

แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับทำนายการระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำ: ผลของอุณหภูมิและพีเอช

จรัญ บุญกาญจน์¹, สมทิพย์ ด่านธีรวิชัย² จันทิมา ชั่งสิริพร³ และ จรรยา อินทมนี⁴

Abstract

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

Simple model for the prediction of ammonia volatilization from water basin: effect of water temperature and pH

Ammonia is a primary chemical used for preserving rubber latex. Consequently, the wastewater from concentrated rubber latex processing contains high ammonia concentration. The volatilization of ammonia from such wastewater may cause an air pollution problem such as the formation of an acid rain or an aerosol of ammonium nitrate and ammonium sulfate, which can seriously affect environment and human being. To assess the air pollution problem regarding atmospheric ammonia volatilized from wastewater, the model for the prediction of ammonia volatilization rate and flux is therefore desirable. The purposes of this study were to investigate the effects of water temperature and pH on ammonia volatilization process and to develop a model to describe ammonia volatilization rate and flux including such effects.

Ammonia volatilization from water was studied by using a volatilization tank (surface area = 780 cm², volume = 7 L) placed in a water bath in order to control the water temperature. The temperature and pH in the range of 25 to 50 °C and 5 to 11 were respectively investigated. The overall mass transfer coefficients of ammonia were measured as a function of temperature and pH. The quadratic multiple regression technique was used to obtain the model for mass transfer coefficient from experimental data. The model suggests that the overall mass transfer coefficient of ammonia increases with increasing water temperature and pH while the temperature-pH interaction retards the increasing characteristic of mass transfer coefficient. Thus the increasing in mass transfer coefficient at higher temperature and pH was slower than that at the lower one. The simple model for the prediction of ammonia volatilization rate and flux was developed based on mass transfer theory and mass transfer coefficient model obtained from this study. This simple ammonia emission model can be used to predict ammonia volatilization rate and flux at any pH, water temperature and ammonia concentration in water.

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

แอมโมเนียเป็นสารเคมีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมน้ำยางชันโดยใช้เป็นสารรักษาคุณภาพน้ำยาง น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำยางชันจึงมีแอมโมเนียปนเปื้อนในปริมาณสูง การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำเสียของโรงงานเหล่านี้ในปริมาณที่สูงพออาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ เช่น การเกิดฝนกรดและการเกิดแอมโมเนียของแอมโมเนียในเขตรอบหรือแอมโมเนียซัลเฟตซึ่งมีผลต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตโดยตรง การทราบปริมาณของแอมโมเนียที่ระเหยจากน้ำเสียสู่บรรยากาศจะช่วยให้ประเมินความรุนแรงของปัญหาเหล่านี้ได้ การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ทำนายอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำจึงเป็นสิ่งจำเป็น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและ pH ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของแอมโมเนียจากน้ำและพัฒนาแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับทำนายอัตราและ ฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำโดยคำนึงถึงทั้งผลของอุณหภูมิและ pH

การทดลองการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำกระทำในอ่างระเหย (ปริมาตร 7 L พื้นที่ของการระเหย 780 cm^2) ที่วางอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ pH ที่ศึกษาอยู่ในช่วง 5-11 อุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วง $25-50 \text{ }^\circ\text{C}$ จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและ pH ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อัตราการปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับ pH จะหน่วงการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนีย ดังนั้นลักษณะการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมภายใต้สภาวะที่มีทั้งอุณหภูมิและ pH สูงจะช้ากว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิและ pH ต่ำกว่า แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการทำนายอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียถูกพัฒนาขึ้นจากทฤษฎีการถ่ายโอนมวลและแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ได้จากการศึกษานี้ แบบจำลองอย่างง่ายดังกล่าวสามารถใช้ทำนายอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียภายใต้สภาวะที่มีการแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิของน้ำ pH และความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในน้ำได้

บทนำ

แอมโมเนียเป็นสารเคมีที่ใช้มากในอุตสาหกรรมน้ำยางชั้น โดยใช้เป็นสารเคมีสำหรับรักษาคุณภาพน้ำยาง ในน้ำยางที่มีแอมโมเนียสูงฟอสโฟไลปิดจะถูกไฮโดรไลซิสให้กรดไขมันที่มีสายโซ่ยาวซึ่งจะรวมตัวกับแอมโมเนียกลายเป็นสบู่ทำให้น้ำยางมีความเสถียรไม่เน่าบูดหรือเกิดการจับตัวเป็นก้อน ดังนั้นในการผลิตน้ำยางชั้นจึงต้องเติมแอมโมเนียลงในน้ำยางสดซึ่งเป็นวัตถุดิบและในน้ำยางชั้นซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ในปริมาณ 0.4 และ 0.6 % โดยน้ำหนักตามลำดับ อัตราการใช้แอมโมเนียในโรงงานน้ำยางชั้นในภาคใต้ของประเทศไทยโดยเฉลี่ยเท่ากับ 15.22 กก./ตันน้ำยางชั้น (สมทิพย์และคณะ, 2545) ผลจากการใช้แอมโมเนียในโรงงานน้ำยางชั้นและผลจากการที่ยางมีโปรตีนเป็นส่วนประกอบซึ่งสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นแอมโมเนียได้นั้นทำให้น้ำเสียของโรงงานน้ำยางชั้นมีแอมโมเนียในโตรเจนสูง (Maheswaran and John, 1991) จากการศึกษาคุณสมบัติของน้ำเสียจากโรงงานน้ำยางชั้นในภาคใต้ของประเทศไทยพบว่ามีความสกปรกในเทอมของ Total Kjeldahl Nitrogen, TKN สูงโดยมีค่าเฉลี่ยสูงกว่า 600 มก./ล. (อาภรณ์, 2541; สมทิพย์และคณะ, 2545) ผลจากที่มีแอมโมเนียปนเปื้อนในน้ำเสียนอกจากจะส่งผลกระทบต่อระบบบำบัดน้ำเสียโดยตรงแล้วแอมโมเนียในน้ำเสียอาจจะเหยสูบรรยากาศและหรือถ่ายโอนไปสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศและมลภาวะทางน้ำได้ งานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับปัญหาการระเหยของแอมโมเนียสู่อากาศเพราะการระเหยของแอมโมเนียสู่อากาศนอกจากจะทำให้เกิดปัญหาของกลิ่นที่สร้างความรำคาญให้กับชุมชนแล้วแก๊สแอมโมเนียในบรรยากาศยังสามารถทำปฏิกิริยากับออกไซด์ของไนโตรเจนและซัลเฟอร์เกิดเป็นแอร์โรซอลของแอมโมเนียในเตรทหรือแอมโมเนียมซัลเฟตได้ แอร์โรซอลที่เกิดจากแก๊สแอมโมเนียเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของ $PM_{2.5}$ ในสหรัฐอเมริกามีรายงานว่าประมาณ 47 % โดยมวลของ $PM_{2.5}$ เป็นแอมโมเนียมซัลเฟตที่เกิดจากการปล่อยแอมโมเนียสู่อากาศ การป้องกันปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยการลดปริมาณของแอมโมเนียที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิดต่างๆ ระบบบำบัดน้ำเสียที่น้ำเสียมีความสกปรกในเทอมของแอมโมเนียและหรือ TKN สูงเป็นแหล่งกำเนิดที่มีศักยภาพในการปล่อยแอมโมเนียสู่อากาศได้ จากการศึกษาของ Aneja et al. (2001) โดยใช้ flux chamber ทำการตรวจวัดฟลักซ์ของแอมโมเนียจากบ่อไร้อากาศของระบบบำบัดน้ำเสียจำนวน 6 แห่งพบว่าอัตราการปล่อยแอมโมเนียจากแหล่งน้ำมีความสัมพันธ์อยู่กับพื้นที่การระเหยของแหล่งน้ำ อุณหภูมิของน้ำ พีเอช TKN และ ความเข้มข้นของแอมโมเนียในแหล่งน้ำ อย่างไรก็ตามการตรวจวัดอัตราการระเหยหรือการปล่อยแอมโมเนียจากน้ำโดยใช้ flux chamber เป็นวิธีการที่ต้องลงทุนจึงอาจจะยังไม่เหมาะสมกับสถานะการณ์ปัญหาการระเหยของแอมโมเนียที่ยังไม่รุนแรงมากอย่างที่พบในประเทศไทย อย่างไรก็ตามก็จำเป็นต้องมีวิธีการในการหาค่าอัตราการปล่อยแอมโมเนียจากแหล่งน้ำที่เหมาะสมเพื่อใช้ประเมินความรุนแรงของปัญหาในขั้นต้นได้

บทความนี้นำเสนอวิธีหาค่าฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำโดยใช้ทฤษฎีทางการถ่ายโอนมวล ซึ่งสามารถประมาณได้ว่าฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำใดๆจะมีค่าเท่ากับผลคูณของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียกับความเข้มข้นของแอมโมเนียในแหล่งน้ำนั้น และเพื่อให้สามารถใช้ทฤษฎีดังกล่าวกับแหล่งน้ำที่มีสถานะต่างๆได้จึงจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของแอมโมเนียจากน้ำ วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิของน้ำและผลของ pH ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากน้ำและหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากน้ำกับปัจจัยที่ศึกษา ซึ่งนอกจากจะทำให้มีความเข้าใจถึงผลของอุณหภูมิของน้ำและผลของ pH ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำแล้ว สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำที่ได้อาจสามารถพัฒนาต่อเป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่สามารถใช้ทำนายอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำที่มีอุณหภูมิและพีเอชในช่วงที่ศึกษาได้

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

ผลของ pH และอุณหภูมิต่อการระเหยของแอมโมเนีย

แอมโมเนียที่ละลายอยู่ในน้ำสามารถอยู่ได้ในรูปของแอมโมเนียอิสระ NH_3 หรือในรูปของอิออน NH_4^+ แอมโมเนียทั้งสองรูปแบบนี้จะอยู่ในสมดุลกันดังสมการ (1) (Folkman and Wachs, 1972)



จุดสมดุลที่สภาวะใดๆจะถูกกำหนดโดย pH ดังสมการ (2)

$$f = \frac{1}{1 + 10^{pKa - pH}} \quad (2)$$

เมื่อ f คือสัดส่วนของแอมโมเนียที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียอิสระ และ pKa คือค่าคงที่สมดุลของกรดโดยค่า pKa จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิดังแสดงในสมการ (3) (Aquatext, 2003)

$$pKa = 0.09018 + \frac{2729.92}{T + 273} \quad (3)$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}C$) รวมสมการ (2) และ (3) จะได้

$$f = \frac{1}{1 + 10^{(0.09018 + \frac{2729.92}{T+273} - pH)}} \quad (4)$$

จากสมการ (4) จึงเห็นได้อย่างชัดเจนว่าทั้งอุณหภูมิและ pH มีผลต่อค่าของ f ดังนั้นทั้งอุณหภูมิและ pH จึงมีผลต่ออัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำ

การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนีย และการหาค่าอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำ

ในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาคือ $25-50^{\circ}C$ แอมโมเนียมีค่าคงที่ของเฮนรีเท่ากับ $1.77 \times 10^{-5} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ที่ $25^{\circ}C$ และเท่ากับ $6.59 \times 10^{-5} \text{ atm m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ที่ $50^{\circ}C$ แสดงว่าตลอดช่วงของอุณหภูมิที่ศึกษาทั้งฟิล์มแก๊สและฟิล์มของเหลวมีผลต่อการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นรูปแบบของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของแอมโมเนียจากน้ำที่สามารถวัดได้โดยตรงจากการทดลองคือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (overall mass transfer coefficient, K_{OL}) ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยใช้ทฤษฎีฟิล์ม จากทฤษฎีฟิล์มฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำดังสมการ

$$N_{NH_3} = K_{OL} C_{NH_3} \quad (5)$$

เมื่อ N_{NH_3} คือฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำ ($\text{mol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) K_{OL} คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม (m s^{-1}) และ C_{NH_3} คือความเข้มข้นของแอมโมเนียอิสระในน้ำ (mol m^{-3}) ในทางปฏิบัติการวัดความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำจะนิยมวัดในรูปของความเข้มข้นรวมของแอมโมเนีย C_t ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ได้จากการคิดรวมทั้งแอมโมเนียในรูป NH_3 และ NH_4^+ สมการ (5) จึงสามารถเขียนใหม่ในรูปของอัตราการระเหยและความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียได้ดังสมการ (6)

$$R_{NH_3} = K_{OL} a f C_t \quad (6)$$

เมื่อ R_{NH_3} คืออัตราการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำ (mol s^{-1}) C_t คือความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในน้ำ (mol m^{-3}) $K_{OL} a$ คือสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวม ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) และ f คือสัดส่วนของแอมโมเนียอิสระในน้ำซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและ pH ตามสมการ (4) เทอมด้านซ้ายมือของสมการ (6) สามารถหาค่าได้จากการทำดุลมวลของแอมโมเนียโดยพิจารณาว่าแหล่งน้ำมี

การผสมกันอย่างสมบูรณ์จึงไม่มีเกรเดียนของอุณหภูมิและความเข้มข้น และแอมโมเนียหายไปจากระบบได้โดยกลไกการระเหยเท่านั้น ดังนั้นอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำคือ

$$R_{NH_3} = -Vf \frac{dC_t}{dt} \quad (7)$$

เมื่อ V คือปริมาตรของแหล่งน้ำที่มีแอมโมเนียละลายอยู่ (m^3) t คือเวลาที่ใช้ในการระเหยของแอมโมเนีย (s) รวมสมการ (6) และ (7) เข้าด้วยกันและอินทิเกรตจากเวลาเริ่มต้น t_0 ถึงเวลาใดๆ t ที่ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำลดลงจาก C_{t_0} เป็น C_t จะได้

$$\ln \frac{C_t}{C_{t_0}} = \frac{-K_{OL}a}{V} t \quad (8)$$

จากสมการ (7) $K_{OL}a$ สามารถหาค่าได้จากความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(C_t/C_{t_0})$ กับ t คือ

$$K_{OL}a = -VS \quad (9)$$

เมื่อ S คือความชันของกราฟ เมื่อทราบค่า $K_{OL}a$ ก็จะสามารถหาค่าอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำใดๆที่สนใจได้ดังสมการ (10) และ (11) ตามลำดับ

$$R_{NH_3} = \frac{K_{OL}aC_t}{1 + 10^{(0.09018 + \frac{2729.92}{T+273} - pH)}} \quad (10)$$

และ ฟลักซ์การระเหยคืออัตราการระเหยต่อพื้นที่ของการระเหยดังนั้น

$$N_{NH_3} = \frac{R_{NH_3}}{A} = \frac{K_{OL}aC_t}{A[1 + 10^{(0.09018 + \frac{2729.92}{T+273} - pH)}]} \quad (11)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ผิวของการระเหย (m^2) จากสมการ (10) และ (11) ถ้าทราบความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ ของแอมโมเนียกับอุณหภูมิและ pH ก็จะสามารถหาค่าอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำที่อุณหภูมิและ pH ใดๆที่สนใจได้

อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การศึกษามวลของอุณหภูมิและ pH ต่อการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำทำโดยศึกษาการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำในถังระเหยที่มีพื้นที่การระเหยเท่ากับ 780 cm^2 ซึ่งวางอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ปริมาตรของสารละลายแอมโมเนียในถังระเหยเท่ากับ 7 ลิตร อุณหภูมิของสารละลายแอมโมเนียในถังระเหยควบคุมให้คงที่โดยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำในอ่างควบคุมอุณหภูมิ เนื่องจากปริมาตรของสารละลายของแอมโมเนียในอ่างระเหยจมอยู่ในน้ำภายในอ่างควบคุมอุณหภูมิทำให้อุณหภูมิของสารละลายแอมโมเนียในอ่างระเหยมีค่าสม่ำเสมอเท่ากันทั่วทั้งถัง อุณหภูมิของสารละลายแอมโมเนียและ pH ที่ศึกษาอยู่ในช่วง $25-50^\circ\text{C}$ และ 5-11 ตามลำดับ การทดลองที่สภาวะต่างๆจะเริ่มด้วยการเตรียมสารละลายแอมโมเนียโดยการละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ในน้ำปริมาตร 7 ลิตร ให้มีความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียตามต้องการ (ความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียที่สภาวะเริ่มต้นอยู่ในช่วง 160-180 มก./ล.) เติมสารละลายดังกล่าวลงในอ่างระเหยที่ใช้ศึกษา ทำการปรับ pH ของสารละลายแอมโมเนียให้มีค่าตามต้องการโดยใช้สารละลาย HCl 0.1 N และ NaOH 0.1 N เป็นสารละลายสำหรับการปรับ pH เริ่มต้นและควบคุม pH ในระหว่างทดลองให้มีค่าตามต้องการ ปรับอุณหภูมิของสารละลายในถังระเหยให้ได้ตามต้องการ สภาวะการทดลองของแต่ละการทดลองแสดงไว้ใน Table 1

จากนั้นจึงเริ่มการทดลองโดยบันทึกเวลาเริ่มต้นและเก็บตัวอย่างสารละลายเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียที่สภาวะเริ่มต้นจากนั้นจึงปล่อยให้แอมโมเนียระเหยจากน้ำและทำการเก็บตัวอย่างสารละลายทุก 1 ชั่วโมง เพื่อหาความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เวลาต่างๆจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง โดยในระหว่างการทดลองทำการตรวจวัดอุณหภูมิและ pH ของสารละลายทุกครั้งที่เก็บตัวอย่างและทำการปรับ pH ของสารละลายแอมโมเนียในอ่างระเหยด้วยสารละลาย HCl 0.1 N และ NaOH 0.1 N แล้วแต่กรณี ดังนั้นทั้งอุณหภูมิและ pH จึงมีค่าคงที่ตลอดเวลา โดยมีค่าความแตกต่างของอุณหภูมิและ pH ในระหว่างการทดลองไม่เกิน $\pm 1^{\circ}\text{C}$ และ ± 0.2 ตามลำดับ การวิเคราะห์ความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในน้ำ ใช้วิธี Phenate method (APHA, AWWA, and WPCF, 1995) ซึ่งจะวิเคราะห์ปริมาณของแอมโมเนียรวมในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ข้อมูลความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เปลี่ยนไปกับเวลาจะถูกนำมาใช้หาสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในวิภาคของเหลวของแอมโมเนียตามวิธีการที่ได้กล่าวถึงในตอนต้น จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิและ pH ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมในวิภาคของเหลวของแอมโมเนียโดยใช้วิธีการทำการถดถอยพหุคูณ (multiple non linear regression)

Table 1. Experimental conditions for studying the influence of pH and temperature on ammonia volatilization rate

Run No.	T _{water} (°C)	pH	Initial concentration of ammonia in water (mg L ⁻¹)
1	26±1	5	164
2	26±1	7	170
3	26±1	9	175
4	26±1	11	175
5	25±1	5.8	164
6	40±1	5.8	163
7	45±1	5.8	163
8	50±1	5.8	160
9	25±1	11	175
10	40±1	11	182
11	45±1	11	183

ผลการทดลองและวิจารณ์

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนีย K_{OLa}

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนีย, K_{OLa} , ได้จากการวัดความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในน้ำที่เวลาต่างๆแล้วทำการแปลงผลจากข้อมูลของความเข้มข้นเป็นค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมโดยใช้ทฤษฎีและสมมติฐานที่อธิบายด้วยสมการ (5) ถึงสมการ (9) ลักษณะทั่วไปของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln(C_t/C_{t0})$ กับ t ตามสมการ (8) แสดงดัง Figure 1 จากรูปดังกล่าวพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(C_t/C_{t0})$ กับ t มีความเป็นเชิงเส้นสูง ($R^2 > 0.95$) สอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวไว้ในตอนต้น ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่า K_{OLa} ภายใต้ทฤษฎีและสมมติฐานที่แสดงด้วยสมการ (5) ถึงสมการ (9) จึงมีความน่าเชื่อถือสูง ค่า K_{OLa} ที่ได้จากการทดลองที่สภาวะต่างๆแสดงใน Table 2 การอธิบายผลของแต่ละตัวแปรที่ศึกษาต่อค่า K_{OLa} กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

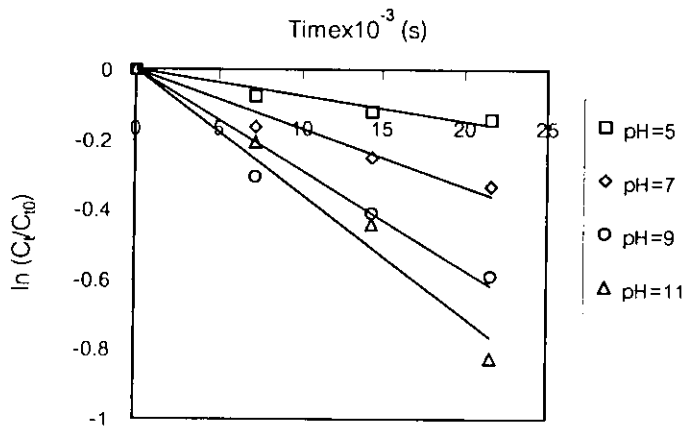


Figure 1 Typical plot of $\ln(C_t/C_{t0})$ versus t at various pH ($T = 26 \pm 1$ °C)

Table 2 K_{OLa} of ammonia at various pH and water temperature

RUN No.	T (°C)	pH	$K_{OLa} \times 10^7$ (m ³ /s)	RUN No.	T (°C)	pH	$K_{OLa} \times 10^7$ (m ³ /s)
1	26±1	5	0.49	7	45±1	5.8	2.11
2	26±1	7	1.40	8	50±1	5.8	2.81
3	26±1	9	2.11	9	25±1	11	2.81
4	26±1	11	2.81	10	40±1	11	3.51
5	25±1	5.8	0.70	11	45±1	11	4.21
6	40±1	5.8	1.40				

ผลของ pH ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนีย

ผลของ pH ต่อ $K_{O,a}$ แสดงใน Figure 2 จะเห็นได้ว่า $K_{O,a}$ มีค่ามากขึ้นตาม pH ที่สูงขึ้น ทั้งนี้เพราะ pH เป็นตัวควบคุมสมดุลของปฏิกิริยาระหว่าง NH_3 และ NH_4^+ ดังแสดงในสมการ (1) จากสมการ (1) การเพิ่ม pH จะเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ดังนั้นสมดุลของปฏิกิริยาจะเลื่อนไปทางซ้ายทำให้มี NH_3 เพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียจึงสูงขึ้นตาม pH ผลการทดลองที่แสดงใน Figure 2 ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มของ pH ในช่วง 5-8 มีผลต่อ $K_{O,a}$ มากกว่าการเพิ่มขึ้นของ pH ในช่วง 8-11 อธิบายได้ว่า ที่ pH สูงกว่า 8 แอมโมเนียส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ NH_3 เกือบทั้งหมดผลของ pH ต่อ $K_{O,a}$ จึงน้อยลงเมื่อเทียบกับการเพิ่มของ pH ในช่วงจาก 5-8 ซึ่งมีเปลี่ยนรูปของแอมโมเนียจาก NH_4^+ ไปเป็น NH_3 อย่างมีนัยสำคัญทำให้เห็นผลของ pH ต่อ $K_{O,a}$ อย่างชัดเจน การเพิ่มของ $K_{O,a}$ กับ pH ที่ได้จากการทดลองนี้ให้ผลที่สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนของแอมโมเนียอิสระ (f) กับ pH ที่ทำนายโดยสมการ (4) จากสมการ (4) เมื่อแทนค่าอุณหภูมิและ pH ลงในสมการก็จะสามารถทำนาย f ที่ pH ต่างๆได้ ดังแสดงใน Figure 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่า f แปรเปลี่ยนกับ pH อย่างมีนัยสำคัญกับเมื่อ pH น้อยกว่าหรือเท่ากับ 8 และ f เปลี่ยนแปลงกับ pH น้อยมากเมื่อ pH สูงกว่า 8 ซึ่งให้ผลสอดคล้องในการแปรเปลี่ยนของ $K_{O,a}$ กับ pH ที่ได้จากการศึกษา

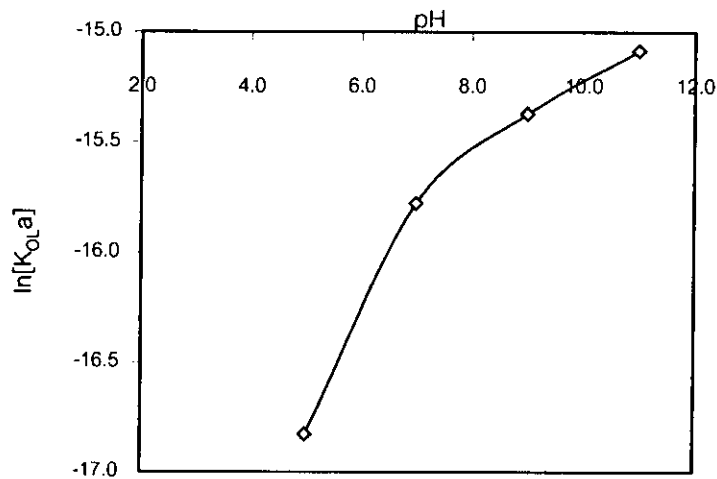


Figure 2 Effect of pH on overall mass transfer coefficient for volatilization of ammonia from water at 25 °C

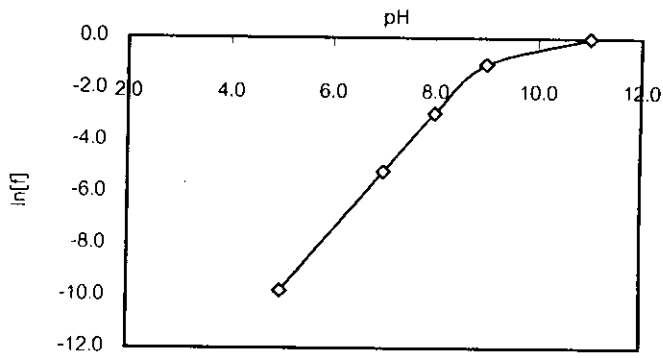


Figure 3 Effect of pH on fraction of NH_3 in water at 25°C

ผลของอุณหภูมิต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนีย

ผลของอุณหภูมิ ต่อ K_{OLa} ของแอมโมเนียแสดงใน Figure 4 จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่า K_{OLa} เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามที่คาดไว้เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลของแอมโมเนียในสารละลายสูงขึ้นตามทฤษฎีจลนพลศาสตร์ของแก๊สส่งผลให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น และถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิใดๆ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า K_{OLa} ที่ pH สูงกว่า จะมีค่าสูงกว่าที่ pH ต่ำกว่าตลอดช่วงของอุณหภูมิที่ศึกษา ทั้งนี้เพราะการเพิ่มขึ้นของ pH มีผลต่อสัดส่วนของแอมโมเนียอิสระดังที่ได้กล่าวไปแล้ว แต่เมื่อพิจารณาลักษณะการเพิ่มขึ้นของ K_{OLa} กับอุณหภูมิ พบว่าลักษณะของการเพิ่มขึ้นของ K_{OLa} กับอุณหภูมิที่ pH สูงจะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ช้ากว่าการเพิ่มขึ้นของ K_{OLa} กับอุณหภูมิที่ pH ต่ำกว่า ดังแสดงด้วยความชันของกราฟที่พล็อตระหว่าง $\ln[K_{OLa}]$ กับอุณหภูมิ ใน Figure 4

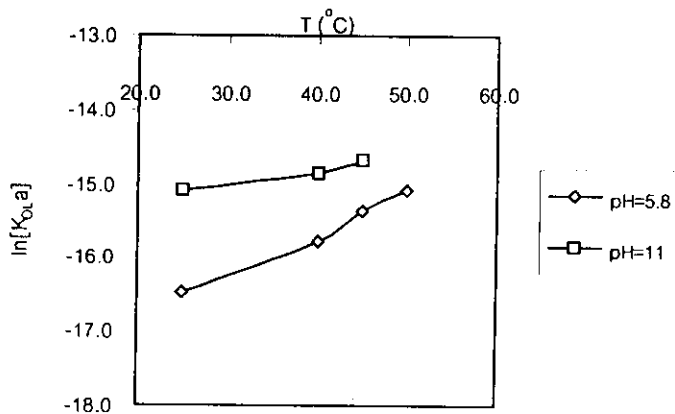


Figure 4 Effect of temperature on overall mass transfer coefficient for volatilization of ammonia from water at low and high pH

แบบจำลองสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลสำหรับการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายผลของอุณหภูมิ ผลของ pH และ ผลของอันตรปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิและ pH ต่อ $K_{OL}a$ ของ NH_3 สามารถพัฒนาจากข้อมูลการทดลองโดยการทำการถดถอยพหุคูณของข้อมูลของ $K_{OL}a$ ของ NH_3 กับอุณหภูมิและ pH เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ ของ NH_3 กับ อุณหภูมิและ pH พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง $K_{OL}a$ ของ NH_3 กับ อุณหภูมิและ pH ที่สอดคล้องกับผลการทดลองมากที่สุดแสดงดังสมการ (12) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.997

$$\ln[K_{OL}a] = b_0 + b_1 pH + b_2 pH^2 + b_3 pHT + b_4 T^2 \quad (12)$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิ ($^{\circ}C$), b_0 , b_1 , b_2 , b_3 และ b_4 คือค่าคงที่ของแบบจำลองที่ได้จากการปรับสมการ (12) กับข้อมูลการทดลอง ค่าคงที่ของแบบจำลองแสดงไว้พร้อมกันค่าอื่นๆใน Table 3 ค่า P ใน Table 3 จะเป็นค่าที่บอกถึงความสำคัญของแต่ละเทอมในแบบจำลอง จาก Table 3 ค่า P ของ b_1 , b_2 , b_3 และ b_4 มีค่าน้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่าทุกเทอมมีผลต่อค่า $\ln[K_{OL}a]$ อย่างมีนัยสำคัญ (Sumnu et al, 2000) เมื่อพิจารณาเครื่องหมายของสัมประสิทธิ์ของแต่ละเทอมพบว่าค่าของ b_1 และ b_2 มีค่าเป็นบวกแสดงว่า pH และอุณหภูมิมีผลต่อค่า $\ln[K_{OL}a]$ ในเชิงบวกคือค่า $\ln[K_{OL}a]$ จะเพิ่มขึ้นตาม pH และอุณหภูมิที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตามลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า $\ln[K_{OL}a]$ กับ pH จะถูกหน่วงด้วยค่าที่เป็นลบของสัมประสิทธิ์ b_2 ทำให้ลักษณะการเพิ่มขึ้นของ $\ln[K_{OL}a]$ กับ pH ที่ pH สูงๆช้ากว่าที่ pH ต่ำๆ กราฟพื้นผิวระหว่าง $\ln[K_{OL}a]$ กับ pH จึงมีลักษณะโค้งที่มีความชันลดลงดังแสดงใน Figure 5 ในขณะที่กราฟพื้นผิวระหว่าง $\ln[K_{OL}a]$ กับอุณหภูมิแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของ $\ln[K_{OL}a]$ กับอุณหภูมิโดยไม่มีกรณีโค้งลงแต่อย่างใด ส่วนผลของอันตรปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับ pH พิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์ b_3 ซึ่งมีค่าเป็นลบดังนั้นภายใต้สภาวะที่มีอันตรปฏิกิริยาระหว่างอุณหภูมิกับ pH สูงคือสภาวะที่ทั้งอุณหภูมิและ pH มีค่าสูงจะมีการหน่วงการเพิ่มขึ้นของ $\ln[K_{OL}a]$ มากกว่าที่สภาวะที่มีอุณหภูมิและ pH ต่ำ ดังนั้นที่อุณหภูมิและ pH สูง $\ln[K_{OL}a]$ จะเพิ่มขึ้นในลักษณะที่ช้ากว่าที่อุณหภูมิและ pH ต่ำ กราฟพื้นผิวที่อุณหภูมิและ pH สูงจึงมีลักษณะโค้งดังแสดงใน Figure 5

Table 3 Constant b_0 , b_1 , b_2 , b_3 and b_4 of equation (12) and other statistic values

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
Value	-21.62	1.178	-4.69×10^{-2}	-5.41×10^{-3}	1.15×10^{-3}
P value	5.490×10^{-9}	5.387×10^{-5}	6.01×10^{-4}	4.03×10^{-4}	9.535×10^{-6}
Std Error	4.50×10^{-1}	1.16×10^{-1}	7.15×10^{-3}	7.66×10^{-4}	8.44×10^{-5}
-95%	-22.72	8.94×10^{-1}	-6.44×10^{-2}	-7.28×10^{-3}	9.47×10^{-4}
+95%	-20.51	1.463	-2.941×10^{-2}	-3.54×10^{-3}	1.36×10^{-3}

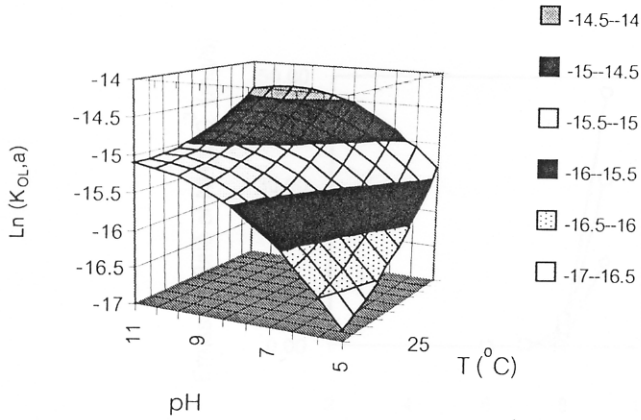


Figure 5 Response surface showing the effects of pH and temperature on K_{OLa}

แบบจำลองสำหรับอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำ

อัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่อุณหภูมิและ pH ใดๆสามารถหาค่าได้จากการแทนค่า K_{OLa} จากสมการ (12) ลงในสมการ (10) และสมการ (11) ตามลำดับจะได้อัตราและฟลักซ์การระเหยตามสมการ (13) และ (14) ตามลำดับ

$$R_{NH_3} = \frac{\exp(-21.62 + 1.178pH - 4.691 \times 10^{-2} pH^2 - 5.41 \times 10^{-3} pHT + 1.115 \times 10^{-3} T^2) C_i}{1 + 10^{(0.09018 + \frac{2729.92}{T+273}) - pH}} C_i \quad (13)$$

$$N_{NH_3} = \frac{\exp(-21.62 + 1.178pH - 4.691 \times 10^{-2} pH^2 - 5.41 \times 10^{-3} pHT + 1.115 \times 10^{-3} T^2) C_i}{A(1 + 10^{(0.09018 + \frac{2729.92}{T+273}) - pH})} C_i \quad (14)$$

สมการ (13) และ (14) สามารถใช้ทำนายอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำได้ โดยข้อมูลที่ ต้องทราบประกอบด้วย ความเข้มข้นรวมของแอมโมเนีย (ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน, C_i) pH อุณหภูมิของน้ำ (T) และพื้นที่ของการระเหย (A) เนื่องจากหน่วยของ K_{OLa} ที่ใช้ในการศึกษานี้คือ $m^3 s^{-1}$ ดังนั้นถ้าใช้ความเข้มข้นรวมของ แอมโมเนียในหน่วย $mol m^{-3}$ และพื้นที่ของการระเหยเป็น m^2 จะได้หน่วยของอัตราและฟลักซ์การระเหยเป็น $mol s^{-1}$ และ $mol s^{-1} m^{-2}$ ตามลำดับ ซึ่งสามารถแปลงเป็นหน่วยของอัตราและฟลักซ์ที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ $mg s^{-1}$ และ $mg s^{-1} m^{-2}$ ตาม ลำดับได้ ผลการจำลองโดยใช้สมการ (13) คำนวณอัตราการระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่ อุณหภูมิในช่วง 25-40 °C โดย ใช้ข้อมูลความเข้มข้นของแอมโมเนียในช่วง 200-600 $mg L^{-1}$ ซึ่งเป็นความเข้มข้นของแอมโมเนียที่พบในน้ำเสียของโรงงาน น้ำยางข้นในประเทศมาเลเซีย (Maheswaran and John, 1991) และแปรเปลี่ยนค่า pH ในช่วง 6-9 ซึ่งเป็นช่วง pH ของน้ำ เสียของโรงงานน้ำยางข้นได้ผลดัง Figure 6 และ Figure 7

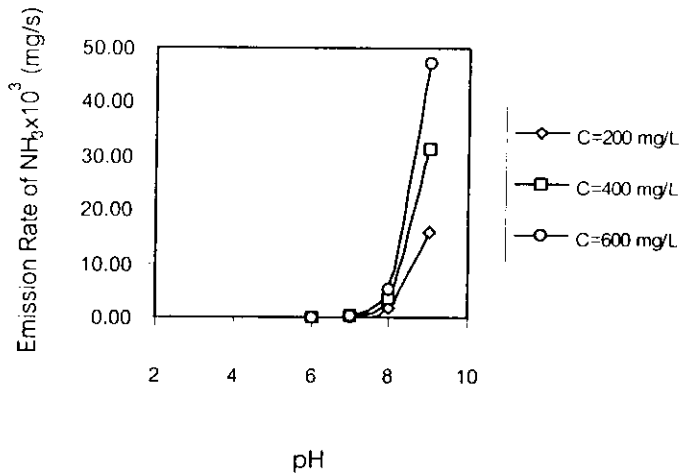


Figure 6 Effect of pH on volatilization rate of ammonia from water at 25 °C

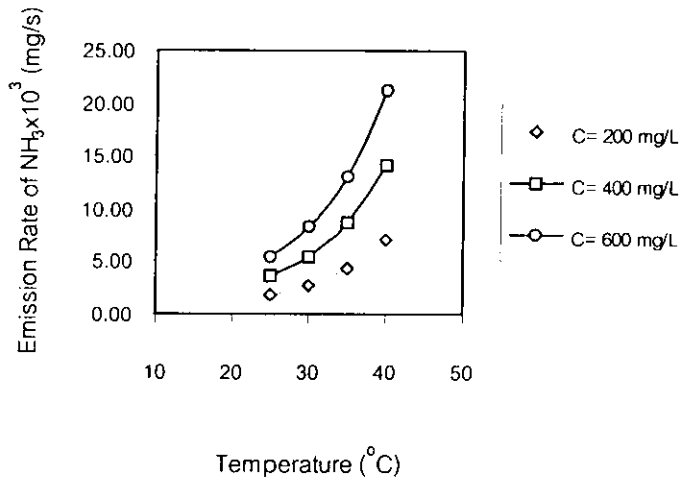


Figure 7 Effect of water temperature on volatilization rate of ammonia from water at pH 8

จากรูปดังกล่าวจะเห็นได้ว่าอัตราการระเหยจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิและ pH สูงขึ้น อันเป็นผลมาจากผลของอุณหภูมิ pH และอันตรปฏิกิริยาของอุณหภูมิและ pH ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลดังที่ได้กล่าวไปแล้ว ส่วนผลของอุณหภูมิ pH และอันตรปฏิกิริยาของอุณหภูมิและ pH ต่อฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำจะเป็นไปในทำนองเดียวกันกับผลของอุณหภูมิ pH และอันตรปฏิกิริยาของอุณหภูมิและ pH ต่ออัตราการระเหยเพราะฟลักซ์คืออัตราที่หารด้วยพื้นที่ซึ่งเป็นค่าคงที่ แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับทำนายอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียจากน้ำที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้สามารถทำนายอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียที่แปรเปลี่ยนกับ pH อุณหภูมิและความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในน้ำได้ เนื่องจากในปัจจุบันยังไม่มีกรตรวจวัดการระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำเสียของโรงงานน้ำยางชันโดยตรง วิธีการที่น่าเสนอในบทความนี้เป็นจึงแนวทางหนึ่งที่จะสามารถให้ประมาณค่าการระเหยของแอมโมเนียจากแหล่งน้ำเสียของโรงงานน้ำยางชันหรือแหล่งน้ำอื่นๆได้

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิและ pH ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของแอมโมเนียจากน้ำ และจากแบบจำลองที่ได้จากการทำการทดลองพหุคูณของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนียเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและ pH ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่อันตรปฏิบัติกรระหว่างอุณหภูมิและ pH จะหน่วงการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมของแอมโมเนีย ดังนั้นลักษณะการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมภายใต้สภาวะที่มีทั้งอุณหภูมิและ pH สูงจะช้ากว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมภายใต้สภาวะที่มีอุณหภูมิและ pH ต่ำกว่า แบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการทำนายอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียถูกพัฒนาขึ้นจากทฤษฎีการถ่ายโอนมวลและแบบจำลองของสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมที่ได้จากการศึกษานี้ แบบจำลองอย่างง่ายดังกล่าวสามารถใช้ทำนายอัตราและฟลักซ์การระเหยของแอมโมเนียภายใต้สภาวะที่มีการแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิของน้ำ pH และความเข้มข้นรวมของแอมโมเนียในน้ำได้