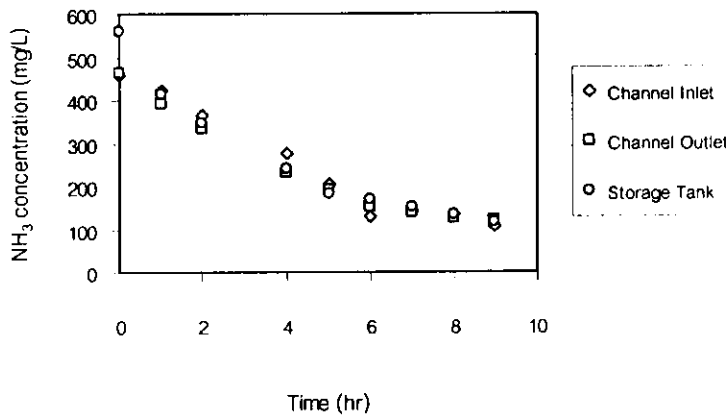


Figure 3 Ammonia concentration as function of volatilization time at various positions for a flow rate of 10 L/min

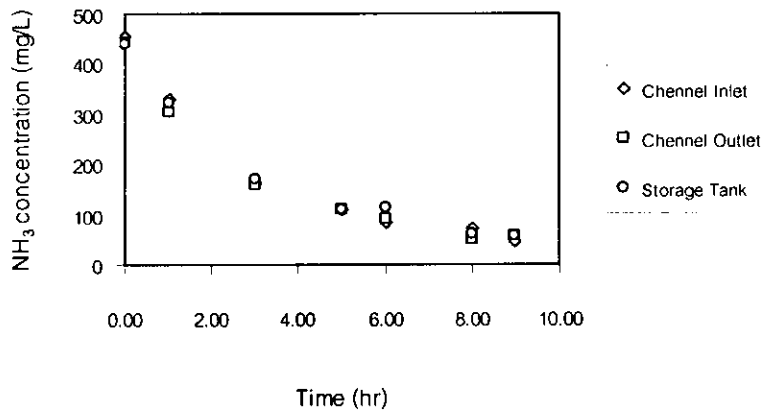


Figure 4 Ammonia concentration as function of volatilization time at various positions for a flow rate of 30 L/min

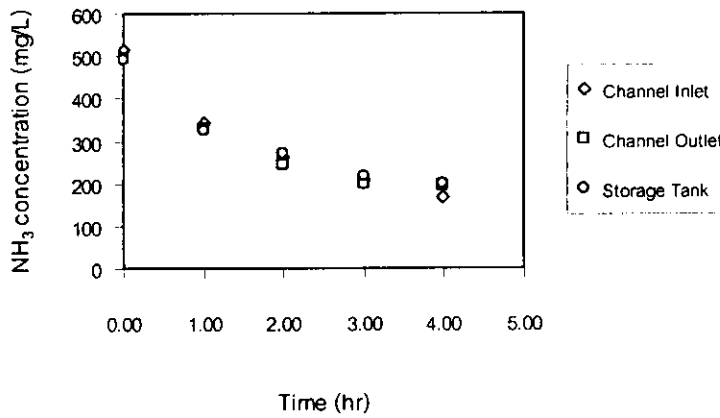


Figure 5 Ammonia concentration as function of volatilization time at various positions for a flow rate of 50 L/min

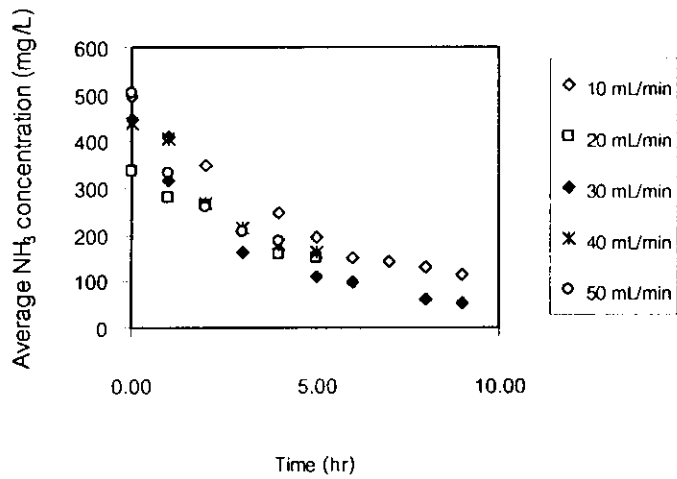


Figure 6 Average ammonia concentration as function of volatilization time at various flow rates

การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียในการไหลผ่านช่องทางเปิด

ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียในการไหลผ่านช่องทางเปิดด้วยชุดการทดลองตาม Figure 1 นั้นจะพิจารณาให้ทั้งช่องทางเปิดและถังเก็บสารละลายเป็นระบบเดียวกันโดยมีปริมาตรควบคุมดังแสดงใน Figure 7

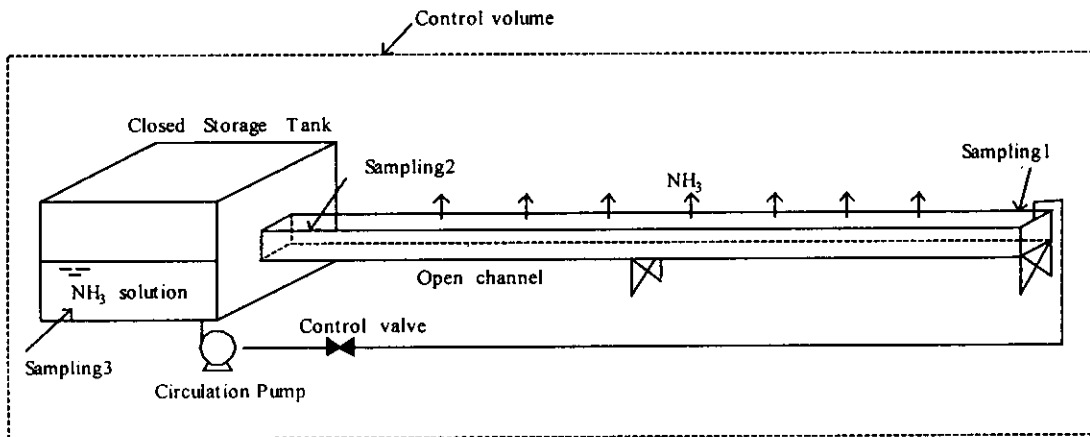


Figure 7 Control volume for determining overall mass transfer coefficient of ammonia volatilizing from open channel flow system

อัตราการระเหยของแอมโมเนียจากปริมาตรควบคุมที่แสดงใน Figure 7 สามารถหาค่าได้โดยการทำดุลมวลของแอมโมเนียรอบปริมาตรควบคุมจะได้ว่า

$$\text{Rate of } NH_3 \text{ flow into the system} - \text{Rate of } NH_3 \text{ flow out from the system} - \text{Rate of } NH_3 \text{ Removal} = \text{Rate of } NH_3 \text{ changed within the system}$$

หรือ
$$R_{NH_3, in} - R_{NH_3, out} - R_{NH_3} = Vf \frac{dC_t}{dt} \quad (1)$$

เมื่อ $R_{NH_3, in}$ คือ อัตราการไหลของแอมโมเนียเข้าสู่ระบบ (kg/s, mg/s) $R_{NH_3, out}$ คือ อัตราการไหลของแอมโมเนียออกจากระบบ (kg/s, mg/s) R_{NH_3} คืออัตราการระเหยของแอมโมเนียจากระบบ (kg/s, mg/s) และเทอม $Vf \frac{dC_t}{dt}$ คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียภายในระบบ (kg/s, mg/s) โดยที่ C_t คือความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในระบบ (kg/m³, mg/L) f คือสัดส่วนของแอมโมเนียอิสระในน้ำ (ไม่มีหน่วย) V คือปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียในระบบ (m³, L) และ t คือเวลาที่ใช้ในการระเหยของแอมโมเนีย (s)

เมื่อพิจารณาปริมาตรควบคุมของระบบตาม Figure 7 จะได้ว่า $R_{NH_3, in} = R_{NH_3, out} = 0$ ดังนั้นสมการ (1) ลดรูปเป็น

$$R_{NH_3} = -Vf \frac{dC_t}{dt} \quad (2)$$

นอกจากการทำดุลมวลข้างต้นแล้วอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากระบบที่พิจารณาสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์ม (Whitman., 1923) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ (3)

$$R_{NH_3} = K_{OL} a f C_t \quad (3)$$

เมื่อ $K_{OL} a$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากระบบแทนค่า R_{NH_3} จากสมการ (3) ในสมการ (2) จะได้ว่า

$$-Vf \frac{dC_t}{dt} = K_{OL} a f C_t$$

หรือ
$$\frac{dC_t}{C_t} = \frac{-K_{OL} a}{V} dt \quad (4)$$

อินทิเกรตสมการ (4) จากเวลาเริ่มต้น t_0 ถึงเวลาใดๆ t ที่ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในระบบลดลงจาก C_{t_0} เป็น C_t ใดๆ จะได้ว่า

$$\ln \frac{C_t}{C_{t_0}} = \frac{-K_{OL} a}{V} t \quad (5)$$

จากสมการ (5) สามารถหาค่า $K_{OL} a$ ได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(C_t / C_{t_0})$ กับ t คือ

$$K_{OL} a = -VS \quad (6)$$

เมื่อ S คือความชันของกราฟ (1/s) ดังนั้นโดยการวัดความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในระบบที่พิจารณาที่เวลาต่างๆ ตลอดกระบวนการระเหยภายใต้สภาวะที่สนใจก็จะสามารถหาค่า $K_{OL} a$ ของแอมโมเนียภายใต้สภาวะนั้นได้ หน่วยของ $K_{OL} a$ จะขึ้นอยู่กับหน่วยของปริมาตรที่ใช้เมื่อปริมาตรของระบบมีหน่วยเป็น m³ หน่วยของ $K_{OL} a$ ที่นิยมใช้คือ m³/s ความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในระบบในที่นี้คือความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียเฉลี่ยที่ได้จากการวัดความเข้มข้นรวม

ของแอมโมเนียที่ตำแหน่งต่างๆ 3 ตำแหน่งในระบบดังได้กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว ข้อมูลความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในระบบที่อัตราการไหลผ่านช่องทางเปิดต่างๆ ได้แสดงไว้แล้วใน Figure 6 เมื่อนำข้อมูลความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในระบบที่เวลาต่างๆ ของแต่ละอัตราการไหลมาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(C_t/C_{t_0})$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีลักษณะทั่วไปดังแสดงใน Figure 8

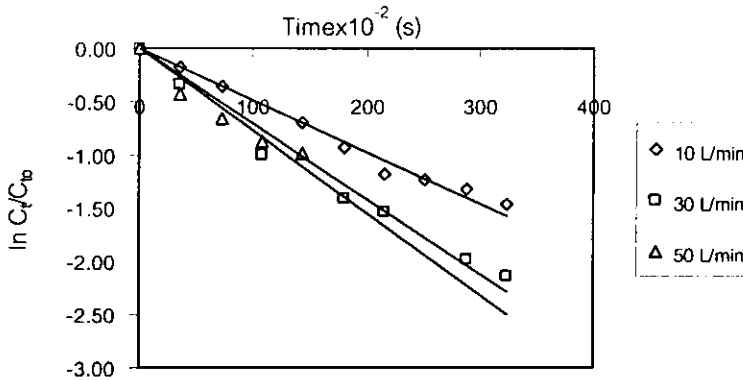


Figure 8 Typical plot of $\ln(C_t/C_{t_0})$ versus time at various flow rate (at water temperature of 27 °C)

จาก Figure 8 พบว่า กราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(C_t/C_{t_0})$ กับ t เป็นกราฟเส้นตรงที่มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.92 ถึง 0.98 จึงมีความเป็นเชิงเส้นสูงแสดงว่ากระบวนการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดในระบบที่ศึกษาสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (1) ถึงสมการ (5) ค่าความชัน (S) และค่า R^2 ของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(C_t/C_{t_0})$ กับ t ที่อัตราการไหลต่างๆแสดงไว้ใน Table 2 จากค่าความชันของกราฟดังกล่าวและปริมาตรของสารละลายในระบบสามารถคำนวณค่า $K_{OL}a$ ของการระเหยของแอมโมเนียที่อัตราการไหลในช่องทางเปิดต่างๆได้ดังแสดงใน Table 2

Table 2 $K_{OL}a$ of ammonia for various rate of flow through open channel at water temperature of 27°C

Q (L/min)	$S \times 10^5$ (1/s)	R^2	V (m ³)	$K_{OL}a \times 10^6$ (m ³ /s)
10	4.82	0.98	0.12	5.79
20	4.68	0.97	0.12	5.62
30	7.05	0.97	0.12	8.46
40	5.91	0.96	0.12	7.09
50	7.73	0.92	0.12	9.28

อิทธิพลของการไหลผ่านช่องทางเปิดต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากน้ำ

ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดในระบบที่ศึกษาคือความปั่นป่วนในกระแสของน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิด โดยระดับความปั่นป่วนในกระแสน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญๆ คือ ความหนาแน่นของน้ำ ความหนืดของน้ำ ความเร็วเฉลี่ยของกระแสน้ำ ความลึก และความกว้างของช่องทางเปิดซึ่งสามารถแสดงในเทอมของตัวเลขของเรโนลด์ ได้ดังสมการ (7) (Streeter., 1983)

$$Re = \frac{\rho U R_h}{\mu} \quad (7)$$

เมื่อ $Re =$ ตัวเลขเรโนลด์ (Reynolds' number), ไม่มีหน่วย

$U =$ ความเร็วเฉลี่ยของกระแสน้ำในช่องทางเปิด, m/s

$\rho =$ ความหนาแน่นของน้ำ, kg/m³,

$\mu =$ ความหนืดของน้ำ, kg/(m s) และ

$R_h =$ รัศมีไฮดรอลิก (Hydraulic radius), m.

โดย R_h มีนิยามตามสมการ (8) (Nevers, N.D., 1991)

$$R_h = \frac{A}{P}$$

เมื่อ $A =$ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล, m², และ

$P =$ เส้นรอบรูปที่เปียกด้วยของไหล (wetted perimeter), m.

เมื่อพิจารณาการไหลผ่านช่องทางเปิดที่มีความกว้างของช่องทางเปิดเป็น w (m) และมีความลึกของน้ำในช่องทางเปิดเท่ากับ h (m) รัศมีไฮดรอลิกของการไหลผ่านช่องทางเปิดนี้คือ

$$R_h = \frac{wh}{w + 2h} \quad (8)$$

เมื่อ $w =$ ความกว้างของช่องทางเปิด, m, และ

$h =$ ความลึกของน้ำในช่องทางเปิด, m.

ค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำหรับการคำนวณค่า Re และค่า Re ที่คำนวณได้ที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงไว้พร้อมกับค่า $K_{OL}a$ ที่วัดได้จากการทดลองใน Table 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ กับ Re แสดงใน Figure 9 .

Table 3 Fluid properties, system characteristic, Re and $K_{OL}a$ of ammonia at various water flow rate

Q (m ³ /s)	$w \times 10^2$ (m)	$h \times 10^2$ (m)	$U \times 10^2$ (m/s)	ρ (kg/m ³)	$\mu \times 10^4$ (kg/ m.s)	$R_h \times 10^2$ (m)	$Re \times 10^3$ (-)	$K_{OL}a \times 10^6$ (m ³ /s)
10	23	1.0	7.2	997	8.88	0.92	0.75	5.79
20	23	1.2	12.1	997	8.88	1.09	1.47	5.62
30	23	1.4	15.5	997	8.88	1.25	2.18	8.46
40	23	1.6	18.1	997	8.88	1.40	2.86	7.09
50	23	1.8	20.1	997	8.88	1.56	3.52	9.28

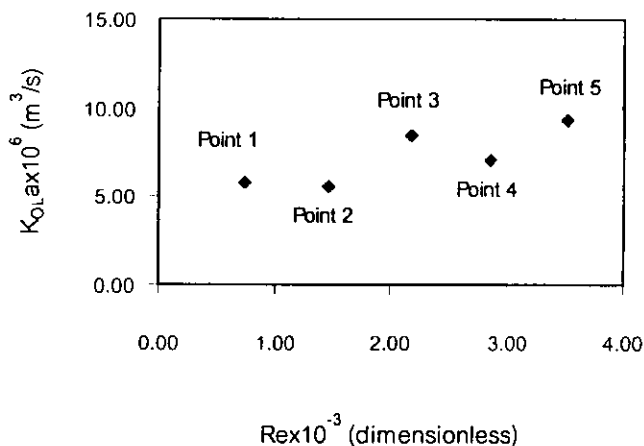


Figure 9 The $K_{OL}a$ of ammonia as function of Re for water flow in open channel (water temperature = 27 °C)

จาก Figure 9 ถ้าพิจารณาตลอดช่วงของ Re ที่ศึกษาพบค่า $K_{OL}a$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้ อย่างไรก็ตามถ้าพิจารณาช่วงการไหลที่ Re น้อยกว่า 2000 ลักษณะการไหลภายในช่องทางเปิดจะเป็นแบบราบเรียบค่า $K_{OL}a$ จะเปลี่ยนแปลงกับค่า Re น้อยมาก ดังแสดงด้วยข้อมูลจุดที่ 1 และ จุดที่ 2 ใน Figure 9 ซึ่งมีค่า Re เท่ากับ 750 และ 1470 ตามลำดับ แต่เมื่อ Re สูงขึ้นจะเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ $K_{OL}a$ กับ Re ชัดเจนขึ้นดังแสดงด้วยข้อมูล จุดที่ 3 จุดที่ 4 และ จุดที่ 5 ใน Figure 9 ซึ่งมีค่า Re เท่ากับ 2180, 2860 และ 3520 ตามลำดับ จากข้อมูลการทดลองพบว่าไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ กับ Re ที่ชัดเจนได้ เนื่องจากมีการกระจายตัวของ $K_{OL}a$ ค่อนข้างมาก สาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการแกว่งของ $K_{OL}a$ มากในช่วงดังกล่าวเพราะลักษณะการไหลตกอยู่ในช่วงของการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Transition region) ซึ่งโดยปกติจะมีค่า Re อยู่ในช่วง 2000 ถึง 4000 (Nevers, N.D., 1991) ดังนั้นในช่วงของอัตราการไหลที่ใช้ในการศึกษานี้จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ กับ Re ที่ถูกต้องได้ ข้อมูลจากการทดลองที่ได้บอกได้แต่เพียงว่า $K_{OL}a$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นกับ Re โดยความสัมพันธ์อย่างง่ายที่สามารถใช้ประมาณแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ $K_{OL}a$ กับ Re ในช่วงของ Re ที่ศึกษาคือ

$$K_{OL}a = 1.22 \times 10^{-9} Re + 4.62 \times 10^{-6}; 0.75 \times 10^3 \leq Re \leq 3.52 \times 10^3 \quad (10)$$

โดยมีค่า R² เท่ากับ 0.7 แสดงว่ามีความกระจายของข้อมูลในระดับหนึ่งโดยมีสาเหตุตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า $K_{OL}a$ ที่วัดได้จากการระเหยของแอมโมเนียที่ไหลผ่านช่องทางเปิดด้วยอัตราการไหลที่ศึกษาพบว่ามีค่าสูงพอสมควรโดยมีขนาดอยู่ในช่วงเดียวกับกับค่า $K_{OL}a$ ที่ได้จากการศึกษาการระเหยของแอมโมเนียโดยวิธีการอื่นๆ (จรัญ และ คณะ, 2547) ดังแสดงเปรียบเทียบใน Table 4

Table 4 $K_{OL}a$ for volatilization of ammonia from water by using various methods

Open Channel Flow			Agitation			Wind		
Q (L/min)	$Rex \times 10^{-3}$ (-)	$K_{OL}a \times 10^6$ (m^3/s)	Agitation speed (RPM)	$R_e \times 10^{-4}$ (-)	$K_{OL}a \times 10^6$ (m^3/s)	Wind Speed, U_{10cm} (m/s)	$R_{e10cm} \times 10^{-4}$ (-)	$K_{OL}a$ $\times 10^6$ (m^3/s)
10	0.75	5.79	0	0.00	0.23	0.00	0.00	1.00
20	1.47	5.62	50	2.11	0.25	0.46	11.73	3.53
30	2.18	8.46	150	6.36	0.49	1.52	38.76	6.17
40	2.86	7.09	250	10.56	1.01	2.58	65.79	7.03
50	3.52	9.28	400	16.90	1.50	3.37	85.94	11.59
						4.21	107.36	12.97
						4.80	122.40	17.14

จากการเปรียบเทียบค่า $K_{OL}a$ ของแอมโมเนียที่วัดได้จากกระบวนการกระเหยของแอมโมเนียจากน้ำในขณะที่ไหลผ่านช่องทางเปิดโดยวิธีการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้พบว่าค่า $K_{OL}a$ ของแอมโมเนียที่วัดได้มีขนาดอยู่ในช่วงเดียวกับกับค่าที่วัดได้จากกระบวนการกระเหยของแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการอื่นๆ คืออยู่ในช่วงของ 10^6 แสดงว่าวิธีการทดลองและแนวทางการวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้มีความน่าเชื่อถือและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาการกระเหยของแอมโมเนียหรือสารอินทรีย์ระเหยอื่นๆจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดภายใต้สภาวะนอกเหนือจากสภาวะที่ใช้ในการทดลองนี้ได้

และเมื่อเปรียบเทียบค่า $K_{OL}a$ ที่ได้จากกระเหยของแอมโมเนียโดยวิธีต่างๆ ทั้งสามวิธีคือ วิธีการไหลในช่องทางเปิด วิธีการกวน และวิธีการใช้ลมเป่า โดยใช้อัตราการใช้ลมเป่า ความเร็วรอบในการกวน และความเร็วลมดังค่าที่แสดงใน Table 4 พบว่าวิธีการใช้ลมเป่าจะให้ค่า $K_{OL}a$ สูงสุด และวิธีการไหลในช่องทางเปิดให้ค่า $K_{OL}a$ รองลงมา ในขณะที่วิธีการกวนให้ค่า $K_{OL}a$ ต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่รายงานไว้ว่ากระบวนการกระเหยของแอมโมเนียจากน้ำถูกควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส การใช้กระแสลมเป่าไปบนผิวน้ำเป็นวิธีการที่ลดความหนาของฟิล์มแก๊สได้โดยตรงทำให้อัตราการกระเหยของแอมโมเนียและ $K_{OL}a$ สูงกว่ากรณีของการกวนซึ่งเป็นการลดความหนาของฟิล์มแก๊สทางอ้อมดังรายละเอียดที่มีรายงานไว้ก่อนหน้านี้ (จรัญ และคณะ, 2547) แม้ว่าการไหลผ่านช่องทางเปิดจะเป็นการทำให้เกิดความปั่นป่วนในชั้นของของเหลวเป็นหลักเหมือนกับกรณีของการกวนแต่ความลึกของของเหลวในการไหลผ่านช่องทางเปิดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวของช่องทางเปิด ความปั่นป่วนของการไหลของของเหลวที่เกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวไหลผ่านช่องทางเปิดจะถูกถ่ายโอนไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวน้ำและอากาศได้ดีกว่าจึงสามารถลดฟิล์มแก๊สได้ดีกว่ากรณีของการกวนซึ่งปกติจะมีความลึกเท่ากับ ความกว้างของถังกวน อัตราส่วนของความลึกต่อขนาดของระบบ (เช่น ความยาว ความกว้าง หรือ เส้นผ่าศูนย์กลาง) มีผลต่อการถ่ายโอนมวล (Lunney, et al., 1985., Chern and Yu., 1997) และกระแสไหลวนของของเหลว คือระบบที่มีอัตราส่วนของความลึกต่อขนาดของระบบต่ำจะมีการถ่ายโอนมวลและเกิดกระแสไหลวนได้ดีกว่าระบบที่มีอัตราส่วนของความลึกต่อขนาดสูง อัตราส่วนของความลึกของของเหลวต่อความยาวของช่องทางเปิดที่ใช้ในการศึกษา

มีค่าอยู่ในช่วง 4.98×10^{-4} ถึง 8.97×10^{-4} ในขณะที่อัตราส่วนของความลึกของเหลวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวนมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสูงกว่าในกรณีของการไหลผ่านช่องทางเปิดถึงประมาณ 1000-2000 เท่า ดังนั้นค่า K_{OL} ของการไหลผ่านช่องทางเปิดจึงสูงกว่ากรณีของการกวนแม้ว่าจะมีค่าตัวเลขเรโนลด์ส์ต่ำกว่าก็ตาม

จากการศึกษานี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการไหลผ่านช่องทางเปิดเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำได้ดีในระดับหนึ่งและดีกว่าวิธีการกวนมาก จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางได้ การเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้นเพื่อลดพื้นที่และเวลาที่ใช้ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางสามารถทำได้โดยการใช้วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดควบคู่กับการใช้กระแสลมเป่าบนผิวน้ำ ซึ่งบางโรงงานสามารถดำเนินการได้เลยโดยไม่เพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินการแต่อย่างใด เพราะในปัจจุบันทางโรงงานผลิตน้ำยางชั้นได้ส่งหางน้ำยางจากเครื่องปั่นแยกไปยังบ่อพักหางน้ำยางโดยให้ไหลไปตามรางอยู่แล้ว เพียงแต่ต้องปรับปรุงระบบรางให้มีฝาครอบเพื่อให้สามารถเป่าลมเข้าไปในรางส่งหางน้ำยางได้ กระแสลมที่ใช้สามารถนำมาจากกระแสลมที่ปล่อยทิ้งจากปล่องของเตาอบยาง ทั้งนี้ความเร็วของกระแสลมที่ใช้อาจจะไม่จำเป็นต้องสูงเท่ากับค่าที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยความเร็วที่เหมาะสมอาจจะอยู่ในช่วง 1-3 m/s แต่เมื่อรวมทั้งอิทธิพลเนื่องจากการไหลผ่านรางตื้นๆ และอิทธิพลของกระแสลมที่เป่าไปบนผิวน้ำของหางน้ำยางก็สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางได้ดีกว่าและใช้เวลาสั้นกว่าการกำจัดแอมโมเนียโดยการปล่อยให้หางน้ำยางไหลหมุนเวียนไปตามรางส่งหางน้ำยางเพียงอย่างเดียว

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิด ขนาด กว้าง 0.23 m ยาว 20.07 m และใช้อัตราการไหลของน้ำในช่วง 10 ถึง 50 L/min สามารถสรุปได้ว่าวิธีการทดลองและแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้หาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่ระเหยจากกระแสน้ำในขณะที่ไหลผ่านช่องทางเปิดได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่วัดได้มีขนาดอยู่ในช่วงเดียวกับค่าที่วัดได้จากการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการอื่น และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการต่างๆ 3 วิธี คือ การไหลผ่านช่องทางเปิด การกวนและการใช้กระแสลมเป่าบนผิวน้ำ พบว่าวิธีการใช้ลมเป่าบนผิวน้ำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียสูงสุด วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดให้ค่าดังกล่าวรองลงมา และวิธีการกวนให้ค่านี้น้อยที่สุด ดังนั้นการไหลผ่านช่องทางเปิดเป็นจึงเป็นวิธีการที่กำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำได้ดีในระดับหนึ่งและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางได้ การเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้นเพื่อลดพื้นที่และเวลาที่ใช้ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยาง สามารถทำได้โดยการใช้วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดควบคู่กับการใช้กระแสลมเป่าบนผิวน้ำ จากข้อมูลของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่วัดได้จากทั้งสองวิธีนี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าอิทธิพลร่วมของการไหลกับกระแสลมจะทำให้สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าวิธีการแบบเก่า ซึ่งนิยมใช้วิธีการกวนหางน้ำยางหรือการปล่อยให้หางน้ำยางไหลไปในรางเพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2545 ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.สงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ เครื่องมือ วิเคราะห์ สาธารณูปโภค ทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

จรัญ บุญทาจวน สมทิพย์ ด้านธีรวินิชย์ จันทิมา ชั่งสิริพร และ จรรยา อินทมณี. 2547. การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำ: เปรียบเทียบระหว่างการกำจัดโดยวิธีการใช้กระแสลมกับวิธีการการกวนผสม. ต้นฉบับสำหรับการตีพิมพ์ ส่งตีพิมพ์ใน ว. สงขลานครินทร์ วทท.

APHA, AWWA and WPCF. 1995. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 19th edition. American Public Health Association. Washington D.C.

Chern, J., and Yu, C. 1999. Volatile Organic Compound Emission from Diffused Aeration System: Experiment and Modeling. Ind. Eng. Chem. Res. 38(5): 2156-2159

Lunney, P.D., Springer, C. Thibodeaux, L.J. 1985. Liquid-Phase Mass Transfer Coefficients for Surface Impoundments. Environmental Progress. 4(3): 203-211.

Nevers, N.D. 1991. Fluid Mechanics for Chemical Engineers. 2nd Edition. McGraw-Hill, Inc.

Streeter, V.L., and Wylie, E.B. 1983. Fluid Mechanics. McGraw-Hill Book Company.

Whitman, W.G. 1923. Chem. Met. Eng. 29. 146