บทที่ 3

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

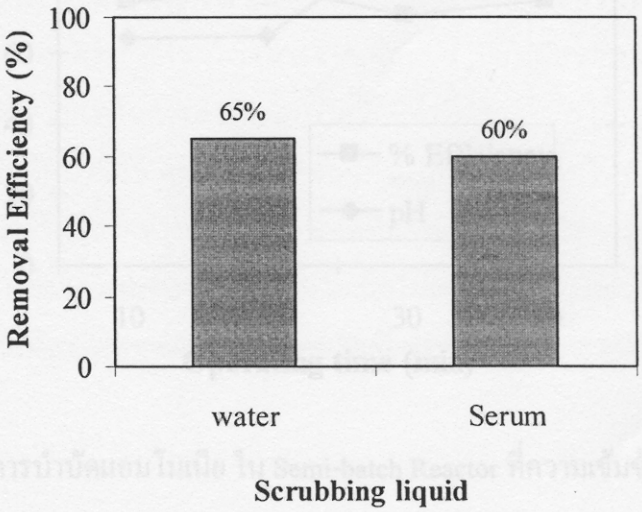
ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยใช้น้ำและน้ำซีรัมเป็นสารดูดซึมในระบบปฏิกรณ์หอดูดซึม แบ่งได้เป็น 3 ส่วนตามชนิดของปฏิกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ ซึ่งมีรายละเอียดของผลการทดลองดังต่อไปนี้

3.1 ผลการกำจัดแอมโมเนียจากอากาศเสียโดยระบบ Semi-batch Reactor

จากการทดลองการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยชุดทดลองปฏิกรณ์หอดูดซึมแบบ Semi-batch Reactor ซึ่งมีการออกแบบและติดตั้งในห้องปฏิบัติการทดลองที่มีขนาดเป็นชุดทดลองต้นแบบ (pilot scale) โดยใช้น้ำและน้ำซีรัมเป็นสารดูดซึม ได้ทำการทดลองศึกษาเปรียบเทียบผลของชนิดสารดูดซึมที่ใช้ อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศเสีย และอิทธิพลของความเร็วรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของระบบ รวมถึงได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และกราฟพื้นผิวสำหรับการกำจัดแอมโมเนีย ในอากาศเสีย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1 ผลการเปรียบเทียบการใช้น้ำและน้ำซีรัมในการกำจัดแอมโมเนียจากอากาศเสีย

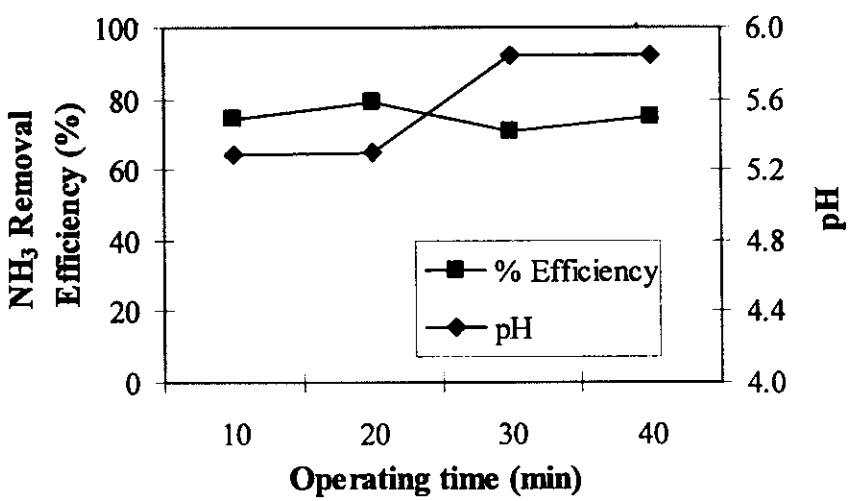
ผลการทดลองการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียในระบบ Semi-batch Reactor โดยใช้น้ำซีรัมเป็นสารดูดซึมเปรียบเทียบกับการใช้น้ำ แสดงได้ตามกราฟในรูปที่ 3-1



รูปที่ 3-1 ผลของการใช้น้ำและน้ำซีรัมในการกำจัดแอมโมเนียในระบบ Semi-batch Reactor ในช่วง 10 นาทีแรก ที่ C_{NH_3} = 1,000 ppm, Air flow rate = 30 l/min และ Agitator speed = 330 rpm

การดำเนินการบำบัดอากาศเสียโดยการป้อนอากาศเสียอย่างต่อเนื่องผ่านสารดูดซึมที่บรรจุในถังกวน ในระบบ Semi-batch Reactor โดยสารดูดซึมที่ใช้ คือ น้ำและน้ำซีรัม พบว่าการใช้น้ำเป็นสารดูดซึมจะให้ค่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียที่สูงกว่าการใช้น้ำซีรัมเป็นสารดูดซึมเล็กน้อยในตอนเริ่มต้น 10 นาทีแรกของการดำเนินการดังแสดงในกราฟรูปที่ 3-1 การดูดซึมแอมโมเนียจากอากาศเสียโดยใช้น้ำจะทำให้ pH ของน้ำในระบบมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงแรกของการดำเนินการ คือ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก pH 7 จนมีค่าเป็น pH 9-10 และประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยการใช้น้ำจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าต่ำกว่า 20% ภายในเวลา 20 นาที ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากแอมโมเนียมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี เมื่ออากาศเสียผ่านกระบวนการดูดซึมจะทำให้แอมโมเนียถ่ายโอนมวลจากอากาศเสียและละลายในน้ำ ทำให้ pH ของน้ำเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเมื่อมีความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำค่าหนึ่ง จะทำให้แอมโมเนียจากอากาศเสียไม่สามารถถูกดูดซึมและละลายในน้ำต่อไปได้อีก นั่นคือ การดูดซึมจะเข้าสู่สมดุล (equilibrium) ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียลดลงอย่างรวดเร็ว

การใช้น้ำซีรัมในการบำบัดอากาศเสีย โดยการเติมน้ำซีรัมในถังกวนและทำการป้อนอากาศเสียเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง ระบบจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงเวลาของการดำเนินการ 40 นาที และมีค่า pH ของน้ำซีรัมในขณะดำเนินการที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยกับเวลา คือ มีค่าเพิ่มขึ้นจาก pH 5.2 เป็น pH 5.8 ซึ่งจากผลการทดลองสามารถนำมาแสดงในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 ประสิทธิภาพการบำบัดแอมโมเนีย ใน Semi-batch Reactor ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนีย 1,000 ppm, Agitator speed = 132 rpm และ Air feed flow rate = 30 l/min

สารดูดซึมชนิดน้ำซีรัมสำหรับการดูดซึมแอมโมเนียในอากาศเสีย จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ค่อนข้างคงที่และสามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องในช่วงระยะเวลาหนึ่ง โดยการดูดซึมแอมโมเนียในสารดูดซึมจะไม่เข้าสู่สมดุลของการถ่ายโอนมวลจากเฟสแก๊สไปยังเฟสของเหลว เนื่องจากแอมโมเนียที่ถูกดูดซึมในน้ำซีรัมจะเกิดปฏิกิริยาสะเทินกับกรดซัลฟูริกที่อยู่ในน้ำซีรัม ทำให้แอมโมเนียในของเหลวที่ถูกดูดซึมมามีความเข้มข้นที่ไม่เพิ่มขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาการสะเทินที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังสมการ (3.1) และ (3.2)

$$NH_3 + H_2SO_4 \rightarrow NH_4HSO_4 \qquad (3\text{-}1)$$

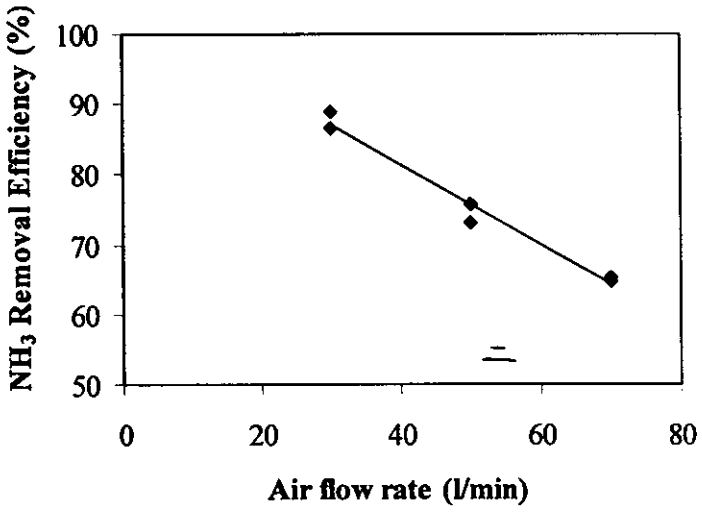
$$NH_3 + NH_4HSO_4 \rightarrow (NH_4)_2SO_4 \qquad (3\text{-}2)$$

จากปฏิกิริยาจะเห็นได้ว่าแอมโมเนียที่ถูกดูดซึมไว้ในสารดูดซึมน้ำซีรัมได้ถูกทำปฏิกิริยากลายเป็น NH_4HSO_4 และ $(NH_4)_2SO_4$ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้จะทำให้น้ำซีรัมมีค่าความเป็นกรดลดลง โดยผลผลิตของปฏิกิริยาที่ได้เป็นสารที่ไม่มีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และสาร $(NH_4)_2SO_4$ ที่เกิดขึ้นจะสามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการปลูกพืชได้ดี เมื่อน้ำซีรัมถูกใช้ในการบำบัดต่อไปจนความเป็นกรดของน้ำซีรัมน้อยลงหรือมีค่า pH ที่สูงกว่า pH 7 ประสิทธิภาพการบำบัดก็จะลดต่ำลง โดยจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าการใช้น้ำเป็นสารดูดซึมเนื่องจากความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำซีรัมที่เพิ่มขึ้นและลักษณะทางกายภาพของน้ำซีรัมที่ต่างจากน้ำ

น้ำซีรัมเป็นส่วนของเหลวในน้ำยางสดที่มีส่วนผสมจากสารธรรมชาติของน้ำยางหลายชนิด น้ำซีรัมมีความหนืดสูงจากสารธรรมชาติที่ผสมอยู่ ความหนืดของน้ำซีรัมเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซึมแอมโมเนียในอากาศเสียต่ำกว่าการใช้น้ำในช่วงแรกของการดำเนินการ ความหนืดของสารดูดซึมที่บรรจุในถังปฏิกรณ์ Semi batch reactor จะทำให้การกระจายตัวของแก๊สในสารดูดซึมเกิดขึ้นได้ไม่ดีและการถ่ายโอนมวลสารจากเฟสแก๊สไปยังเฟสของเหลวเกิดขึ้นได้ไม่ดีเช่นกัน จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมีค่าที่ต่ำกว่าการใช้น้ำ แต่เนื่องจากเมื่อแอมโมเนียถูกดูดซึมเข้าไปในน้ำซีรัม แอมโมเนียจะถูกทำปฏิกิริยาสะเทินในน้ำซีรัมทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำซีรัมถูกรักษาระดับที่ความเข้มข้นต่ำตลอดเวลาของการดำเนินการ ส่งผลให้แรงขับจากความแตกต่างของความเข้มข้นของแอมโมเนียในเฟสแก๊สและในเฟสของเหลวยังมีค่าสูงและคงที่ตลอด ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียมีค่าคงที่

3.1.2 อิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย

เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศเสียที่ป้อนเข้าระบบการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสีย จะส่งผลต่อระบบการดูดซึมโดยตรงทั้งในแง่ระยะเวลาที่อากาศเสียจะอยู่ในระบบ (retention time) และปริมาณแอมโมเนียที่ถูกป้อนเข้ามาในระบบ การศึกษานี้จึงได้ทำการปรับอัตราการป้อนอากาศเสียเข้าสู่ระบบปฏิกรณ์ Semi batch reactor โดยควบคุมความเข้มข้นของแอมโมเนียในอากาศเสียให้คงที่ เพื่อศึกษาถึงผลของอัตราการป้อนอากาศเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 ผลของอัตราการป้อนอากาศเสียต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในถังกวนแบบ Semi-batch Reactor ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียประมาณ 1,000 ppm และ Agitator speed = 132 rpm

กราฟในรูปที่ 3-3 เป็นการพล็อตระหว่างอัตราการไหลของอากาศเสียกับประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียจากอากาศเสีย พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอากาศเสียจาก 30 ลิตร/นาที ไปเป็น 70 ลิตร/นาที มีผลทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียลดลงถึง 24% โดยประสิทธิภาพลดลงจาก 89% ไปเป็น 65% ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอัตราการป้อนของอากาศเสียเป็นตัวบ่งบอกถึงระยะเวลาที่อากาศเสียจะอยู่ในระบบปฏิกรณ์ ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (3-3)

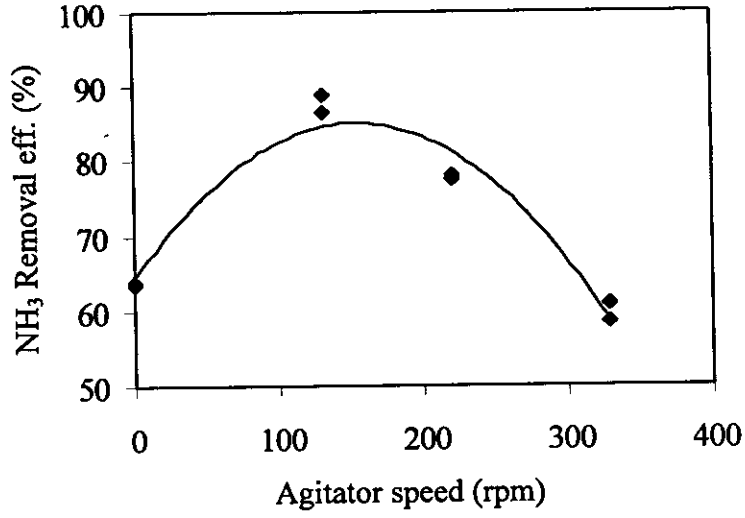
$$R_t = \frac{V}{Q} \qquad (3\text{-}3)$$

เมื่อ R_t เป็น Retention time (min), V เป็นปริมาตรของระบบ (l) และ Q เป็นอัตราการไหลของอากาศเสีย (l/min)

ที่อัตราการไหลของอากาศมีค่าสูง 70 ลิตร/นาที หรือมี Retention time ของอากาศเสียในระบบปฏิกรณ์เป็น R_t = 0.71 นาที หมายถึง อากาศมีเวลาอยู่ในระบบถังกวน 0.71 นาที ซึ่งอยู่ในถังกวนได้ในช่วงเวลาอันสั้นกว่าการป้อนอากาศที่อัตราการไหลของอากาศเป็น 30 ลิตร/นาที ที่มีค่า R_t = 1.67 min ทำให้อากาศมีเวลาสัมผัสกับน้ำซีรัมได้น้อยกว่า ส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียจากอากาศเสียลดลง ซึ่งจากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 3-3 จะได้ว่าหากต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียสูงกว่า 80% จะต้องป้อนอากาศเสียเข้าระบบด้วยอัตราการไหลที่ต่ำกว่า 40 ลิตร/นาที นั่นคือ ค่า Retention time ของอากาศเสียที่สัมผัสกับน้ำซีรัมจะต้องสูงกว่า 1.25 min

3.1.3 ผลการศึกษาอิทธิพลของความเร็วรอบในการกวนต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย

การทดลองการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์หอดูดซึมแบบ Semi-batch Reactor โดยการปรับค่าความเร็วรอบของใบกวน เพื่อเปรียบเทียบผลของการกวนผสมที่ทำให้เกิดการกระจายตัวของฟองแก๊สและความปั่นป่วนของทั้งเฟสแก๊สและเฟสของเหลวดูดซึมภายในถังปฏิกรณ์ ที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียของระบบ ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังกราฟในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 ผลของความเร็วรอบของใบกวนต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วย Semi-batch Reactor ที่ความเข้มข้นของแอมโมเนียประมาณ 1000 ppm, Air flow rate = 30 l/min

จากกราฟในรูปที่ 3-4 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของใบกวนกับประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสีย ซึ่งพบว่าเมื่อปล่อยให้อากาศไหลผ่านของเหลวในถังปฏิกรณ์โดยไม่มีการกวนผสมหรือที่ความเร็วรอบของใบกวนเป็น 0 rpm ระบบจะมีประสิทธิภาพใน

การกำจัดแอมโมเนียต่ำ คือ มีประสิทธิภาพประมาณ 67% ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่อไม่มีการกวนผสม จะทำให้การกระจายตัวของอากาศเสียในของเหลวเกิดขึ้นได้ไม่ดี คือ มีการกระจายตัวของอากาศจากท่อกระจายของเหลวขึ้นสู่ผิวหน้าของเหลวในแนวตั้งเท่านั้น ไม่มีการเคลื่อนที่ของฟองอากาศไปทั่วถังปฏิกรณ์ในทิศทางอื่นและไม่มีการแตกของฟองอากาศเสียจากฟองขนาดใหญ่ให้เป็นฟองที่มีขนาดเล็กลง ทำให้การสัมผัสระหว่างฟองอากาศเสียกับน้ำซีรัมเกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้การดูดซึมแอมโมเนียโดยน้ำซีรัมเกิดขึ้นได้ไม่ดีและได้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่ต่ำ และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการกวนเป็น 132 rpm พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียของระบบสูงขึ้นเป็น 89% เนื่องจากการกวนผสมด้วยใบกวนที่ความเร็วรอบดังกล่าว ทำให้เกิดการผสมและเกิดการเคลื่อนที่ของฟองแก๊สไปในทิศทางต่างๆ ของถังปฏิกรณ์ ทำให้ฟองแก๊สอยู่ในของเหลวด้วยระยะทางที่ยาวขึ้นและใช้เวลาที่นานขึ้น และอาจทำให้เกิดการแตกของฟองแก๊สให้มีขนาดเล็กลงจนทำให้การสัมผัสและการถ่ายโอนมวลสารเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของการกวนของระบบให้สูงกว่า 132 rpm พบว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียของระบบจะลดต่ำลง เนื่องจากการกวนด้วยความเร็วรอบที่สูงเกินไปจะทำให้ความปั่นป่วนในเฟสของเหลวเกิดขึ้นมาก จนทำให้ฟองอากาศอยู่ในของเหลวด้วยระยะเวลาที่สั้น โดยแก๊สจะถูกผลักดันให้หลุดออกจากของเหลวออกมาอยู่ในเฟสแก๊สด้านบนผิวหน้าได้อย่างรวดเร็ว นั่นคือทำให้ระยะเวลาและระยะทางในการสัมผัสระหว่างฟองอากาศเสียและน้ำซีรัมลดน้อยลง ทำให้การถ่ายโอนมวลสารระหว่างเฟสแก๊สและของเหลวเกิดขึ้นได้ไม่ดี ดังนั้นการดำเนินการด้วยระบบปฏิกรณ์แบบ Semi-batch Reactor จะต้องควบคุมความเร็วรอบของการกวนที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการกำจัดแอมโมเนีย ในอากาศเสียอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจากการทดลองนี้พบว่าหากต้องการให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียมีค่าสูงกว่า 80% ควรมีการดำเนินการที่ความเร็วรอบของใบกวนในช่วง 100-200 rpm

3.1.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) และกราฟพื้นผิว (Surface Plots) สำหรับการกำจัดแอมโมเนีย ในอากาศเสีย

จากผลการทดลองที่สภาวะการดำเนินการต่างๆ สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของการดำเนินการและเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรการทดลองในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ทำได้โดยการใช้โปรแกรม Microsoft Excel Statistical Package ในการหาแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการทดลองที่ศึกษาซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ (process variable) กับประสิทธิภาพของระบบ (% Eff) ซึ่งเป็นตัวแปรตาม (response) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาการกำจัดแอมโมเนียจากอากาศเสียด้วยน้ำซีรัมใน

ระบบ Semi-batch Reactor สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3-4 ซึ่งการสร้างสมการนี้มีค่า R^2 = 0.974 และเทอมที่มีผล (significant) ต่อค่าตัวแปรตาม %Eff ในสมการมากที่สุด คือ เทอมที่ 4 ซึ่งเป็นเทอมของความเร็วรอบของใบกวน โดยเทอมนี้มีค่า P value ที่ต่ำสุด

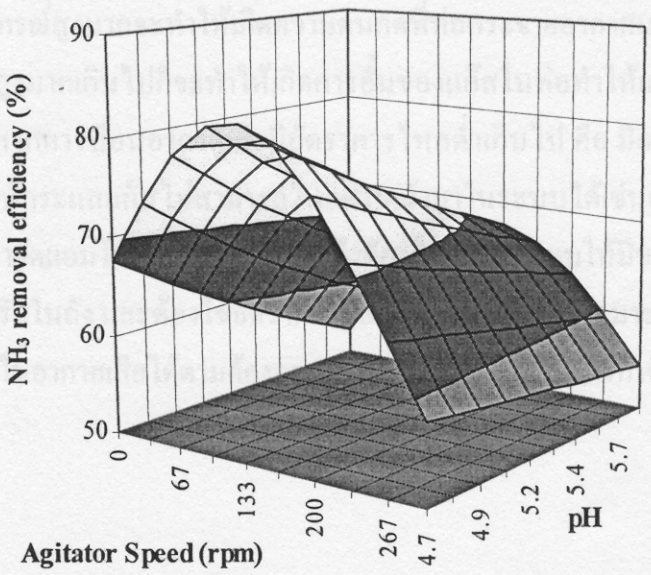
$$\%Eff = -0.00176 + 0.00281x(1) + 4.0421x10^{-7}\,x(2)x(3) + 1.7064x10^{-7}\,x(3)^2 - 9.2512x10^{-6}\,x(3)x(1) - 1.517x10^{-5}\,x(3) + 9.798x10^{-4}\,x(2) \quad (3\text{-}4)$$

เมื่อ x(1) = ค่า pH ของน้ำซีรัม

x(2) = อัตราการไหลของอากาศเสีย (l/min)

และ x(3) = ความเร็วรอบของใบกวน (rpm)

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ในสมการที่ (3-4) สามารถนำมาพล๊อตเป็นกราฟพื้นผิว (surface plot) ดังแสดงในรูปที่ 3-5 โดยกราฟพื้นผิวที่ได้จะเป็นกราฟ 3 มิติ (3 dimension) ที่แสดงผลของตัวแปรดำเนินการและความสัมพันธ์ของตัวแปร (interaction parameter) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสีย โดยแนวโน้มของค่า % Eff ที่ได้จากแบบจำลองและกราฟพื้นผิวนี้ให้ผลที่สอดคล้องกับกราฟของผลการทดลองตามที่แสดงในรูปที่ 3-3 และ 3-4 นั่นคือ เมื่อค่า pH ต่ำลงจะให้ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียสูงขึ้น และค่าความเร็วรอบของใบกวนที่ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียสูง คือ ในช่วง 100-200 rpm



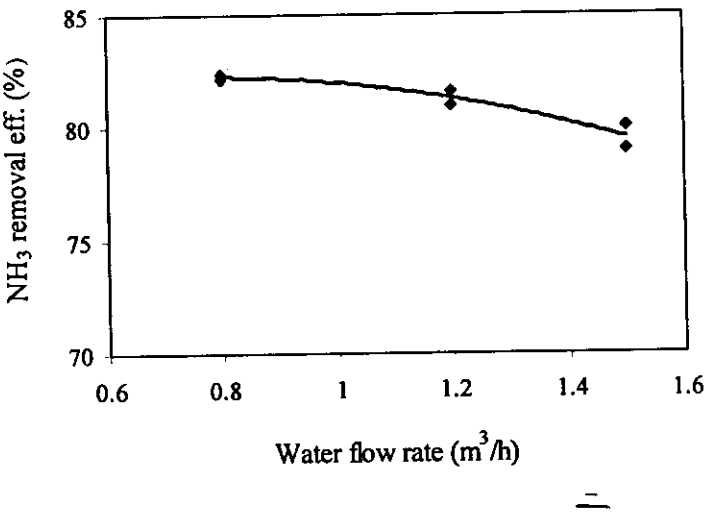
รูปที่ 3-5 กราฟพื้นผิวแสดงผลของการใช้น้ำซีรัมเป็นสารดูดซึมต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียใน Semi-batch Reactor ที่มีการป้อนอากาศเสียเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง

กราฟพื้นผิวที่ได้จากการพล็อตในรูปที่ 3-5 แสดงถึงผลของ pH ของน้ำซีรัมต่อประสิทธิภาพของการกำจัดแอมโมเนีย ซึ่งผลของค่า pH ไม่สามารถนำมาพล็อตในกราฟ 2 มิติได้ เนื่องจากไม่สามารถควบคุมและปรับค่า pH ของน้ำซีรัมให้เป็นค่าคงที่ตามต้องการได้ ซึ่งน้ำซีรัมที่ใช้ในระบบเป็นตัวอย่างที่เก็บมาจากกระบวนการผลิตยางสกิมที่มีค่า pH ที่แตกต่างกันและในขณะดำเนินการค่า pH ของน้ำซีรัมจะเปลี่ยนไปตามสภาวะการดำเนินการของระบบ โดยผู้วิจัยไม่ได้มีการปรับค่า pH ซึ่งจากกราฟแสดงได้ว่า ที่ pH ของน้ำซีรัมมีค่าสูงจะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียลดต่ำลง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากเมื่อ pH สูงขึ้น จะแสดงถึงปริมาณกรดซัลฟูริกในน้ำซีรัมที่น้อยลง จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาสะเทินกับแอมโมเนียที่ถูกดูดซึมอยู่ในน้ำซีรัมได้น้อยลง ส่งผลให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำซีรัมมีค่าสูง ทำให้มีแรงขับของการถ่ายโอนมวลของแอมโมเนียจากอากาศเสียมายังสารดูดซึมที่น้อย ดังนั้นค่า pH ของน้ำซีรัมที่ทำให้เกิดการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ ที่ค่า pH < 5 และที่ความเร็วรอบของการกวนในถังปฏิกรณ์ Semi-batch Reactor เป็น 100-200 rpm ซึ่งจะทำให้ได้ประสิทธิภาพของการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยน้ำซีรัมที่สูงกว่า 80%

ในการใช้ปฏิกรณ์แบบ Semi-batch Reactor สำหรับการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสีย มีข้อควรระวังในการดำเนินการ คือ การเกิดความดันลด (pressure drop) ของการป้อนกระแสอากาศเสียที่ไหลผ่านถังปฏิกรณ์ การดำเนินการนี้จะเป็นการปล่อยกระแสแก๊สจากระบบท่อป้อนอากาศเสียเข้าท่อกระจายอากาศเพื่อให้อากาศเสียไหลผ่านเข้าผสมกับน้ำซีรัมในถังปฏิกรณ์โดยตรง หากระดับความสูงของของเหลวในถังปฏิกรณ์สูงมากจะทำให้เกิดความดันกดที่ท่อกระจายอากาศมาก หากระดับความสูงของของเหลวในถังสูงมากเกินไปก็จะทำให้เกิดการอั้นของแก๊สในท่อทำให้แก๊สไม่สามารถไหลเข้าไปถังกวนได้ หรือหากการป้อนอากาศเสียมีอัตราการไหลต่ำเกินไป คือ มีความดันของกระแสแก๊สป้อนที่ต่ำ ก็จะทำให้กระแสแก๊สไม่สามารถไหลผ่านเข้ามาในระบบได้เช่นกัน ดังนั้นในการใช้ปฏิกรณ์ชนิดนี้ในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสีย จึงต้องมีการออกแบบให้มีขนาดของถังปฏิกรณ์ระดับความสูงของน้ำซีรัมในถัง และต้องใช้อัตราการป้อนของอากาศเสียที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถทำการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียได้ตามต้องการและมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง

3.2 ผลการกำจัดแอมโมเนียจากอากาศเสียโดยระบบหอดูดซึมแบบ Perforate Plate

จากการทดลองการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยชุดทดลองปฏิกรณ์หอดูดซึมแบบ Perforate Plate ซึ่งมีการออกแบบและติดตั้งในห้องปฏิบัติการทดลองที่มีขนาดเป็นชุดทดลองต้นแบบ โดยใช้น้ำเป็นสารดูดซึมแก๊สแอมโมเนียในอากาศเสีย สามารถแสดงผลของประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียที่อัตราการไหลของน้ำต่างๆ ในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยใช้น้ำในปฏิกรณ์แบบ Perforate Plate ในช่วงเริ่มต้นดำเนินการที่ C_{NH_3} = 1,000 ppm และ Air flow rate = 50 l/min

เมื่อใช้น้ำในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์แบบ Perforate Plate พบว่า ในช่วงแรกของการดำเนินการระบบให้ประสิทธิภาพในการกำจัดอากาศเสียประมาณที่ 82% โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงเล็กน้อย เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำอาจจะส่งผลให้ได้หยดน้ำไหลผ่านแผ่นเพลทเจาะรูมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ทำให้การสัมผัสกันระหว่างของเหลวและอากาศเสียเกิดได้น้อยลง จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าระบบปฏิกรณ์แบบ Perforate Plate สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียที่สูงกว่าง 80% โดยใช้น้ำเป็นสารดูดซึม

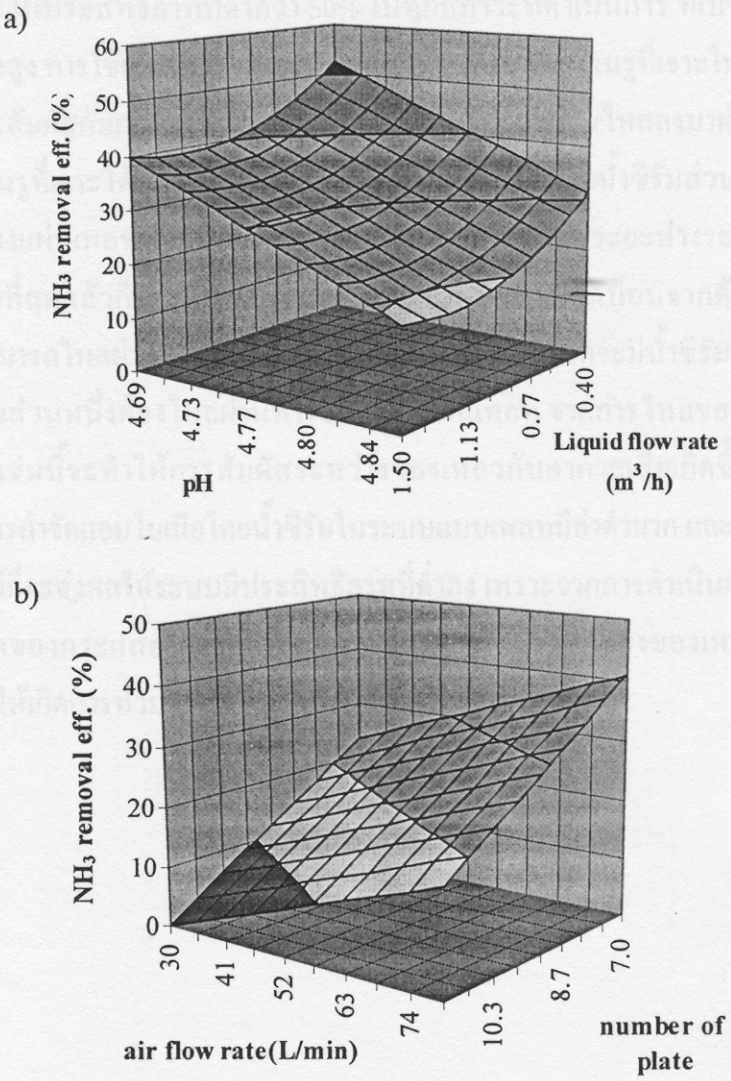
จากการทดลองใช้น้ำซีรัมเป็นสารดูดซึมในปฏิกรณ์แบบ Perforate Plate ที่สภาวะการดำเนินการต่างๆ สามารถนำข้อมูลผลการทดลองมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของการดำเนินการและเพื่อแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรการทดลองในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ทำได้โดยการใช้โปรแกรม Microsoft Excel Statistical Package ในการหาแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ได้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรการทดลองที่ศึกษาซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ (process variable) กับ

ประสิทธิภาพของระบบ (% Eff) ซึ่งเป็นตัวแปรตาม (response) ซึ่งตัวแปรอิสระที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบในการทดลองนี้ประกอบด้วย อัตราการไหลของอากาศ อัตราการไหลของของเหลวดูดซึม จำนวนเพลท และค่า pH ของน้ำซีรัม แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการศึกษาการกำจัดแอมโมเนียจากอากาศเสียด้วยน้ำซีรัมในระบบ Perforate plate สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3-5 จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ สามารถนำมาพล็อตเป็นกราฟพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 3-7

$$\%\,\text{eff} = -2539.3 + 58.19x_1 - 12.10x_1x_4 + 538.77x_4 - 6.184x_2x_3 + 17.86x_2^2 \qquad (3\text{-}5)$$

เมื่อ x_1 = อัตราการไหลของอากาศ (l/min) x_2 = อัตราการไหลของของเหลวดูดซึม (m^3/h)

x_3 = จำนวนเพลท และ x_4 = ค่า pH ของน้ำซีรัม



รูปที่ 3-7 กราฟพื้นผิวแสดงผลของการใช้น้ำซีรัมในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียในปฏิกรณ์หอดูดซึมแบบ Perforate Plate

จากการสร้างสมการพบว่ามีค่า $R^2 = 0.826$ และ R^2 adjusted = 0.791 จะเห็นว่า R^2 adjusted มีค่าต่ำกว่า R^2 เล็กน้อย เป็นการแสดงว่าสมการมีความน่าเชื่อถือได้ และเทอมที่มีผล (significant) ต่อค่าตัวแปรตาม %Eff ในสมการมากที่สุด คือ เทอมที่ 4 ซึ่งเป็นเทอมที่เป็น interaction ของจำนวนเพลทและอัตราการไหลของของเหลวดูดซึม โดยเทอมนี้มีค่า P value ที่ต่ำสุด โดยกราฟพื้นผิวที่ได้จะเป็นกราฟ 3 มิติ (3 dimension) ที่แสดงผลของตัวแปรดำเนินการและความสัมพันธ์ของตัวแปร (interaction parameter) ต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสีย

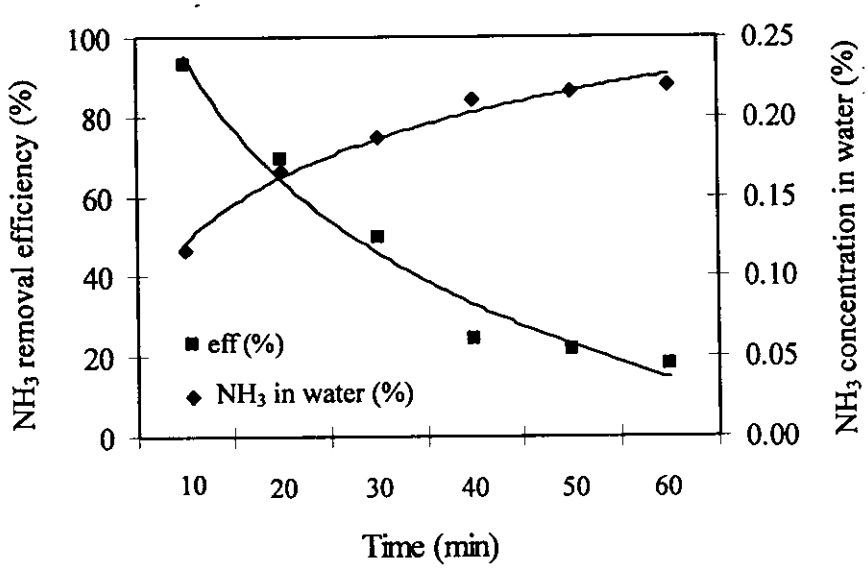
จากกราฟพื้นผิวที่ได้จากการพล็อตในรูปที่ 3-7 แสดงถึงผลของ pH ของน้ำซีรัม อัตราการไหลของของเหลว อัตราการไหลของอากาศเสีย และจำนวนเพลทต่อประสิทธิภาพของการกำจัดแอมโมเนีย ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของระบบ Perforate Plate ในการกำจัดแอมโมเนียค่อนข้างต่ำ โดยระบบจะให้ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า 50% ในทุกสภาวะที่ดำเนินการ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากน้ำซีรัมมีความหนืดสูง การใช้แผ่นเพลทแบบเจาะรูเพื่อให้น้ำซีรัมไหลผ่านรูที่เจาะให้กลายเป็นหยดและฟิล์มบางเพื่อการสัมผัสกับกระแสอากาศเสียเกิดขึ้นได้ยาก เมื่อน้ำซีรัมไหลลงมาผ่านเพลท น้ำซีรัมจะสามารถไหลผ่านรูที่เจาะได้น้อยเนื่องจากความหนืดของน้ำซีรัม โดยน้ำซีรัมส่วนใหญ่จะไหลลงทางขอบด้านข้างของแผ่นเพลท ถึงแม้จะมีการออกแบบแผ่นเพลทให้มีระยะห่างระหว่างขอบเพลทกับคอลัมน์ให้น้อยที่สุดแล้วก็ตาม สำหรับในส่วนของอากาศเสียที่ถูกฉีดจากด้านล่างของคอลัมน์อากาศเสียจะสามารถไหลผ่านรูเจาะได้บางส่วน โดยมีบางรูของเพลทจะมีน้ำซีรัมขวางกั้นการไหลอยู่ทำให้อากาศเสียส่วนหนึ่งต้องไหลผ่านทางขอบของแผ่นเพลท จากการไหลของน้ำซีรัมและอากาศเสียในลักษณะเช่นนี้จะทำให้การสัมผัสระหว่างของเหลวกับอากาศเสียเกิดขึ้นได้น้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียโดยน้ำซีรัมในระบบแบบเพลทมีค่าต่ำมาก และเมื่อเพิ่มจำนวนแผ่นเพลทในคอลัมน์ก็จะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง เพราะจากการดำเนินการดังกล่าวจะทำให้เกิดความดันลดของกระแสอากาศเสียในระบบที่สูง และการไหลของของเหลวผ่านแผ่นเพลทที่ค่อนข้างยากทำให้เกิดการท่วม (flooding) ของน้ำซีรัมในระบบได้ง่าย

3.3 ผลการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียโดยระบบหอดูดซึมแบบ Packed Column

จากการทดลองการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยระบบหอดูดซึม 2 แบบที่ผ่านมา คือ แบบ Semi-batch Reactor และแบบ Perforate Plate พบว่ามีปัญหาเกิดขึ้นหลายอย่างในการดำเนินการ ทำให้มีความไม่สะดวกและไม่เหมาะสมในการดำเนินการ เช่น แบบ Semi-batch Reactor มีความดันลดเกิดขึ้นมาก แบบ Perforate Plate ให้ประสิทธิภาพที่ต่ำมากเมื่อใช้น้ำซีรัมเป็นสารดูดซึม จึงได้ทำการทดลองการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยปฏิกรณ์หอดูดซึมแบบ Packed Column ที่มีการออกแบบและติดตั้งที่โรงงานผลิตน้ำยางข้นซึ่งมีขนาด plant scale ด้วยการใช้น้ำและน้ำซีรัมเป็นสารดูดซึม และใช้อากาศเสียที่ปนเปื้อนด้วยแอมโมเนียที่ได้รับโดยตรงจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้นของโรงงาน โดยได้ทำการศึกษาทดลองถึงประสิทธิภาพของระบบหอดูดซึมจากการใช้น้ำและน้ำซีรัมเป็นสารดูดซึม ซึ่งได้ผลการทดลองตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ผลการใช้น้ำเป็นสารดูดซึมในระบบ Packed Column

ผลการทดลองการใช้น้ำเป็นสารดูดซึมในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียในระบบ Packed Column โดยการใช้น้ำบรรจุในถังเก็บสารดูดซึมที่ปริมาตร 300 ลิตร ทำการป้อนน้ำจากถังเก็บส่งเข้าหัวสเปรย์ภายในคอลัมน์ น้ำที่ใช้นี้มีการป้อนแบบไหลหมุนวนกลับเข้าไปในระบบหอดูดซึมอย่างต่อเนื่อง (circulation) เพื่อทำการดูดซึมแอมโมเนียในอากาศเสีย ซึ่งจะได้ผลการทดลองที่สามารถแสดงได้ตามกราฟในรูปที่ 3-8 และ 3-9



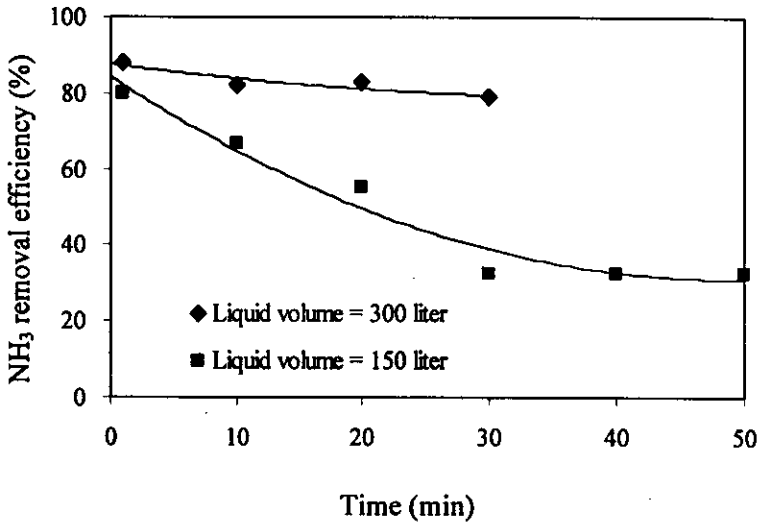
รูปที่ 3-8 การกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยน้ำใน Packed column ที่ C_{NH_3} 1,500 ppm Air flow rate = 6 m^3/min, ปริมาตรน้ำในถังเก็บ 300 ลิตร และ Liquid flow rate = 2.4 m^3/h

การหาประสิทธิภาพการบำบัดอากาศเสียทำได้โดยการเก็บตัวอย่างอากาศเสียและความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ท่อทางเข้าและทางออกของระบบ และนำผลที่ได้มาทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของระบบที่เวลาต่างๆ ในขณะเดียวกันทำการเก็บตัวอย่างน้ำในถังเก็บและวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำโดยวิธีการไตรเตรท พบว่าการใช้น้ำในการกำจัดแอมโมเนียในหอดูดซึบแบบ Packed column จะให้ประสิทธิภาพที่สูงในช่วงเริ่มต้นของการดำเนินการ นั่นคือ ระบบจะให้ประสิทธิภาพที่สูงถึง 92% แต่เมื่อทำการป้อนหมุนวนน้ำกลับมาใช้ในระบบอย่างต่อเนื่อง ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำก็จะสูงขึ้น ส่งผลทำให้แรงขับ (driving force) ของการดูดซึมแอมโมเนียจากเฟสแก๊สไปยังเฟสของเหลวลดลง ทำให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่ทางออกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือระบบมีประสิทธิภาพที่ลดต่ำลงนั่นเอง ซึ่งหากระบบดำเนินการเช่นนี้อย่างต่อเนื่องไประยะเวลาหนึ่ง กระบวนการดูดซึมจะเข้าสู่สมดุล คือ การถ่ายโอนมวลสุทธิของแอมโมเนียจากเฟสแก๊สไปยังเฟสของเหลวจะเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งจากกราฟในรูป 3-8 จะเห็นว่าเมื่อมีการดำเนินการไปมากกว่า 40 นาที ความเข้มข้นของแอมโมเนียในน้ำจะคงที่ที่ 0.21% และประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเป็นประมาณ 20% ซึ่งถ้าต้องการให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงอย่างต่อเนื่อง จำเป็นต้องป้อนน้ำใหม่เข้ามาแทน

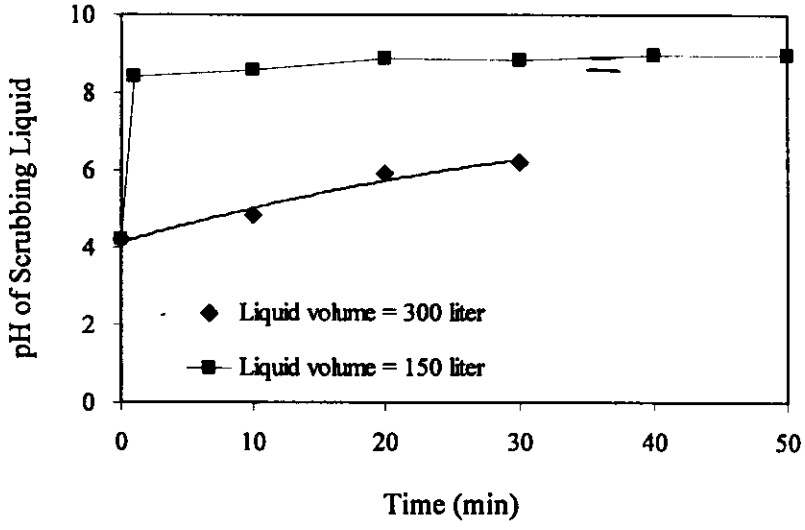
การใช้น้ำเป็นสารดูดซึมในการกำจัดแอมโมเนีย จึงมีความเป็นไปได้น้อย เนื่องจากจะต้องใช้น้ำในปริมาณมากเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียที่สูงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้มีปริมาณน้ำเสียเพิ่มขึ้นตามมาได้

3.3.2 ผลการใช้น้ำซีรัมเป็นสารดูดซึมในระบบ Packed Column

ผลการทดลองการกำจัดแอมโมเนียด้วยชุดทดลองหอดูดซึมแบบ Packed column โดยการใช้น้ำซีรัมที่ได้จากบ่อผลิตยางสกิม แสดงดังในรูปที่ 3-9 และ 3-10 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียกับเวลาและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ของน้ำซีรัมกับเวลา ตามลำดับ โดยจากกราฟยังได้แสดงการเปรียบเทียบผลของปริมาณการใช้น้ำซีรัมในถังเก็บที่ 150 ลิตร และ 200 ลิตร ต่อประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียและค่า pH ของน้ำซีรัมในถังเก็บ



รูปที่ 3-9 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยน้ำซีรัมใน Packed column ที่ C_{NH_3} = 1,500 ppm Air flow rate = 6 m^3/min และ Liquid flow rate = 2.4 m^3/h



รูปที่ 3-10 ค่า pH ของน้ำซีรัมในระบบการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วย Packed column ที่ C_{NH_3} = 1,500 ppm Air flow rate = 6 m^3/min และ Liquid flow rate = 2.4 m^3/h

ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยน้ำซีรัมใน Packed column จะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำซีรัมที่ใช้ในระบบ ซึ่งหากมีปริมาณน้ำซีรัมที่ใช้หมุนวนในระบบในปริมาณที่น้อยเกินไปก็จะทำให้ปริมาณกรดซัลฟูริกในน้ำซีรัมมีไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสะเทินกับแอมโมเนียที่ดูดซึมมาจากอากาศเสียได้ จากรูปที่ 3-10 จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้น้ำซีรัมในถังเก็บในปริมาณ 150 ลิตร เพื่อป้อนเข้าดูดซึมแอมโมเนียในอากาศเสียในระบบหอดูดซึม จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการกำจัด

แอมโมเนียของระบบในช่วง 40 นาที ลดลงจากตอนเริ่มต้นที่ 80% ไปเป็นประมาณ 30% และทำให้ค่า pH ของน้ำซีรัมในถังเก็บเพิ่มขึ้นจาก pH 3.0 ไปเป็น pH 8.5 เมื่อน้ำซีรัมผ่านการใช้งานในหอดูดซึมไปเพียง 3 นาที ซึ่งการดำเนินการเช่นนี้จะมีลักษณะที่ไม่ต่างไปจากการใช้น้ำมากนัก เนื่องจากปริมาณกรดทั้งหมดในน้ำซีรัมปริมาตร 150 ลิตร ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ในการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสีย เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้น้ำซีรัมในถังเก็บของระบบเป็น 300 ลิตร พบว่า จะทำให้ได้ประสิทธิภาพการดูดซึมของน้ำซีรัมในระบบหอดูดซึมลดลงจากตอนเริ่มต้นการดำเนินการเพียงเล็กน้อย คือ มีประสิทธิภาพที่ลดลงจากประมาณ 87% ไปเป็น 80% และมีค่า pH ของน้ำซีรัมค่อยๆ เพิ่มจากค่า pH 3.0 ไปเป็น pH 6.0 ในเวลา 30 นาที ซึ่งจะเห็นว่าที่ค่า pH 6.0 ของน้ำซีรัม ยังคงให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียสูง

ในการดำเนินกระบวนการดูดซึมแอมโมเนียในอากาศเสียด้วยหอดูดซึมแบบ Packed column โดยใช้น้ำซีรัมเป็นสารดูดซึมที่มีการไหลวนป้อนกลับในระบบ จะมีการป้อนน้ำซีรัมให้ไหลผ่านหัวสเปรย์เพื่อฉีดน้ำซีรัมให้กระจายตัวเป็นฟิล์มไหลผ่านวัสดุเพคภายในคอลัม เมื่อน้ำซีรัมไหลออกจากตัวคอลัมน์ก็จะมีการไหลตกกระแทกกับน้ำซีรัมในถัง การดำเนินการเช่นนี้ทำให้น้ำซีรัมที่ใช้ได้รับแรงในหลายขั้นตอนจนทำเกิดเป็นฟองและมีปริมาณฟองเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อผ่านการดำเนินการในระยะเวลาที่นานขึ้น ฟองที่เกิดขึ้นจากน้ำซีรัมนี้เกิดจากสารธรรมชาติชนิดสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ที่ละลายอยู่ในน้ำซีรัม เมื่อมีฟองเกิดขึ้นในระบบหอดูดซึมในปริมาณที่มากพอก็จะทำให้ฟองค้างอยู่ในคอลัมน์จนเกิดการต้านการไหลของทั้งเฟสของเหลวและแก๊สในคอลัมน์จนเกิดการท่วม (flooding) ของน้ำซีรัมในคอลัมน์ ซึ่งจะทำให้มีของเหลวค้างอยู่ในชั้นเพคจนของเหลวไม่สามารถไหลลงด้านล่างของคอลัมน์และกระแสอากาศเสียก็ไม่สามารถไหลผ่านวัสดุเพคขึ้นไปยังส่วนบนของคอลัมน์ได้ การใช้น้ำซีรัมเป็นสารดูดซึมในระบบหอดูดซึมด้วยการไหลวนกลับเช่นนี้จึงควรจะต้องมีการเติมสารป้องกันการเกิดฟอง เช่น ซิลิโคนออยล์ หรือสารดิโฟมมิ่ง (defoaming) ชนิดต่างๆ เพื่อป้องกันไม่ให้มีการเกิดฟองขึ้น และอาจต้องมีการเติมสารป้องกันการเกิดฟองอย่างต่อเนื่องในระหว่างการดำเนินการเพื่อทำลายฟองที่เกิดขึ้นใหม่

น้ำซีรัมเป็นส่วนประกอบที่มีปริมาณมากที่สุดในน้ำยางสด น้ำซีรัมจึงเกิดขึ้นในปริมาณมากจากกระบวนการผลิตน้ำยางข้นและจะถูกส่งไปทำการบำบัดที่ระบบบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง จึงมีความเป็นไปได้ทำจะทำการกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียของโรงงานน้ำยางข้นโดยการใช้น้ำซีรัมเป็นสารดูดซึมในหอดูดซึมแบบไหลผ่านรอบเดียวโดยไม่มีการไหลวนกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจะทำให้สามารถช่วยแก้ปัญหาของการเกิดฟองของน้ำซีรัมในระบบหอดูดซึมได้โดยไม่จำเป็นจะต้องมีการเติมสารป้องกันการเกิดฟอง ซึ่งสารนี้มีราคาที่ค่อนข้างสูงหากนำมาใช้ในระบบกำจัดแอมโมเนียในอากาศเสียอาจต้องใช้ในปริมาณมาก ในการใช้น้ำซีรัมโดยการผ่านระบบหอดูดซึมรอบเดียวจะต้องมีการติดตั้งปั๊มเพื่อป้อนน้ำซีรัมจากถังเก็บน้ำซีรัมเข้าสู่ระบบหอดูดซึม และจะต้องทำการกรองเอาเศษ

ยางและเศษของแข็งอื่นๆ ออกก่อนด้วยตะแกรงกรอง เพื่อป้องกันการอุดตันในปั๊ม ระบบท่อ และในวัสดุเพคของหอดูดซึม เมื่อน้ำซีรัมถูกป้อนผ่านหอดูดซึมและไหลออกจากระบบ ก็จะถูกส่งไปเก็บในบ่อพักอีกบ่อก่อนที่จะปั๊มน้ำซีรัมส่งไปยังบ่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งการทำเช่นนี้จะมีความเป็นไปได้สูงสำหรับโรงงานผลิตน้ำยางข้น