

# การกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียด้วยเปลือกเงาะอบแห้งแบบคอลัมน์ดูดซับต่อเนื่อง

## Phosphorus Removal from Wastewater Using Dried Rambutan Peels in Continuous Fixed-Bed Adsorption Column

รวินิภา ศรีมูล<sup>1\*</sup> และ วิทยา คณาวงษ์<sup>1</sup>  
Rawinipa Srimoon<sup>1\*</sup> and Vittaya Kanavong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกวิทยาเขตจันทบุรี  
<sup>1</sup> Department of Applied Science and Biotechnology, Rajamangala University of Technology Tawan-Ok, Chanthaburi campus.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้เปลือกเงาะอบแห้งโดยให้น้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง ศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่ อัตราการไหลของสารละลาย ความสูงของตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย พบว่า เมื่ออัตราการไหลและความเข้มข้นของสารละลายฟอสฟอรัสลดลง รวมทั้งเพิ่มความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ เวลาเบรคทูเพิ่มขึ้น ทำให้ตัวดูดซับมีเวลาสัมผัสกับสารได้นานกว่า สำหรับการดูดซับฟอสฟอรัสด้วยเปลือกเงาะอบแห้ง ที่ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์เท่ากับ 20 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 2 นิ้ว อัตราการไหลของสารละลาย 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความเข้มข้นเริ่มต้น 25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ไหลอย่างต่อเนื่อง 240 นาที ให้เวลาเบรคทู 92.5 นาที ความลึกของบริเวณที่มีการถ่ายเทมวล 12.30 เซนติเมตร ที่สภาวะดังกล่าว สามารถดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสได้เฉลี่ยร้อยละ  $64.62 \pm 2.28$  แต่เมื่อทดสอบกับน้ำเสียจริง สามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้เฉลี่ยร้อยละ  $58.51 \pm 1.91$  เนื่องจากในน้ำเสียจริงมีสารหลายประเภทซึ่งเปลือกเงาะอาจดูดซับได้เช่นเดียวกัน การดูดซับมีความสอดคล้องกับโมเดลการดูดซับของโทมัส ( $r^2 = 0.9282 \pm 0.110$ ) โดยมีค่า A และ B เท่ากับ  $1.047 \pm 0.983$  และ  $0.087 \pm 0.071$  ตามลำดับ นอกจากนี้ สารละลายที่ไหลออกจากคอลัมน์มี pH ต่ำลงและจะเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 30 นาที แต่เมื่อพิจารณา pH ของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเปลือกเงาะอบแห้งไม่ได้ทำให้ pH ของน้ำเสียเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด กล่าวโดยสรุป การใช้เปลือกเงาะอบแห้งเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยการไหลผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่องสามารถกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียได้ดี และเปลือกเงาะที่ใช้ดูดซับฟอสฟอรัสแล้วนั้น สามารถไปฝังกลบหรือผสมกับดินเพื่อเป็นปุ๋ยให้กับต้นไม้ได้ เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหนึ่งของพืชด้วย

คำสำคัญ: เปลือกเงาะ ฟอสฟอรัส คอลัมน์ดูดซับ

\* ที่อยู่ติดต่อ. โทรศัพท์ : 0817155329 โทรสาร : 039307268 E-mail : rawinipa.srimoon@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Abstract

The purpose of this research was to study the adsorption efficiency of phosphorus from wastewater using dried rambutan peels in fixed-bed continuous column. The effects of flow rate, adsorbent bed depth and initial concentration were investigated. The results showed that lowering in flow rate and initial concentration of standard phosphorus, and increasing in adsorbent bed depth increased the breakthrough time. That was because of the more contact time between solution and adsorbent. It was noted that the optimum condition that led the highest breakthrough time (92.5 minutes) was 20 centimeters adsorbent height, 2 inches column diameter, 5 mL/minute flow rate, 25 mg-P/L in initial concentration, and 240 minutes flow time. The depth of mass transfer zone was 12.30 centimeters. Maximum adsorption percentage for standard phosphorus and wastewater were  $64.62 \pm 2.28$  and  $58.51 \pm 1.91$ , respectively. A little deviation from the experimental result was found since many substances in wastewater could be adsorbed by rambutan peels also. The data was fitted to the Thomas model ( $r^2 = 0.9282 \pm 0.110$ ) with A and B constants were  $1.047 \pm 0.983$  and  $0.087 \pm 0.071$ , respectively. In addition, pH of the effluent solution was lower by 44% compared with the influent solution. Flowing throughout the column packed with dried rambutan peels did not affect to the pH of wastewater, because the pH of effluent solution was closed to that of wastewater. The results from this study were suitable for estimating the adsorption efficiency of phosphorus in continuous column by using dried rambutan peels. In conclusion, dried rambutan peels were useful adsorbent for treating phosphorus from wastewater. Moreover, treatment sludge, which has plenty of plant nutrients, could be buried as a fertilizer.

Keywords: Rambutan peels, Phosphorus, column adsorption

### 1. บทนำ

ฟอสฟอรัส (phosphorus) เป็นธาตุอาหารที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย มีแหล่งที่มาสำคัญคือ สารซักล้างจำพวกผงซักฟอกจากครัวเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม และปุ๋ยฟอสเฟตที่ใช้ในการเกษตรกรรม ฟอสฟอรัสในแหล่งน้ำส่วนใหญ่อยู่ในรูปของออร์โธฟอสเฟตและโพลีฟอสเฟต ถ้าในแหล่งน้ำมีฟอสฟอรัสมากเกินไปจะทำให้เกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของสาหร่ายสีเขียวและวัชพืชน้ำ หรือ ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ทำให้ออกซิเจนละลาย (dissolved oxygen, D.O.) ในน้ำลดลงอย่างรวดเร็วทำให้น้ำเน่าเสีย [1] นอกจากนี้ ปริมาณฟอสฟอรัสยังมีความสำคัญในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ซึ่งต้องมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส ประมาณ 100 : 5 : 1 การบำบัดจึงจะเกิดขึ้นได้

อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น การบำบัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง การกำจัดฟอสฟอรัสโดยวิธีทางเคมี ได้แก่ การตกผลึก การตกตะกอน และกระบวนการดูดซับ ซึ่งการดูดซับเป็นวิธีที่เหมาะสมในการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสีย เนื่องจากสามารถติดตั้งเพื่อใช้งานได้ทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้ามีการพัฒนาตัวดูดซับที่มาจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีอยู่ทั่วไปในท้องถิ่น ดังเช่นเปลือกเงาะอบแห้ง เนื่องจากในจังหวัดจันทบุรีเป็นแหล่งปลูกเงาะที่สำคัญของประเทศ ในแต่ละปีมีผลผลิตเงาะออกสู่ตลาดไม่น้อยกว่า 150,000 ตัน คิดเป็นมูลค่ามากกว่า 1,000 ล้านบาท [2] เงาะ 1 ผล มีเปลือกเงาะประมาณร้อยละ 50 ของน้ำหนักทั้งหมด มีใยอาหารร้อยละ 61.81 และสารโพลีฟีนอลที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระในปริมาณสูง [3] ในระดับอุตสาหกรรมมีเปลือกและเมล็ดเงาะเป็นของเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก แม้จะมีการนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นส่วนประกอบของอาหารหรือผสมสารสกัดจากเปลือกเงาะลงในครีมลดริ้วรอย แต่ก็ยังมีเปลือกเงาะเหลือทิ้งอยู่อีกเป็นจำนวนมาก ดังนั้น การนำมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำเสียจะเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเปลือกเงาะได้อีกทางหนึ่ง การวิจัยในครั้งนี้จึงศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้เปลือกเงาะอบแห้งโดยการไหลน้ำเสียผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง เพื่อทราบถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาวัสดุดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำเสียต่อไป

กระบวนการดูดซับด้วยคอลัมน์แบบต่อเนื่อง (continuous fixed-bed adsorption column) เป็นการบรรจุตัวดูดซับไว้ในคอลัมน์ดูดซับและให้น้ำเสียไหลผ่าน เป็นวิธีการที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้บำบัดน้ำเสียที่ถูกปล่อยออกมาตลอดเวลา การดูดซับในคอลัมน์จะเริ่มจากส่วนบนลงสู่ด้านล่างตามทิศทางการไหลของของเหลว เวลาที่ใช้ในการดูดซับจนกระทั่งความสามารถในการดูดซับเริ่มหมดไป เรียกว่า เวลาเบรคทูร์ (breakthrough time) หาได้จากกราฟเบรคทูร์ (breakthrough curve) โดยทั่วไปมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S-Shape) [4] และสามารถใช้โมเดลการดูดซับของโทมัส (Thomas model) ประมาณค่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ และทำนายลักษณะของกราฟเบรคทูร์ ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองแบบผันกลับได้ (second-order reversible reaction) และการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมของแลงเมียร์ โมเดลการดูดซับของโทมัสเป็นดังสมการที่ (1) [5,6]

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp(A - Bt)} \quad \dots (1)$$

เมื่อ  $C_t$  คือ ความเข้มข้นของสารที่ออกจากคอลัมน์ (effluent concentration, มิลลิกรัมต่อลิตร) และ  $C_0$  คือ ความเข้มข้นของสารที่เข้าสู่คอลัมน์ (influent concentration, มิลลิกรัมต่อลิตร)  $t$  คือ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที) ส่วน  $A$  และ  $B$  คือ ค่าคงที่ตามสมการของโทมัส

บริเวณที่มีการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer zone) คือ บริเวณของตัวดูดซับที่ความเข้มข้นของสารมีการเปลี่ยนแปลงจากน้อยไปมาก ตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปยังส่วนท้ายของการดูดซับ เมื่อตัวดูดซับอิ่มตัวหรือที่ว่างของการดูดซับ (active site) น้อยลง การดูดซับจะเริ่มลดลงจนคงที่ในที่สุด ความหนาของชั้นดูดซับมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ความหนาของชั้นดูดซับจะต้องมากกว่าความลึกของบริเวณถ่ายเทมวลสารเสมอ ความลึกของบริเวณที่มีการถ่ายเทมวลสารคำนวณได้จากสมการที่ (2) [4]

$$L_m = L \left[ 1 - \frac{t_b}{t_s} \right] \quad \dots (2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $L_m$  คือ ความลึกของบริเวณที่มีการถ่ายเทมวลสาร (เซนติเมตร)  $L$  คือ ความสูงของตัวดูดซับ (เซนติเมตร)  $t_b$  คือ เวลาเบรคท루 (นาที) และ  $t_s$  คือ เวลาที่ใช้ทั้งหมด (นาที)

## 2. วิธีการทดลอง

### 2.1 การเตรียมตัวอย่าง อุปกรณ์ และสารเคมี

เตรียมตัวอย่างเปลือกเงาะอบแห้ง โดยนำเปลือกเงาะสดไปล้างน้ำประปาให้สะอาด หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ นำไปแช่สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ นาน 1 วัน เพื่อรักษาสภาพ จากนั้นนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 – 70 องศาเซลเซียส จนกว่าจะแห้งสนิท นำไปป่นให้ละเอียด ร่อนเอาเศษขนาดใหญ่ออกไป เก็บใส่ถุงพลาสติกในที่แห้งอุณหภูมิห้อง สำหรับคอลัมน์ดูดซับใช้คอลัมน์แก้ว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 2 ฟุต สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดวิเคราะห์ (analytical reagent, AR grade) เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ เป็นของ Libra S22 Biochrom ตัวอย่างน้ำเสียจริง เก็บจากบ่อพักน้ำเสียของหอพักมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกวิทยาเขตจันทบุรี วิเคราะห์ปริมาณฟอสฟอรัสในรูปออร์โธฟอสเฟตด้วยวิธีแอสคอร์บิก (Ascorbic acid method) ตามวิธีการที่ดัดแปลงจาก มั่นสิน ตันทุลเวศม์ และมันรัช ตันทุลเวศม์ [7]

### 2.2 การเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์

บรรจุเปลือกเงาะอบแห้งลงในคอลัมน์สูง 10 เซนติเมตร เคาะข้างคอลัมน์ให้เปลือกเงาะบรรจุกันดี ทดสอบการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ ดังต่อไปนี้: น้ำกลั่น สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร และน้ำเสียจริง วัด pH ของสารละลายก่อนไหลผ่านคอลัมน์ จากนั้นผ่านสารละลายลงในคอลัมน์โดยให้มีอัตราการไหลอย่างต่อเนื่อง 5 มิลลิตรต่อนาที เก็บตัวอย่างสารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เวลา 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 180 และ 240 นาที นำไปวัดค่า pH พร้อมเตรียมชุดควบคุมที่ไม่ผ่านคอลัมน์

### 2.3 ทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

บรรจุเปลือกเงาะอบแห้งลงในคอลัมน์ให้เปลือกเงาะบรรจุกันดี ทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของเปลือกเงาะ 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหล (flow rate) 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 มิลลิตรต่อนาที ความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ (adsorbent bed depth) 2 ระดับ คือ 10 และ 20 เซนติเมตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (initial concentration) 3 ระดับ คือ 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร เก็บตัวอย่างสารละลายที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เวลา 0, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 180 และ 240 นาที นำไปวัดปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต สร้างกราฟเบรคท루 (พล็อตระหว่าง  $C_t/C_0$  และ เวลา) เพื่อหาเวลาเบรคท루 แต่ละการทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง รายงานเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean  $\pm$  SD)

#### 2.4 ทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสและน้ำเสียจริง

บรรจุเปลือกเงาะอบแห้งลงในคอลัมน์ที่ระดับความสูง 20 เซนติเมตร เติมสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร หรือตัวอย่างน้ำเสียจริงลงในคอลัมน์อย่างต่อเนื่องในอัตราการไหล 5 มิลลิเมตรต่อนาที เก็บตัวอย่างสารที่ออกมาจากคอลัมน์ที่เวลา 92.5 นาที (เวลาเบรคทรี) นำไปวัดปริมาณฟอสฟอรัส และคำนวณร้อยละการดูดซับฟอสฟอรัส ทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง รายงานเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean  $\pm$  SD)

#### 2.5 วิเคราะห์ความสอดคล้องกับโมเดลของการดูดซับ

นำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความสอดคล้องกับโมเดลการดูดซับของโทมัส ตามสมการที่ (2) โดยพิจารณาจากค่า  $r^2$  และคำนวณค่าคงที่ของสมการ (ค่า A และ B) วิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนจากโมเดลของโทมัสจากสมการที่ (3) [6]

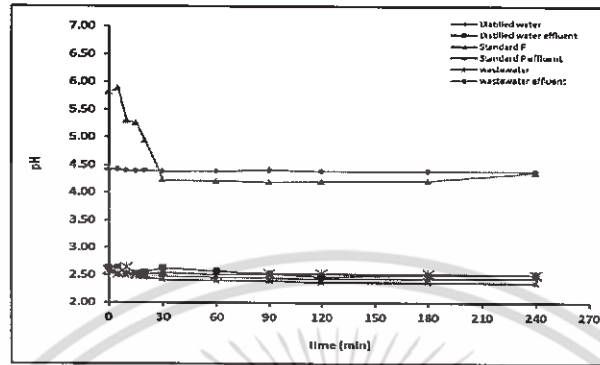
$$E = \sqrt{\frac{(Y_c - Y_e)^2}{n-2}} \dots (3)$$

เมื่อ E คือ ความคลาดเคลื่อน  $Y_c$  คือ อัตราส่วน  $C_t/C_0$  จากสมการของโทมัส  $Y_e$  คือ อัตราส่วน  $C_t/C_0$  จากการทดลอง และ n คือ จำนวนซ้ำของการทดลอง

### 3. ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 3.1 ผลการเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์

สารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเปลือกเงาะอบแห้ง ได้แก่ น้ำกลั่น สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส และน้ำเสียจริง มี pH เปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 1 pH ของน้ำกลั่น สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส และน้ำเสียจริง ก่อนผ่านคอลัมน์มีค่า 4.42, 5.81 และ 2.55 ตามลำดับ แต่เมื่อไหลผ่านคอลัมน์แล้ว pH เท่ากับ 2.52, 2.51 และ 2.45 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสารละลายที่ไหลออกจากคอลัมน์มี pH ต่ำลง และ pH จะเริ่มคงที่ที่เวลาประมาณ 30 นาที แต่เมื่อพิจารณา pH ของน้ำเสียจริงก่อนและหลังผ่านคอลัมน์ มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าการไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเปลือกเงาะอบแห้งไม่ได้ทำให้ pH ของน้ำเสียเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด

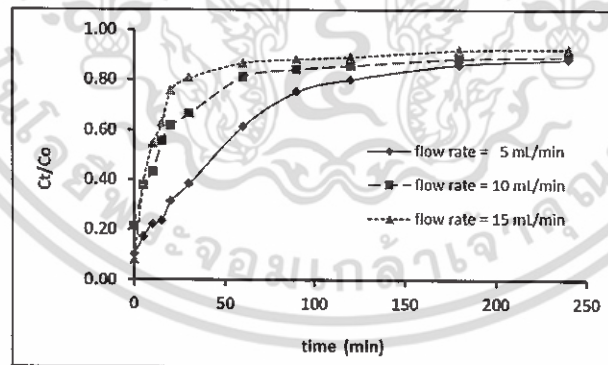


รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลง pH ของสารละลายที่ไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเปลือกเงาะอบแห้ง

### 3.2 ผลการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

#### 1) ผลของอัตราการไหลต่อการดูดซับ

การดูดซับฟอสฟอรัสที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 มิลลิเมตรต่อนาที ความสูงของเปลือกเงาะในคอลัมน์คงที่ 10 เซนติเมตร ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร พบว่า ที่อัตราการไหล 5 มิลลิเมตรต่อนาที มีเวลาเบรคทูลสูงที่สุด เท่ากับ 45 นาที (รูปที่ 2) เมื่อลดอัตราการไหลให้ช้าลงเวลาเบรคทูลเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลดีต่อการดูดซับเพราะสารละลายและตัวดูดซับจะมีเวลาสัมผัสกันนานขึ้น ความสามารถของเปลือกเงาะอบแห้งในการดูดซับฟอสฟอรัสก็จะสูงขึ้น

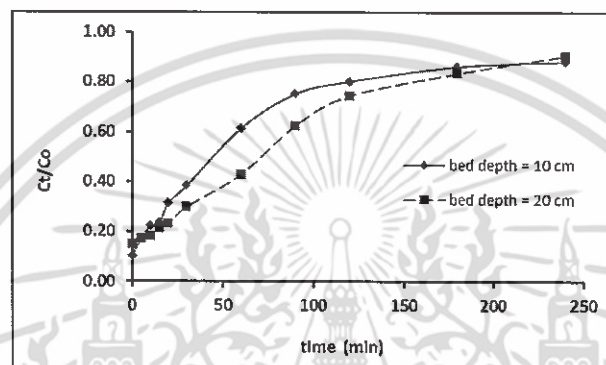


รูปที่ 2 กราฟเบรคทูลของอัตราการไหลของสารละลายต่อการดูดซับฟอสฟอรัส

#### 2) ผลของความสูงของตัวดูดซับต่อการดูดซับ

ทดสอบผลของความสูงของเปลือกเงาะอบแห้งในคอลัมน์ที่มีความสูงแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 10 และ 20 เซนติเมตร สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 50 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร อัตราการไหลที่

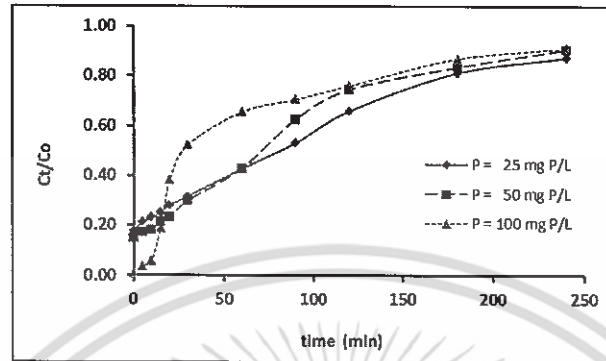
5 มิลลิลิตรต่อนาที (พิจารณาจากอัตราการไหลที่ให้เวลาเบรคทฤษฎีมากที่สุด) พบว่า ที่ความสูงของตัวดูดซับเท่ากับ 20 เซนติเมตร มีเวลาเบรคทฤษฎีมากกว่า เท่ากับ 72 นาที (รูปที่ 3) เวลาเบรคทฤษฎีเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความสูงของตัวดูดซับ เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวของการดูดซับให้มากขึ้นนั่นเอง ดังนั้น หากเพิ่มความสูงของเปลือกเงาะอบแห้งในคอลัมน์ บริเวณที่มีการถ่ายเทมวลจะลึกขึ้นด้วยเช่นกัน การดูดซับก็จะเกิดได้ดีขึ้น



รูปที่ 3 กราฟเบรคทฤษฎีของความสูงของตัวดูดซับในคอลัมน์ต่อการดูดซับฟอสฟอรัส

### 3) ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสต่อการดูดซับ

เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 25, 50 และ 100 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความสูงของเปลือกเงาะอบแห้ง 20 เซนติเมตร พบว่า เวลาเบรคทฤษฎีเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายลดลง ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส 25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร มีเวลาเบรคทฤษฎีสูงสุด คือ 92.5 นาที (รูปที่ 4) ที่ความเข้มข้นสูงๆ ผิวของตัวดูดซับก็จะถูกปกคลุมเอาไว้ด้วยโมเลกุลของฟอสฟอรัสจำนวนมาก ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลเร็วและบริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer zone) จะยิ่งตื้น ในทางตรงข้าม หากความเข้มข้นของสารละลายต่ำ อัตราเร็วของการดูดซับจะเกิดขึ้นช้ากว่า บริเวณที่เกิดการถ่ายเทมวลจะอยู่ลึกขึ้น จึงสามารถดูดซับสารได้มีประสิทธิภาพกว่า อาจกล่าวได้ว่า การดูดซับฟอสฟอรัสโดยใช้เปลือกเงาะอบแห้งจะดูดซับฟอสฟอรัสได้ดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งในน้ำเสียที่มีปริมาณฟอสฟอรัสไม่สูงจนเกินไป



ภาพที่ 4 กราฟเบรคทรูของความเข้มข้นของสารละลายฟอสฟอรัสต่อการดูดซับ

ตารางที่ 1 สรุปเวลาเบรคทรูจากการทดลองที่สภาวะต่างๆ

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)	การทดลอง		เวลาเบรคทรู (นาที)
	ความสูงของตัวดูดซับ (เซนติเมตร)	ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน ฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร)	
5	10	50	45.0
10	10	50	12.5
15	10	50	8.0
5	10	50	45.0
5	20	50	72.0
5	20	25	92.5
5	20	50	72.0
5	20	100	32.5

หมายเหตุ จำนวนซ้ำของการทดลอง  $n = 3$

### 3.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสและน้ำเสียจริง

เมื่อนำสภาวะที่ได้จากการทดลอง คือ สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร อัตราการไหลอย่างต่อเนื่อง 5 มิลลิลิตรต่อนาที บรรจุเปลือกเงาะในคอลัมน์สูง 20 เซนติเมตร ไปทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส พบว่า สามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้เฉลี่ยร้อยละ  $64.62 \pm 2.28$  ในขณะที่เมื่อนำไปทดสอบกับน้ำเสียจริงจากบ่อกักน้ำเสียในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออกวิทยาเขตจันทบุรี พบว่า สามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้เฉลี่ยร้อยละ  $58.51 \pm 1.91$  สาเหตุที่ดูดซับได้ต่ำลงอาจเนื่องมาจาก ในน้ำเสียจริงมีสารหลายประเภทปะปนกันอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเปลือกเงาะสามารถดูดซับเอาไว้ได้เช่นเดียวกับฟอสฟอรัส ทำให้แข่งขันกันแย่งที่ว่างบนผิวของตัวดูดซับ ดังนั้น น้ำเสียที่ผ่านคอลัมน์จึงมีร้อยละของการดูดซับฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำกว่าการดูดซับสารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเพียงอย่างเดียว

ที่สภาวะดังกล่าวเมื่อให้สารละลายไหลผ่านอย่างต่อเนื่องทั้งหมด 240 นาที ให้เวลาเบรคทรูเท่ากับ 92.5 นาที จะมีความลึกของบริเวณที่มีการถ่ายเทมวล เท่ากับ 12.30 เซนติเมตร (คำนวณจากสมการที่ 2) นั่นหมายความว่า การบรรจุเปลือกเงาะอบแห้งลงในคอลัมน์ต้องมีความสูงไม่ต่ำกว่า 12.30 เซนติเมตร การดูดซับจึงจะเกิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ภายใต้สภาวะดังกล่าว หากเพิ่มความสูงของตัวดูดซับ ก็มีแนวโน้มว่าบริเวณที่มีการถ่ายเทมวลจะลึกขึ้นด้วยเช่นกัน เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวของการดูดซับให้มากขึ้นนั่นเอง

ตารางที่ 2 ค่าตามสมการของโหม้สจากการทดลองที่สภาวะต่างๆ

อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อ นาที)	การทดลอง		$r^2$	ค่าตามสมการของโหม้ส		ความคลาดเคลื่อน
	ความสูงของ ตัวดูดซับ (เซนติเมตร)	ความเข้มข้นของสารละลาย มาตรฐานฟอสฟอรัส (มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร)		A	B	
5	10	50	0.9878	1.783	0.073	0.239
10	10	50	0.8665	0.704	0.094	0.197
15	10	50	0.6816	0.271	0.205	0.183
5	10	50	0.9878	1.786	0.073	0.239
5	20	50	0.9941	0.002	0.025	0.250
5	20	25	0.9979	1.119	0.021	0.247
5	20	50	0.9941	0.002	0.025	0.250
5	20	100	0.9159	2.712	0.179	0.244
เฉลี่ย			$0.9282 \pm 0.110$	$1.047 \pm 0.983$	$0.087 \pm 0.071$	$0.231 \pm 0.026$

หมายเหตุ จำนวนซ้ำของการทดลอง  $n = 3$

### 3.4 ผลการวิเคราะห์ความสอดคล้องกับโมเดลการดูดซับของโหม้ส

เมื่อศึกษาความสอดคล้องกับโมเดลการดูดซับของโหม้สในทุกสภาวะของการทดลอง เพื่อใช้ทำนายการดูดซับของฟอสฟอรัสในน้ำเสีย พบว่า ค่า  $r^2$  มีค่าเฉลี่ย  $0.9282 \pm 0.110$  สภาวะที่ค่า  $r^2$  สูงสุดคือ อัตราการไหล 5 มิลลิลิตรต่อนาที ความสูงของตัวดูดซับ 20 เซนติเมตร และความเข้มข้นเริ่มต้นของ

สารละลายฟอสฟอรัส 25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้เวลาเบรคทรูสูงสุดด้วยเช่นกัน คือ 92.5 นาที จำนวนค่าคงที่ตามสมการของโทมัส (สมการที่ 1) พบว่า ค่า A มีค่าเฉลี่ย  $1.047 \pm 0.983$  และค่า B มีค่าเฉลี่ย  $0.087 \pm 0.071$  ค่า A เป็นค่าคงที่ตามสมการของโทมัส ซึ่งใช้ประมาณค่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับในคอลัมน์ จากการทดลอง แนวโน้มของค่า A จะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราการไหล แต่แนวโน้มไม่ชัดเจนเมื่อเพิ่มความสูงของตัวดูดซับและความเข้มข้นของสารละลาย ส่วนค่า B จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราการไหลและความเข้มข้นของสารละลาย แต่แนวโน้มไม่ชัดเจนเมื่อเพิ่มความสูงของตัวดูดซับ ดังตารางที่ 2 เมื่อคำนวณค่าเบี่ยงเบนจากสมการของโทมัส พบว่า มีค่าเฉลี่ย  $0.231 \pm 0.026$  หรือคิดเป็นประมาณร้อยละ 23.1 อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาในครั้งนี้กับการศึกษาการดูดซับของโคเรตโดยใช้ฟางข้าวสาเลในคอลัมน์ โดย Zhao *et al.* [6] พบว่า การดูดซับสอดคล้องกับโมเดลการดูดซับของโทมัส แต่จะคลาดเคลื่อนมากในช่วงต้นและช่วงท้ายของการดูดซับ Zhao จึงได้ดัดแปลงสมการของโทมัส (modified dose-response model) เล็กน้อยเพื่อให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลง แต่ทั้งสมการของโทมัสและสมการที่ดัดแปลง ก็สามารถใช้ทำนายการดูดซับของโคเรตได้เช่นกัน ดังนั้น ผลจากสมการของโทมัสในการศึกษาครั้งนี้ จึงสามารถใช้ประมาณค่าความสามารถในการดูดซับของฟอสฟอรัสในน้ำโดยใช้เปลือกเงาะอบแห้งได้เช่นเดียวกันโดยไม่ต้องดัดแปลงสมการ

#### 4. สรุปผลการทดลอง

จากผลการศึกษากำจัดฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยใช้คอลัมน์ดูดซับที่บรรจุเปลือกเงาะอบแห้งบดละเอียดเป็นผง เมื่อพิจารณาจากเวลาเบรคทรู หรือเวลาที่ความสามารถของตัวดูดซับในการดูดซับสารเริ่มหมดไป ถ้าการดูดซับมีเวลาเบรคทรูมากกว่า ก็จะมีเวลาในการดูดซับสารได้มากกว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสารก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย จากการทดลองพบว่า เวลาเบรคทรูเพิ่มขึ้นได้เมื่อลดอัตราการไหลของสารละลายให้ช้าลง เพิ่มความสูงของตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสารละลายไม่สูงจนเกินไป สภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับฟอสฟอรัสด้วยเปลือกเงาะอบแห้ง คือ อัตราการไหลอย่างต่อเนื่อง 5 มิลลิตรต่อนาที บรรจุเปลือกเงาะในคอลัมน์สูง 20 เซนติเมตร สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัสเข้มข้น 25 มิลลิกรัมฟอสฟอรัสต่อลิตร เวลาเบรคทรู จะเท่ากับ 92.5 นาที ความลึกของบริเวณที่มีการถ่ายเทมวล เท่ากับ 12.30 เซนติเมตร นอกจากนี้ การไหลผ่านคอลัมน์ที่บรรจุเปลือกเงาะอบแห้งไม่ได้ทำให้ pH ของน้ำเสียเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด เนื่องจาก pH ของน้ำเสียก่อนและหลังออกจากคอลัมน์มีค่าใกล้เคียงกัน การดูดซับยังมีความสอดคล้องกับโมเดลการดูดซับของโทมัส ซึ่งเป็นโมเดลที่ใช้ประมาณค่าความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับ และใช้ทำนายลักษณะของกราฟเบรคทรู จากผลที่ได้จึงสรุปได้ว่า การใช้เปลือกเงาะอบแห้งเป็นตัวดูดซับฟอสฟอรัสในน้ำเสียโดยการไหลผ่านคอลัมน์อย่างต่อเนื่องสามารถกำจัดฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำเสียที่มีปริมาณฟอสฟอรัสไม่สูงจนเกินไป หากน้ำเสียมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงๆ ควรใช้การกำจัดด้วยวิธีอื่นควบคู่กันไปด้วย แต่ประสิทธิภาพการดูดซับในน้ำเสียจริงอาจแตกต่างจากการทดลองในห้องปฏิบัติการเล็กน้อย เนื่องจากในน้ำเสียมีสารมลพิษหลายชนิดปะปนกันอยู่ ข้อดีอีกประการหนึ่งคือ เปลือกเงาะที่ใช้ดูดซับฟอสฟอรัสแล้ว สามารถไปฝังกลบ หรือผสมกับดินเพื่อเป็นปุ๋ยให้กับต้นไม้ได้ เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารหนึ่งของพืชด้วย

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก และขอขอบคุณ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ สำหรับสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Sibrell, P., Montgomery, G.A., Ritenoura, K.L. and Tuckerb, T.W. 2009. Removal of phosphorus from agricultural wastewaters using adsorption media prepared from acid mine drainage sludge. *Water Research*, 43, 2240 – 2250.
- [2] สำนักงานพาณิชย์จังหวัดจันทบุรี. 2554. โครงการแทรกแซงและส่งเสริมตลาดผลไม้ ปี 2554. แหล่งข้อมูล : [http://www.chanthaburi.go.th/strategy/project\(j3\)/21.doc](http://www.chanthaburi.go.th/strategy/project(j3)/21.doc). ค้นเมื่อวันที่ 15 มีนาคม 2556.
- [3] กุศลภัศ วชิรศิริ, ไศรดา วัลภา, ดำรงชัย สิทธิสำอาง และจิตติชญา สุวรรณทัฬห. 2555. การศึกษาผลของการเสริมใยอาหารจากเปลือกเงาะที่มีต่อคุณภาพของไอศกรีมนม. *วารสารวิทยาศาสตร์การเกษตร*, 43 (2) (พิเศษ), 313 – 316. [Wachirasiri, K., Wanlapa, S., Sithisam-ang, D. and Suwannathup, T. 2012. Effect of rambutan peel dietary fiber supplement on quality of dairy ice cream. *Agricultural Science Journal*, 43 (2) (Suppl.), 313-316. (in Thai)]
- [4] จักรกฤษณ์ คิวะเดชาเทพ. 2557. หน่วยที่ 6 : อุปกรณ์ควบคุมมลพิษชนิดก๊าซและไอ. แหล่งข้อมูล : <http://www.safety-stou.com/UserFiles/File/54114-6.pdf>. ค้นเมื่อวันที่ 22 กันยายน 2557.
- [5] Xu, Z., Cai, J.G., Pan, B.C. 2013. Review: Mathematically modeling fixed-bed adsorption in aqueous systems. *University-Science (Applied Physics & Engineering)*, 14 (3), 155 – 176.
- [6] Zhao, B., Shang, Y., Xiao, W., Dou, C., Han, C. 2014. Adsorption of congo red from solution using cationic surfactant modified wheat straw in column model. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2, 40 – 45.
- [7] มั่นสิน ตันทุลเวศม์ และมันรักษ์ ตันทุลเวศม์. 2551. คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 5. โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ. [Mansin Tanthunwet and Manrak Tanthunwet. 2008. Water quality analysis handbook. Chulalongkorn university printing house. Bangkok.]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้