

การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการไหลผ่านช่องทางเปิด

จรัญ บุญกาญจน์¹ สมทิพย์ ด้านธีรวณิช² จันทิมา ชั่งสิริพร³
และ จรรยา อินทมณี⁴

Abstract

Bunyakan, C.¹, Danteravanich, S.², Chungsiriporn, J.¹, and Intamane, J.¹
Ammonia removal from water using channel flow method
Songklanakarin J. Sci. Technol., 2005, 27(1) : 79-89

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 is forced to flow through the shallow and long channel. This technique requires large space and long operating time. This research was aimed to investigate the influence of ammonia volatilization from open channel. The ammonia volatilization from open channel was performed in an open channel 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 liquid agitation and air blowing which were previously investigated. The results have shown that the mass transfer coefficients of ammonia by the channel flow method were significantly higher than by

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112 Thailand. ²Faculty of Technology and Management, Prince of Songkla University, Surat Thani Campus, Surat Thani, 84100 Thailand

¹Ph.D.(Chemical Engineering), ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วิศวกรรมเคมี, วิศวกรรมเคมี, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112 ²Ph.D.(Urban Engineering), ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาเทคโนโลยีและการจัดการอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีและการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตสุราษฎร์ธานี อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84100

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

รับต้นฉบับ 13 พฤษภาคม 2547 รับลงพิมพ์ 30 กรกฎาคม 2547

liquid agitation but lower than those by air blowing method, as expected. The magnitude of mass transfer coefficient of ammonia obtained suggests 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 the channel flow method, we, however, recommend the use of combined channel flow and the air blowing method. From this work, we have found that both the flow effect and the air velocity 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 combined system will definitely be higher than that of any conventional one (agitation or open channel flow).

Key words : ammonia, volatilization, mass transfer coefficient, air pollution

บทคัดย่อ

จรัญ บุญกาญจน์ สมทิพย์ ด้านธีรวินิชย์ จันทิมา ชั่งสิริพร และ จรรยา อินทมณี

การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการไหลผ่านช่องทางเปิด

ว. สงขลานครินทร์ วทท. 2548 27(1) : 79-89

การกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตยางสกิม วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการกำจัด คือการให้หางน้ำยางไหลหมุนเวียนไปตามรางส่งหางน้ำยางภายในโรงงานซึ่งเป็นวิธีการที่ต้องใช้พื้นที่มากและใช้เวลานาน และต้องการการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาปัจจัยของการไหลผ่านช่องทางเปิดต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิด

การศึกษาการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดดำเนินการในช่องทางเปิด กว้าง 0.23 เมตร ยาว 20 เมตร อัตราการไหลของน้ำผ่านช่องทางเปิดที่ศึกษาอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 ลิตร/นาที ทำการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่อัตราการไหลต่าง ๆ และเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ที่วัดได้จากการศึกษานี้กับค่าที่ได้จากการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำเนื่องจากผลของการกวนและผลของความเร็วมวลที่ได้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ ผลการศึกษาพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดมีค่าสูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่ได้จากการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการกวนอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีค่าต่ำกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่ระเหยจากน้ำโดยวิธีการใช้ลมเป่าตามที่ได้คาดไว้ จากขนาดของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่ระเหยจากน้ำเนื่องจาก การไหลผ่านช่องทางเปิดที่วัดได้จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำเนื่องการไหลผ่านช่องทางเปิดมีค่าสูงและสามารถใช้วิธีการดังกล่าวในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางได้ อย่างไรก็ตาม เพื่อลดพื้นที่และเวลาที่ใช้ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางโดยวิธีการดังกล่าว ควรใช้วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดควบคู่กับการใช้ลมเป่าบนผิวน้ำ จากการศึกษาพบว่าทั้งผลของการไหลในช่องทางเปิดและผลของ กระแสลมที่เป่าไปบนผิวน้ำทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การใช้วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดควบคู่กับการใช้ลมเป่าเป็นการรวมผลของทั้งการไหลและผลของความเร็วมวลเข้าด้วยกัน ดังนั้นการใช้วิธีการนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางสูงกว่าการใช้วิธีแบบเก่าซึ่งนิยมใช้วิธีการกวนหางน้ำยางหรือการปล่อยให้หางน้ำยางไหลหมุนเวียนในรางเพียงอย่างเดียว

การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำในขณะที่ไหลผ่านช่องทางเปิด เป็นกระบวนการที่พบได้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำยางข้น เช่น การไหลของหางน้ำยางที่ออกจากเครื่องปั่นแยกไปยังบ่อพัก ซึ่งจะปล่อยให้หางน้ำยางไหลไป

ตามรางเปิดที่ออกแบบให้มีการไหลหมุนเวียนเป็นระยะทางยาวๆ ก่อนไหลลงสู่บ่อพัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำยางก่อนการจับตัว แม้ว่าวิธีการดังกล่าวจะเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจาก

หาน้ำยางได้โดยมีค่าใช้จ่ายต่ำแต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้พื้นที่มากและใช้เวลานาน รวมทั้งการปล่อยให้แอมโมเนียระเหยจากรางเปิดสู่บรรยากาศโดยตรงโดยไม่ได้ผ่านระบบบำบัดนั้น อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของพนักงานในโรงงานได้ จึงจำเป็นต้องปรับปรุงวิธีการกำจัดแอมโมเนียจากหาน้ำยางโดยวิธีการให้หาน้ำยางไหลไปในช่องทางเปิดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น วัตถุประสงค์หลักของการวิจัยนี้คือ ศึกษาวิธีการวัดสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากน้ำในขณะไหลผ่านช่องทางเปิด และทำการเปรียบเทียบผลกับการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการอื่นๆ ที่ได้ศึกษาไว้ก่อนหน้านี้คือ วิธีการกวนและวิธีการใช้ลมเป่า การเปรียบเทียบระหว่าง 3 วิธีที่ศึกษา จะนำไปสู่ข้อสรุปที่เป็นประโยชน์สำหรับใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพและพัฒนาปรับปรุงวิธีการหรือกระบวนการที่ใช้ในการกำจัดแอมโมเนียจากหาน้ำยางได้

อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การศึกษาการกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำโดยการไหลผ่านช่องทางเปิดกระทำในชุดทดลองขนาดโรงงานต้นแบบที่ประกอบด้วย ช่องทางเปิด (ขนาดยาว 20 เมตร กว้าง 0.2 เมตร และสูง 0.1 เมตร) ถึงบรรจุสารละลายแอมโมเนีย บั้ม และระบบท่อส่งสารละลาย โดยช่องทางเปิดวางอยู่บนฐานรองที่มีความชันเล็กน้อย ปลายด้านทางออกของช่องทางเปิดถูกเชื่อมต่อเข้าไปในถังบรรจุสารละลายแอมโมเนีย ที่ก้นของถังติดตั้งบั้มซึ่งใช้บั้มสาร

ละลายจากถังไปบ่อนยังปลายด้านทางเข้าของช่องทางเปิดและไหลผ่านช่องทางเปิดกลับลงสู่ถัง เนื่องจากระบบท่อและถังเป็นระบบปิดประกอบกับปลายด้านทางออกของช่องทางเปิดถูกต่อเข้าไปในถังโดยตรงจึงสามารถประมาณได้ว่าการระเหยทั้งหมดเกิดขึ้นเฉพาะในส่วนของช่องทางเปิดที่เปิดสู่บรรยากาศเท่านั้น ไดอะแกรมแสดงชุดการทดลองการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดแสดงดัง Figure 1 การทดลองที่สภาวะต่างๆ จะเริ่มด้วยการเตรียมสารละลายแอมโมเนียโดยการละลายสารละลายแอมโมเนียในน้ำปริมาตร 120 ลิตร ให้มีความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียตามต้องการ สารละลายดังกล่าวถูกปั้มเข้าสู่ถังเก็บสารละลายแอมโมเนียของชุดทดลองเปิดบั้มของถังเก็บสารละลายเพื่อปั้มสารละลายแอมโมเนียด้วยอัตราการไหลที่ต้องการจากถังเก็บสารละลายไปยังทางเข้าของช่องทางเปิด สารละลายที่บ่อนเข้าสู่ช่องทางเปิดถูกปล่อยให้ไหลผ่านช่องทางเปิดเป็นระยะทางยาวประมาณ 20 เมตร 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) จากนั้นจึงเก็บตัวอย่างที่ตำแหน่งต่างๆ ข้างต้น

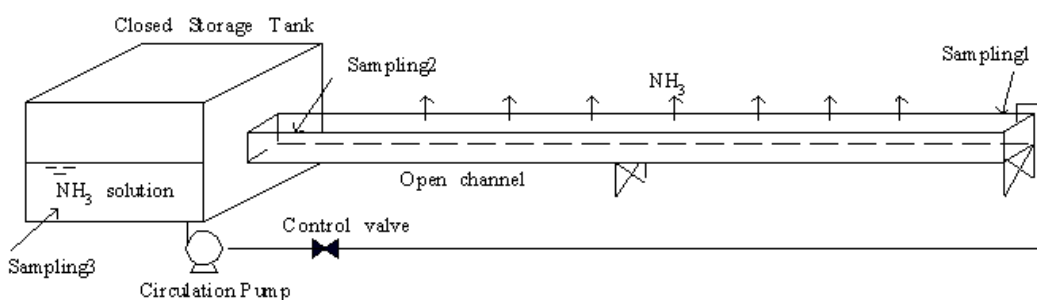


Figure 1. The experimental set-up to investigate the ammonia removal rate from water channel flow.

ทุก 1 ชั่วโมงจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งจะใช้เวลาประมาณตั้งแต่ 5-9 ชั่วโมง ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของสารละลาย อัตราการไหลของสารละลายผ่านช่องทางเปิดที่ใช้ในการศึกษานี้อยู่ในช่วง 10-50 ลิตร/นาที สภาวะเริ่มต้นของการทดลองเพื่อศึกษาการระเหยของแอมโมเนียจากสารละลายแอมโมเนียที่ไหลผ่านช่องทางเปิดแสดงใน Table 1 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอมโมเนียในตัวอย่างของสารละลายที่เก็บที่เวลาต่างๆ ใช้วิธีมาตรฐาน Phenate method (APHA, AWWA, and WPCF, 1995) ซึ่งจะวิเคราะห์ความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในตัวอย่างและนำข้อมูลความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียที่เปลี่ยนไปกับเวลามาใช้หาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนีย จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียกับตัวแปรดำเนินการที่เกี่ยวข้องกับการไหลผ่านช่องทางเปิดโดยใช้วิธีทำการถดถอยพหุคูณ

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นกับเวลา

จากการวัดความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียจากการทดลองระเหยแอมโมเนียในชุดทดลองตาม Figure 1 ที่เวลาใดๆ ที่ตำแหน่งต่างๆ 3 ตำแหน่งคือ ตำแหน่ง 1 ที่ทางเข้าของช่องทางเปิด (แสดงด้วย Sampling 1 ใน Figure 1) ตำแหน่ง 2 ที่ทางออกของช่องทางเปิด (แสดงด้วย Sampling 2 ใน Figure 1) และตำแหน่ง 3 ภายใต้งถึงเก็บสารละลาย (แสดงด้วย Sampling 3 ใน Figure 1) พบว่าความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในทั้ง 3 ตำแหน่ง

ที่ตรวจวัดมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยในตอนเริ่มต้นแต่เมื่อปล่อยให้ระบบดำเนินการไปประมาณ 30 นาที พบว่าความเข้มข้นรวมของแอมโมเนีย ณ ตำแหน่งต่างๆ ที่ตรวจวัดที่เวลาใดๆ มีค่าที่ใกล้เคียง แต่จะแปรเปลี่ยนกับเวลาโดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงโดยทั่วไปของความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียกับเวลาและตำแหน่งที่ตรวจวัด ดังแสดงใน Figure 2 ถึง Figure 4 สำหรับอัตราการไหลผ่านช่องทางเปิดเท่ากับ 10, 30 และ 50 ลิตร/นาที ตามลำดับ ความเข้มข้นเฉลี่ยของระบบที่เวลาใดๆ ได้จากค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นที่วัดได้จาก 3 ตำแหน่งดังกล่าว ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นเฉลี่ยกับเวลาที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงใน Figure 5 การลดลงของความเข้มข้นเฉลี่ยของแอมโมเนียในระบบกับเวลาเกิดจากการระเหยของแอมโมเนียในบริเวณช่องทางเปิดซึ่งเป็นบริเวณเดี่ยวของระบบที่เปิดสู่บรรยากาศและมีความปั่นป่วนของสารละลายแอมโมเนียเนื่องจากการไหลผ่านช่องทางแคบๆ จากข้อมูลการลดลงของความเข้มข้นกับเวลาสามารถนำมาสังเคราะห์เพื่อศึกษาผลของการไหลผ่านช่องทางเปิดต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมและอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำได้ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2. การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียในการไหลผ่านช่องทางเปิด

ในการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียในการไหลผ่านช่องทางเปิดด้วยชุดการทดลองตาม Figure 1 นั้นจะพิจารณาให้ทั้งช่องทางเปิดและถังเก็บสารละลายเป็นระบบเดียวกันโดยมีปริมาตรควบคุมดังแสดงใน Figure 6

Table 1. Experimental conditions for studying the influence of flow in open channel on ammonia removal rate from water at 27±1°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

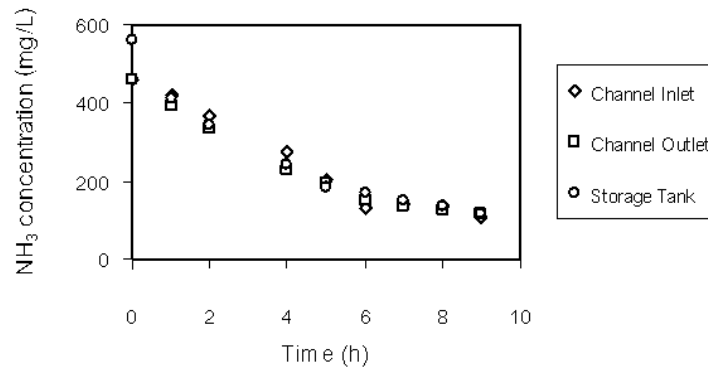


Figure 2. Ammonia concentration as function of volatilization time at various positions at a flow rate of 10 L/min.

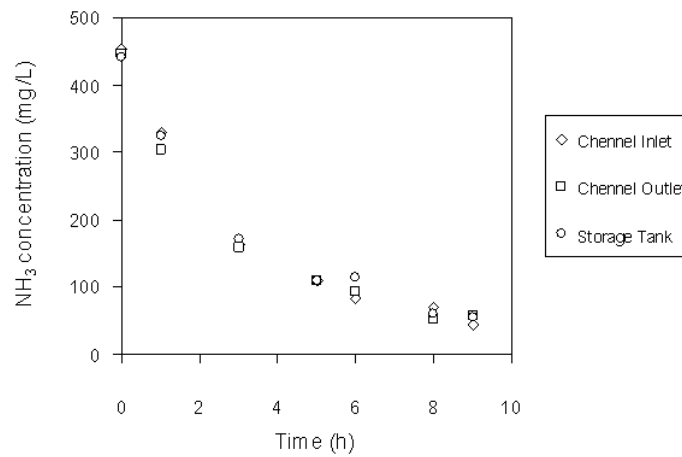


Figure 3. Ammonia concentration as function of volatilization time at various positions at a flow rate of 30 L/min.

อัตราการระเหยของแอมโมเนียจากปริมาตรควบคุมที่แสดงใน Figure 6 สามารถหาค่าได้โดยการทำดุลมวลของแอมโมเนียรอบปริมาตรควบคุมจะได้ว่า

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

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

เมื่อ $R_{NH_3,in}$ คือ อัตราการไหลของแอมโมเนียเข้าสู่ระบบ (kg/s, mg/s) $R_{NH_3,out}$ คืออัตราการไหลของแอมโมเนียออกจากระบบ (kg/s, mg/s) R_{NH_3} คือ อัตราการระเหยของ

แอมโมเนียจากระบบ (kg/s, mg/s) และเทอม $Vf \frac{dC_t}{dt}$ C_t 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 6 จะได้ว่า $R_{NH_3,in} = R_{NH_3,out} = 0$ ดังนั้นสมการ (1) ลดรูปเป็น

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

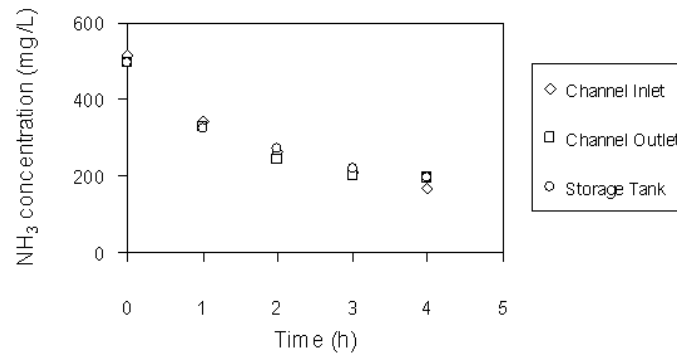


Figure 4. Ammonia concentration as function of volatilization time at various positions at a flow rate of 50 L/min.

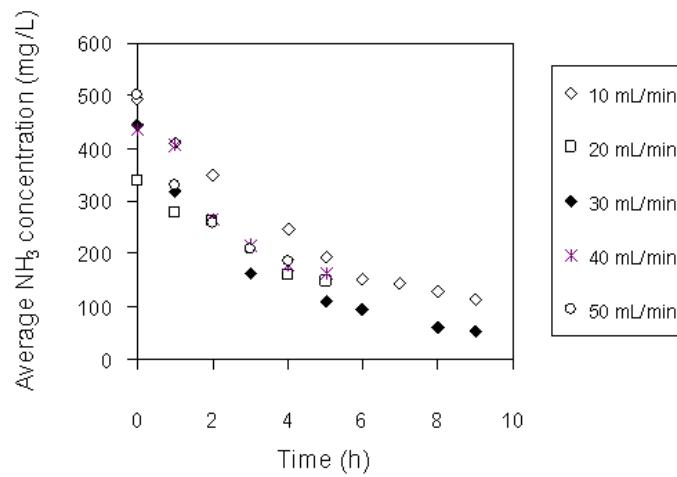


Figure 5. Average ammonia concentrations as function of volatilization time at various flow rates.

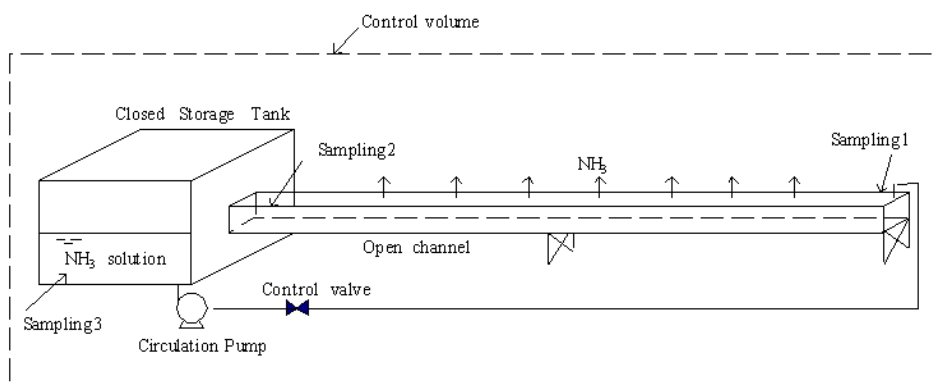


Figure 6. Control volume for determining overall mass transfer coefficient of ammonia volatilizing from open channel flow system.

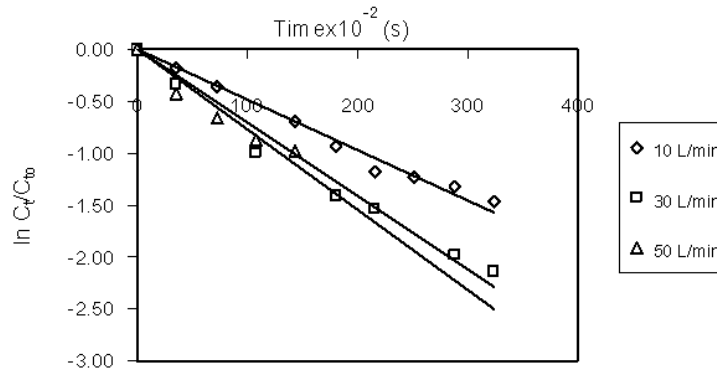


Figure 7. Typical plot of $\ln (C_t/C_{10})$ versus time at various flow rates (at water temperature of 27°C)

นอกจากการทำตุลมวลข้างต้นแล้วอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากระบบที่พิจารณาสามารถคำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีสองฟิล์มของ Whitman (อ้างโดย Treybal, 1980) ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำได้ตั้งสมการ (3) (จรัญ และคณะ, 2547)

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

เมื่อ $K_{OL} a$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากระบบ (m^3/s) แทนค่า R_{NH_3} จากสมการ (3) ในสมการ (2) จะได้

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

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

อินทิเกรตสมการ (4) จากเวลาเริ่มต้น $t_0 = 0$ ถึงเวลาใดๆ t ที่ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในระบบลดลงจาก C_{10}

เป็น C_t ใดๆ จะได้

$$\ln \frac{C_t}{C_{10}} = \frac{-K_{OL} a}{V} t \quad (5)$$

จากสมการ (5) สามารถหาค่า $K_{OL} a$ ได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(C_t/C_{10})$ 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 m^3 หน่วยของ $K_{OL} a$ ที่นิยมใช้คือ m^3/s ความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในระบบในที่นี้คือความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียเฉลี่ยที่ได้จากการวัดความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียที่ตำแหน่งต่างๆ 3 ตำแหน่งในระบบดังกล่าวถึงในหัวข้อที่แล้ว ข้อมูลความเข้มข้นรวม

Table 2. The value of $K_{OL} a$ of ammonia from water using open channel at water temperature of 27°C and different flowrates.

Q (L/min)	S×10 ⁵ (1/s)	R ²	V (m ³)	K _{OL} a×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

ของแอมโมเนียในระบบที่อัตราการไหลผ่านช่องทางเปิดต่างๆ ได้แสดงไว้แล้วใน Figure 5 เมื่อนำข้อมูลความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในระบบที่เวลาต่างๆ ของแต่ละอัตราการไหลมาพล็อตกราฟระหว่าง $\ln(C/C_{i0})$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีลักษณะทั่วไปดังแสดงใน Figure 7

จาก Figure 7 พบว่า กราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(C/C_{i0})$ กับ t เป็นกราฟเส้นตรงที่มีค่า R^2 อยู่ในช่วง 0.92 ถึง 0.98 จึงมีความเป็นเชิงเส้นที่มีความน่าเชื่อถือสูง แสดงว่ากระบวนการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดในระบบที่ศึกษาสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ (1) ถึงสมการ (5) ค่าความชัน (S) และค่า R^2 ของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(C/C_{i0})$ กับ t ที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงไว้ใน Table 2 จากค่าความชันของกราฟดังกล่าวและปริมาตรของสารละลายในระบบสามารถคำนวณค่า $K_{OL}a$ ของการระเหยของแอมโมเนียที่อัตราการไหลในช่องทางเปิดต่างๆ ได้ดังแสดงใน Table 2

3. อิทธิพลของการไหลผ่านช่องทางเปิดต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากน้ำ

ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดในระบบที่ศึกษาคือ ความปั่นป่วนในกระแสน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิด โดยระดับความปั่นป่วนในกระแสน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิดจะขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญๆ คือ ความหนาแน่นของน้ำ ความหนืดของน้ำ ความเร็วเฉลี่ยของกระแสน้ำ ความลึก และความ

กว้างของช่องทางเปิดซึ่งสามารถแสดงในเทอมของตัวเลขของเรโนลด์ ได้ดังสมการ (7) (Streeter, 1983)

$$Re = \frac{\rho U R_h}{\mu} \tag{7}$$

เมื่อ Re = ตัวเลขเรโนลด์ (Reynolds' number) ไม่มีหน่วย

U = ความเร็วเฉลี่ยของกระแสน้ำในช่องทางเปิด, m/s

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ, kg/m³

μ = ความหนืดของน้ำ, kg/m. s

R_h = รัศมีไฮดรอลิก (hydraulic radius), m

โดย R_h มีนิยามตามสมการ (8) (Nevers, 1991)

$$R_h = \frac{A}{P} \tag{8}$$

เมื่อ A = พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล, m²

P = เส้นรอบรูปที่เปียกด้วยของไหล (wetted perimeter), m

เมื่อพิจารณาการไหลผ่านช่องทางเปิดที่มีความกว้างของช่องทางเปิดเป็น w (m) และมีความลึกของน้ำในช่องทางเปิดเท่ากับ h (m) รัศมีไฮดรอลิกของการไหลผ่านช่องทางเปิดนี้คือ

$$R_h = \frac{wh}{w + 2h} \tag{9}$$

เมื่อ w = ความกว้างของช่องทางเปิด, m

h = ความลึกของน้ำในช่องทางเปิด, m

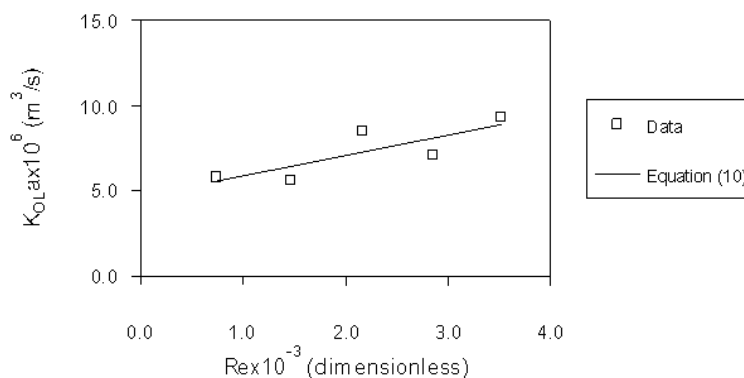


Figure 8. The of $K_{OL}a$ ammonia as function of Re of open channel system (water temperature = 27°C)

Table 3. The experimental values of $K_{OL}a$ of ammonia from water as a function of Reynolds' number.

$Q \times 10^4$ (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)
1.67	23	1.0	7.2	997	8.88	0.92	0.75	5.79
3.33	23	1.2	12.1	997	8.88	1.09	1.47	5.62
5.00	23	1.4	15.5	997	8.88	1.25	2.18	8.46
6.67	23	1.6	18.1	997	8.88	1.40	2.86	7.09
8.33	23	1.8	20.1	997	8.88	1.56	3.52	9.28

ค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องสำหรับการคำนวณหาค่า Re และค่า Re ที่คำนวณได้ที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงไว้พร้อมกับค่า $K_{OL}a$ ที่วัดได้จากการทดลองใน Table 3 ส่วนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ กับ Re แสดงใน Figure 8

จาก Figure 8 ถ้าพิจารณาตลอดช่วงของ Re ที่ศึกษาพบค่า $K_{OL}a$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม Re ที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้ อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาช่วงการไหลที่ Re น้อยกว่า 2000 ลักษณะการไหลภายในช่องทางเปิดจะเป็นแบบราบเรียบค่า $K_{OL}a$ จะเปลี่ยนแปลงกับค่า Re น้อยมาก ดังแสดงด้วยข้อมูลจุดที่ 1 และจุดที่ 2 ใน Figure 8 ซึ่งมีค่า Re เท่ากับ 750 และ 1470 ตามลำดับ แต่เมื่อ Re สูงขึ้นจะเห็นแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของ $K_{OL}a$ กับ Re ชัดเจนขึ้นดังแสดงด้วยข้อมูล จุดที่ 3 จุดที่ 4 และจุดที่ 5 ใน Figure 8 ซึ่งมีค่า Re เท่ากับ 2180, 2860 และ 3520 ตามลำดับ จากข้อมูลการทดลองพบว่าไม่สามารถระบุความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ กับ Re ที่ชัดเจนได้ เนื่องจาก

จากมีการกระจายตัวของ $K_{OL}a$ ค่อนข้างมาก สาเหตุหนึ่งที่ทำให้มีการแกว่งของ $K_{OL}a$ มากในช่วงดังกล่าวเพราะลักษณะการไหลตกอยู่ในช่วงของการเปลี่ยน (Transition region) จากการไหลแบบราบเรียบไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งโดยปกติจะมีค่า Re อยู่ในช่วง 2000 ถึง 4000 (Nevers, 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

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

Open Channel Flow			Agitation			Wind		
Q (L/min)	$Re \times 10^3$ (-)	$K_{OL}a \times 10^6$ (m ³ /s)	Agitation speed (RPM)	$Re \times 10^4$ (-)	$K_{OL}a \times 10^6$ (m ³ /s)	Wind Speed, U_{10cm} (m/s)	$Re_{10cm} \times 10^4$ (-)	$K_{OL}a \times 10^6$ (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

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาค่า K_{OL} ที่วัดได้จากการระเหยของแอมโมเนียที่ไหลผ่านช่องทางเปิดด้วยอัตราการไหลที่ศึกษาพบว่ามีค่าสูงพอสมควรโดยมีขนาดอยู่ในช่วงเดียวกับกับค่า K_{OL} ที่ได้จากการศึกษาการระเหยของแอมโมเนียโดยวิธีการอื่นๆ (จรัญ และคณะ, 2548) ดังแสดงเปรียบเทียบใน Table 4

จาก Table 4 เมื่อเปรียบเทียบค่า K_{OL} ที่ได้จากการระเหยของแอมโมเนียโดยวิธีต่างๆ ทั้งสามวิธีคือ วิธีการไหลในช่องทางเปิด วิธีการกวน และวิธีการใช้ลมเป่า โดยใช้อัตราการไหล ความเร็วรอบในการกวน และความเร็วมวลค่าที่แสดงใน Table 4 พบว่าวิธีการใช้ลมเป่าจะให้ค่า K_{OL} สูงกว่าวิธีอื่นเมื่อความเร็วมวลสูงกว่าหรือเท่ากับ 3.37 เมตร/วินาที และวิธีการไหลในช่องทางเปิดให้ค่า K_{OL} รองลงมา ในขณะที่วิธีการกวนให้ค่า K_{OL} ต่ำสุด ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาที่รายงานไว้ว่ากระบวนการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำถูกควบคุมโดยฟิล์มแก๊ส การใช้กระแสลมเป่าไปบนผิวน้ำเป็นวิธีการที่ลดความหนาของฟิล์มแก๊สได้โดยตรงทำให้อัตราการระเหยของแอมโมเนียและ K_{OL} สูงกว่ากรณีของการกวนซึ่งเป็นการลดความหนาของฟิล์มแก๊สทางอ้อมดังรายละเอียดที่มีรายงานไว้ก่อนหน้านี้ (จรัญ และคณะ, 2548) แม้ว่าการไหลผ่านช่องทางเปิดจะเป็นการทำให้เกิดความปั่นป่วนในชั้นของของเหลวเป็นหลักเหมือนกับกรณีของการกวนแต่ความลึกของของเหลวในการไหลผ่านช่องทางเปิดมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวของช่องทางเปิด ความปั่นป่วนของการไหลของของเหลวที่เกิดขึ้นในขณะที่ของเหลวไหลผ่านช่องทางเปิดจะถูกถ่ายโอนไปยังบริเวณผิวสัมผัสระหว่างผิวน้ำและอากาศได้ดีกว่าจึงสามารถลดฟิล์มแก๊สได้ดีกว่ากรณีของการกวนซึ่งปกติจะมีความลึกเท่ากับความกว้างของถังกวน อัตราส่วนของความลึกต่อขนาดของระบบ (เช่น ความยาว ความกว้าง หรือเส้นผ่าศูนย์กลาง) มีผลต่อการถ่ายโอนมวล (Lunney *et al.*, 1985; Chern and Yu, 1997) และกระแสไหลวนของของเหลว คือ ระบบที่มีอัตราส่วนของความลึกต่อขนาดของระบบต่ำจะมีการถ่ายโอนมวลและเกิดกระแสไหลวนได้ดีกว่าระบบที่มีอัตราส่วนของความลึกต่อขนาดสูง อัตราส่วนของความลึกของของเหลวต่อความยาวของช่องทางเปิดที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าอยู่ในช่วง 4.98×10^{-4} ถึง 8.97×10^{-4} ในขณะที่

อัตราส่วนของความลึกของเหลวต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวนมีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งสูงกว่าในกรณีของการไหลผ่านช่องทางเปิดถึงประมาณ 1000-2000 เท่า ดังนั้นค่า K_{OL} ของการไหลผ่านช่องทางเปิดจึงสูงกว่ากรณีของการกวนแม้ว่าจะมีค่าตัวเลขเรโนลด์ต่ำมากกว่าก็ตาม

จากการศึกษานี้จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการไหลผ่านช่องทางเปิดเป็นวิธีการที่สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำได้ดีในระดับหนึ่งและดีกว่าวิธีการกวนมาก จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดแอมโมเนียออกจากหาน้ำยางได้ การเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้นเพื่อลดพื้นที่และเวลาที่ใช้ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหาน้ำยาง สามารถทำได้โดยการใช้วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดควบคู่กับการใช้กระแสลมเป่าบนผิวน้ำ ซึ่งบางโรงงานสามารถดำเนินการได้โดยไม่ต้องเพิ่มค่าใช้จ่ายในการดำเนินการแต่อย่างใด เพราะในปัจจุบันทางโรงงานผลิตน้ำยางชั้นได้ส่งหาน้ำยางจากเครื่องปั่นแยกไปยังบ่อพักหาน้ำยางโดยให้ไหลไปตามรางเปิดอยู่แล้ว เพียงแต่ต้องปรับปรุงระบบรางให้มีฝาครอบเพื่อให้สามารถเป่าลมเข้าไปในรางส่งหาน้ำยางได้ กระแสลมที่ใช้สามารถนำมาจากกระแสลมที่ปล่อยทิ้งจากปล่องของเตาอบยาง ทั้งนี้ความเร็วของกระแสลมที่ใช้อาจจะไม่จำเป็นต้องสูงเท่ากับค่าที่ใช้ในการศึกษานี้ โดยความเร็วที่เหมาะสมอาจจะอยู่ในช่วง 1-3 เมตร/วินาที แต่เมื่อรวมทั้งอิทธิพลเนื่องจากการไหลผ่านรางต้นๆ และอิทธิพลของกระแสลมที่เป่าไปบนผิวน้ำของหาน้ำยางก็สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากหาน้ำยางได้ดีกว่าและใช้เวลาสั้นกว่าการกำจัดแอมโมเนียโดยการปล่อยให้หาน้ำยางไหลหมุนเวียนไปตามรางส่งหาน้ำยางเพียงอย่างเดียว

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ไหลผ่านช่องทางเปิด ขนาดกว้าง 0.2 เมตร ยาว 20 เมตร และใช้อัตราการไหลของน้ำในช่วง 10 ถึง 50 ลิตร/นาที สามารถสรุปได้ว่าวิธีการทดลองและแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลที่น่าเสนอในงานวิจัยนี้สามารถใช้หาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่ระเหยจากกระแสน้ำในขณะที่ไหลผ่านช่องทางเปิดได้ และเมื่อเปรียบเทียบค่า

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำโดยวิธีการต่างๆ 3 วิธี คือ การไหลผ่านช่องทางเปิด การกวนและการใช้กระแสลมเป่าบนผิวน้ำ พบว่าวิธีการใช้ลมเป่าบนผิวน้ำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียสูงสุด วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดให้ค่าดังกล่าวรองลงมา และวิธีการกวนให้ค่านี้ต่ำสุด ดังนั้นการไหลผ่านช่องทางเปิดจึงเป็นวิธีการที่กำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำได้ดีในระดับหนึ่งและสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำได้อย่างได้ การเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการดังกล่าวให้ดียิ่งขึ้นเพื่อลดพื้นที่และเวลาที่ใช้ในการกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำอย่างสามารถทำได้โดยการใช้วิธีการไหลผ่านช่องทางเปิดควบคู่กับการใช้กระแสลมเป่าบนผิวน้ำ จากข้อมูลของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียที่วัดได้จากทั้งสองวิธีนี้ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่าอิทธิพลร่วมของการไหลกับกระแสลมจะทำให้สามารถกำจัดแอมโมเนียออกจากหางน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการแบบเก่า ซึ่งนิยมใช้วิธีการกวนหางน้ำหรือการปล่อยให้หางน้ำไหลไปในรางเพียงอย่างเดียว

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยที่ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2545 ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่เครื่องมือวิเคราะห์ สาธารณูปโภค ทำให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- จรัญ บุญกาญจน์ สมทิพย์ ด้านธีรวินช์ จันทิมา ชั่งสิริพร และจรรยา อินทมณี. 2547. แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับทำนายการระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำ: ผลของอุณหภูมิและพีเอช. ว. สงขลานครินทร์ วิทยา. 26(2): 233-243.
- จรัญ บุญกาญจน์ สมทิพย์ ด้านธีรวินช์ จันทิมา ชั่งสิริพร และจรรยา อินทมณี. 2548. การกำจัดแอมโมเนียจากน้ำ: เปรียบเทียบระหว่างการกำจัดโดยวิธีการใช้กระแสลมกับวิธีการการกวนผสม. ว. สงขลานครินทร์ วิทยา. 27 (1): 65-77
- 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.
- Treybal, R.E., 1980. Mass Transfer Operations, McGraw-Hill International Editions, McGraw-Hill Book Company, Singapore.