

# การดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานเรซิน: ผลของอุณหภูมิ

## Adsorption Silver Ion By Chitosan Resin: Effect Of Temperature

อุษณีย์ รัชนีไชยวรรณ ยุพดี กุศลรัตน์กิติวงศ์ โกวิทช์ ปิยะมั่งคลำ

ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการดูดซับไอออนเงินโดยใช้ไคโตซานเรซินเป็นตัวดูดซับ ทำการทดลองแบบแบตช์ ศึกษาผลของอุณหภูมิ พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของไอออนเงินมีผลทำให้ความสามารถในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น ไคโตซานเรซินมีความสามารถในการดูดซับไอออนเงินสูงสุดเท่ากับ 17.7 มิลลิกรัมต่อกรัม การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน มีค่าเท่ากับ 29.9 กิโลจูลต่อโมล การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 94.9 จูลต่อโมล-เคลวิน และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย มีค่าเท่ากับ -306.3 จูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับ Pseudo-second order กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน โดยการแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ

**คำสำคัญ :** การดูดซับ ไอออนเงิน ไคโตซานเรซิน

### Abstract

The chitosan resin was used as adsorbent for the adsorption of silver ion in batch process. The effect of temperature was thoroughly investigated. It was found that increasing temperature of silver ion increased the adsorption capacity. The highest adsorption capacity of the chitosan resin was 17.7 mg/g. The change of enthalpy was endothermic reaction. The thermodynamics study revealed that changes in enthalpy, entropy and Gibbs free energy were 29.9 kJ/mol, 94.9 J/mol-K and -306.3 J/mol, respectively. The Gibbs free energy was negative value, suggesting spontaneity of adsorption process. The pseudo-second order model was fit for describing the kinetics adsorption behavior. The mechanisms of the adsorption occurred in 2 steps. The rate limiting step for mechanism of adsorption was film diffusion.

**Keywords :** Adsorption, Silver ion, Chitosan resin

### 1. บทนำ

เงิน (Silver, Ag) เป็นโลหะมีค่า พบรวมอยู่กับการถลุงแร่จำพวกทองแดง ทอง พลวงหรือสังกะสี มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดเท่ากับ 961.5 และ 2162 องศาเซลเซียส ตามลำดับ มีค่าความร้อนและสภาพนำไฟฟ้าเท่ากับ 429 วัตต์ต่อเมตร-เคลวิน และ  $6.30 \times 10^7$  ซีเมนต่อเมตร ตามลำดับ มีความมันวาว สีขาว สามารถดัดให้โค้งงอ

ได้ นำความร้อนและนำไฟฟ้าได้ดี จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ได้แก่เส้นลวดนำไฟฟ้า อุปกรณ์เชื่อมต่ออิเล็กทรอนิกส์ ตัวเรือนเครื่องประดับ เครื่องใช้ภายในบ้าน และเหรียญ ในขณะที่ตัวสารประกอบเชิงซ้อนเงิน มีการใช้งานในอุตสาหกรรมการผลิตยาฆ่าเชื้อแบคทีเรียในช่องปาก การเคลือบสีกระจกแก้ว การทำฟันเทียม และการผลิตฟิล์มถ่ายภาพ [1]

ประเทศไทยไม่ได้จัดให้เงินอยู่ในกลุ่มของโลหะที่ต้องมีการตรวจสอบก่อนการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ในขณะที่มลรัฐแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา กำหนดให้เงินเป็นสารอันตราย มีการปนเปื้อนอยู่ในน้ำทิ้งได้ไม่มากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร [2]

การดูดซับเป็นวิธีที่มีความเหมาะสมสำหรับการแยกไอออนโลหะ สีย้อม หรือสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย เนื่องจากดำเนินการภายใต้อุณหภูมิและความดันบรรยากาศ ไม่ต้องใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีความยุ่งยากซับซ้อน [3] นอกจากนี้การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับยังสามารถทำได้ง่าย โดยราและยีสต์หลากหลายชนิดสามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับไอออนเงินได้ดี [4]

โคโคซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ที่มีอยู่มากในเปลือกแข็งของกระดองปู เปลือกกุ้งและแกนหมึก ซึ่งเป็นกากเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมห้องเย็น โดยปกติถูกทิ้งเป็นขยะที่ก่อปัญหาเน่าเหม็น [5] ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีความสนใจใช้โคโคซานเรซินดูดซับไอออนเงิน ดำเนินการแบบแบดซ์ ศึกษาผลอุณหภูมิของไอออนเงิน นำผลที่ได้มาอธิบายพารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมี จลนพลศาสตร์และกลไกการดูดซับ

## 2. วิธีการทดลอง

นำเกลือโคโคซาน (บริษัท ซีเฟรช (ประเทศไทย) จำกัด) ปริมาณ 2.0 กรัม ละลายในกรดแอสติก ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยปริมาตร ปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร กวนด้วยเครื่องกวน ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ใช้เวลา 24 ชั่วโมง ได้สารละลายโคโคซาน

นำผงพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ปริมาณ 8.0 กรัม ละลายในน้ำปราศจากไอออนปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร กวนด้วยเครื่องกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว 400 รอบต่อนาที ใช้เวลา 5 ชั่วโมง ได้สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

นำสารละลายโคโคซานผสมกับสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ กวนด้วยเครื่องกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ด้วยความเร็ว 300 รอบต่อนาที ใช้เวลา 6 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่ได้หยดลงในสารละลายโซเดียมไตร

พอลิฟอสเฟตความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ด้วยเครื่องสุบจ่ายสารเคมี แซ่ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำเม็ดโคโคซานผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ไปทำปฏิกิริยากับสารละลายเอทีลินไกลคอลไดโกลซิดีอีเทอร์ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยปริมาตรต่อปริมาตร แซ่ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปตากให้แห้ง ได้โคโคซานเรซินลักษณะเป็นเม็ดสีเหลือง มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.015 เซนติเมตร วัดปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวและขนาดรูพรุนมีค่าเท่ากับ  $3.23 \times 10^{-2}$  ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม  $0.64 \times 10^{-1}$  ตารางเมตรต่อกรัม และ 61.05 นาโนเมตร ตามลำดับ

ซึ่งโคโคซานเรซินปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่เติมสารละลายเงินความเข้มข้นเริ่มต้น 96.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่ความเป็นกรด-เบสเท่ากับ pH 8.0 นำไปเขย่าที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายเงินเป็น 303 - 333 เคลวิน เก็บตัวอย่างไอออนเงินตามช่วงเวลาที่กำหนด จากนั้นนำไอออนเงินไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 328 นาโนเมตร คำนวณหาความสามารถในการดูดซับตามสมการที่ 1

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) V}{W} \quad (1)$$

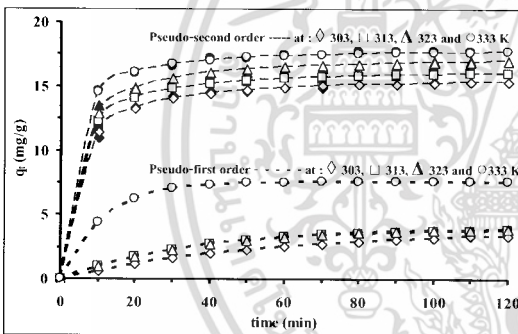
เมื่อ  $q_t$  หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $C_0$  หมายถึงความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนเงิน (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ  $C_t$  หมายถึงความเข้มข้นของไอออนเงินที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $V$  หมายถึงปริมาณของไอออนเงิน (ลิตร) และ  $W$  หมายถึงน้ำหนักโคโคซานเรซิน (กรัม)

## 3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 3.1. ผลอุณหภูมิของสารละลายเงิน

ผลการดูดซับสารละลายเงินความเข้มข้นเริ่มต้น 96.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ของโคโคซานเรซินปริมาณ 0.5 กรัม ที่ความเป็นกรด-เบส เท่ากับ pH 8.0 เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลายเงินที่ 303, 313, 323 และ 333 เคลวิน แสดง

ในรูปที่ 1 พบว่าในช่วง 10 นาทีแรกไคโตซานเรซินมีความสามารถในการดูดซับไอออนเงินเท่ากับ 10.9, 11.9, 13.5 และ 14.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 60 นาที มีความสามารถในการดูดซับไอออนเงินเท่ากับ 14.9, 15.6, 16.5 และ 17.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ไคโตซานเรซินมีอัตราการดูดซับไอออนเงินได้มากในช่วงแรก เนื่องมาจากพื้นที่บริเวณผิวของไคโตซานเรซินมีหมู่ฟังก์ชัน (Active site) และมีตำแหน่งที่ว่างซึ่งสามารถดูดซับกับไอออนเงินได้ในปริมาณมาก จึงสามารถดูดซับไอออนเงินได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นอัตราการดูดซับไอออนเงินเกิดได้ช้าลง ๆ เนื่องจากพื้นที่บริเวณผิวและตำแหน่งที่ว่างของไคโตซานเรซินถูกปกคลุมด้วยไอออนเงิน จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลของการดูดซับ ซึ่งไคโตซานเรซินไม่มีพื้นที่บริเวณผิวและไม่มีตำแหน่งที่ว่างสำหรับการดูดซับไอออนเงิน [6]

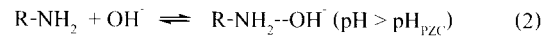


รูปที่ 1 ความสามารถในการดูดซับจากการทดลองที่อุณหภูมิ: ◆ 303, ■ 313, ▲ 323 และ ● 333 เคลวิน

ที่สภาวะสมดุล การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสารละลายเงินจาก 303 - 333 เคลวิน เป็นผลทำให้ความสามารถในการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจาก 14.9 - 17.7 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงอัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเกิดได้เร็วขึ้น [7] เป็นผลทำให้ตัวถูกดูดซับสามารถจับกับบริเวณที่ว่างของตัวดูดซับได้มากขึ้น นอกจากนี้ตัวถูกดูดซับยังแทรกซึมเข้าไปภายในรูพรุนของตัวดูดซับได้มากขึ้น [8]

ความเป็นกรด-เบส ของไอออนเงินที่ pH 8.0 พบว่าไคโตซานเรซินสามารถดูดซับไอออนเงินได้ เนื่องจากประจุที่ผิวของไคโตซานเรซินมีค่าเป็นลบ ( $pH_{PZC}$  ไคโตซานเรซิน

มีค่าเท่ากับ pH 6.7) เกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic attraction) ระหว่างไอออนเงินที่มีประจุบวก ( $Ag^+$ ) กับไคโตซานเรซินที่ถูกดีโพรโตนเนต ( $R-NH_2-OH^-$ ) ให้มีประจุเป็นลบ [9] ดังนั้นไคโตซานเรซินจึงดูดซับไอออนเงินได้เป็นอย่างดี เขียนได้ดังสมการที่ 2 - 3



### 3.2. พารามิเตอร์ทางเทอร์โมเคมี

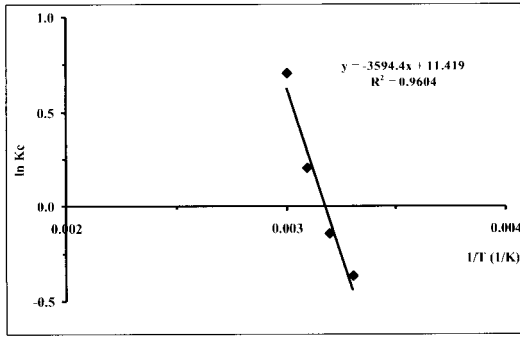
ตัวแปรทางเทอร์โมเคมี ได้แก่การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ( $\Delta H^\circ$ ) การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี ( $\Delta S^\circ$ ) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ ( $\Delta G^\circ$ ) สามารถหาได้จากสมการ 4 และ 5 ตามลำดับ

$$\ln \frac{q_2}{C_2} - \ln K_c = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{RT} \quad (4)$$

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad (5)$$

เมื่อ  $\Delta H^\circ$  หมายถึงการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี (จูลต่อโมล)  $\Delta S^\circ$  หมายถึงการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี (จูลต่อโมล-เคลวิน)  $\Delta G^\circ$  หมายถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์ (จูลต่อโมล) R หมายถึงค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 จูลต่อโมล-เคลวิน) และ T หมายถึงอุณหภูมิ (เคลวิน)

นำผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 303-333 เคลวิน ของการดูดซับไอออนเงินมาพลอตกราฟระหว่าง  $\ln K_c$  กับ  $1/T$  ดังแสดงในรูปที่ 2 พบว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเป็นปฏิกิริยาคูลความร้อนมีค่าเท่ากับ 29.9 กิโลจูลต่อโมล Wu [10] อธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีน้อยกว่า 40 กิโลจูลต่อโมล เป็นการดูดซับทางกายภาพ การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเท่ากับ 94.9 จูลต่อโมล-เคลวิน การเปลี่ยนแปลงเอนโทรปีมีค่าเป็นบวก แสดงว่า Degree of freedom เพิ่มขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อของแข็ง-ของเหลว ในระหว่างการดูดซับไอออนเงินบนไคโตซานเรซิน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย มีค่าเท่ากับ -306.3 จูลต่อโมล ดังนั้นจึงลงความเห็นว่าไคโตซานเรซินดูดซับไอออนเงินเกิดขึ้นโดยกระบวนการทางกายภาพ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นเองได้



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln K_c$  กับ  $1/T$

3.3. จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนเงินของโคโคซานเรซินใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และ Pseudo-second order โดยสมการเส้นตรงของ Pseudo-first order เขียนได้ดังสมการที่ 6

$$\text{Log}(q_c - q_t) = \text{Log} q_c - \frac{k_1 t}{2.303} \tag{6}$$

เมื่อ  $q_c$  หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $k_1$  หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ  $t$  หมายถึงเวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

สมการเส้นตรง Pseudo-second order เขียนดังสมการที่ 7

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_c^2} + \frac{t}{q_c} \tag{7}$$

เมื่อ  $k_2$  หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

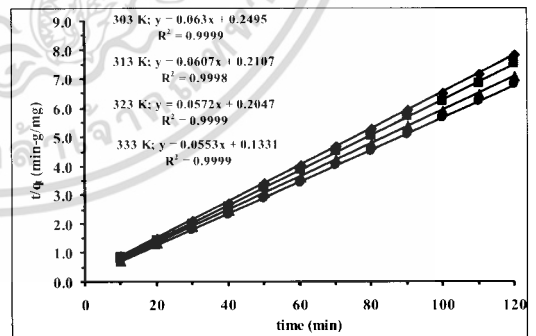
ผลการดูดซับไอออนเงินเขียนตามสมการเส้นตรง Pseudo-first order ที่อุณหภูมิ 303, 313, 323 และ 333 เคลวิน มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.8666, 0.9205, 0.9641 และ 0.9433 ตามลำดับ (ไม่ได้นำเสนอกราฟ) ค่าคงที่  $k_1$  และค่า  $q_{c,cal}$  แสดงในตารางที่ 1 ในขณะที่สมการเส้นตรง Pseudo-second order แสดงในรูปที่ 3 พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9999, 0.9998, 0.9999 และ 0.9999 ตามลำดับ ค่าคงที่  $k_2$  และ ค่า  $q_{c,cal}$  แสดงในตารางที่ 1 ความถูกต้องของจลนพลศาสตร์การดูดซับพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ความสามารถในการดูดซับเปรียบเทียบจากผลการทดลองและผลจากการ

คำนวณ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเขียนได้ดังสมการที่ 8

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum \left[ \frac{(q_{t,exp} - q_{t,cal})^2}{q_{t,exp}} \right]}{n-1}} \tag{8}$$

เมื่อ S.D. หมายถึงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)  $q_{t,exp}$  หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่เป็นผลจากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $q_{t,cal}$  หมายถึงความสามารถในการดูดซับที่เป็นผลจากการคำนวณ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ  $n$  หมายถึงจำนวนจุดของข้อมูล

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากสมการ Pseudo-second order มีความเป็นเส้นตรงมากกว่าสมการ Pseudo-first order ความสามารถในการดูดซับที่คำนวณจากสมการ Pseudo-second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าคำนวณจากสมการ Pseudo-first order นอกจากนี้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมการ Pseudo-second order มีค่าน้อยกว่าสมการ Pseudo-first order ดังนั้นการดูดซับไอออนเงินของโคโคซานเรซินเป็นไปตามสมการ Pseudo-second order สอดคล้องกับการดูดซับไอออนทอง (III) แพลตินัม (IV) และแพลเลเดียม (II) โดยโคโคซานเชื่อมขวางเรซิน [11]



รูปที่ 3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ Pseudo-second order ที่อุณหภูมิ: ♦ 303, ■ 313, ▲ 323 และ ● 333 เคลวิน

การคำนวณความสามารถในการดูดซับโดยใช้ค่าคงที่อัตราเร็วของสมการ Pseudo-first order และ Pseudo-second order เขียนได้ดังสมการที่ 9 และ 10 ตามลำดับ

$$q_t = q_c(1 - e^{-k_1 t}) \tag{9}$$

$$q_t = \frac{tk_2q_c^2}{1 + tk_2q_c} \quad (10)$$

ผลการทำนายความสามารถในการดูดซับ ที่อุณหภูมิ 303-333 เคลวิน แสดงในรูปที่ 1 พบว่าความสามารถในการดูดซับที่ทำนายได้จากสมการ Pseudo-second order มีความใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าทำนายจากสมการ Pseudo-first order

**3.4. กลไกการดูดซับ**

กลไกการดูดซับไอออนเงินของไคโตซานเรซิน ศึกษาจากสมการ Intraparticle diffusion ดังแสดงในสมการที่ 11

$$q_t = k_p t^{1/2} \quad (11)$$

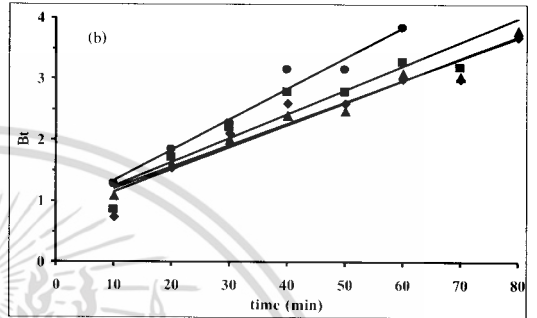
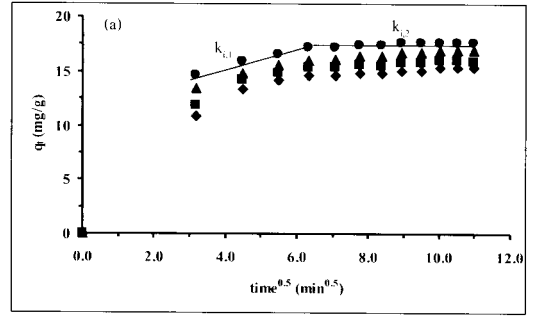
เมื่อ  $k_p$  หมายถึงค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่ของไอออนเงินเข้าไปภายในรูพรุนไคโตซานเรซิน (มิลลิกรัมต่อกรัม-นาที<sup>0.5</sup>)

นำข้อมูลการศึกษาผลอุณหภูมิของสารละลายเงิน มาเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_t$  กับ  $t^{1/2}$  ได้เส้นกราฟดังแสดงในรูปที่ 4 (a) พบว่ามีค่าความชันสองค่า สามารถหาเป็นค่า  $k_p$  ดังแสดงในตารางที่ 1 Oubagaranadin และคณะ [12] อธิบายค่าความชันของ  $k_p$  ดังนี้ ในขั้นตอนแรกเกิดขึ้นรวดเร็วมากภายในเวลา 10 นาที จากนั้นเป็นขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของไคโตซานเรซิน ซึ่งเกิดอยู่ในช่วงเวลา 20 - 60 นาที และขั้นตอนสุดท้ายเป็นสมดุลการดูดซับเกิดขึ้นภายหลังจากช่วงเวลา 60 นาทีเป็นต้นไป ดังแสดงในตารางที่ 1

ผลการดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานเรซินนำมาวิเคราะห์อีกครั้ง เพื่อหาขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ (Rate limiting step) เขียนได้ดังสมการที่ 12

$$Bt = -0.4977 - \ln \left( 1 - \frac{q_t}{q_c} \right) \quad (12)$$

นำค่า  $Bt$  มาเขียนความสัมพันธ์กับเวลา ( $t$ ) ลักษณะ



รูปที่ 4 กลไกการดูดซับไอออนเงินของไคโตซานเรซิน: ที่อุณหภูมิ  $\diamond$  303,  $\blacksquare$  313,  $\blacktriangle$  323 และ  $\bullet$  333 เคลวิน: (a) Intraparticle diffusion และ (b) Rate limiting step

ของเส้นตรง สามารถจำแนกขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ ระหว่างการแพร่ที่ผิว (Film diffusion) และการแพร่ภายในอนุภาค (Particle diffusion) ดังนี้ กรณีที่เป็นเส้นตรงและผ่านจุดกำเนิด อธิบายว่าการแพร่ภายในอนุภาคเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ เมื่อการเขียนความสัมพันธ์ดังกล่าวเกิดในลักษณะตรงกันข้าม อธิบายว่าการแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ [13]

ขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4 (b) พบว่าเส้นที่ได้ไม่มีลักษณะเป็นเส้นตรงและไม่ผ่านจุดกำเนิด อธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนเงินโดยไคโตซานเรซิน การแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วการดูดซับ

**ตารางที่ 1** ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง-อันดับสอง และค่าคงที่อัตราเร็วการแพร่

Temp (K)	$q_c$	Pseudo-first order				Pseudo-second order				$k_p$	
		$q_{c,cal}$	$k_1$	$R^2$	S.D.	$q_{c,cal}$	$k_2$	$R^2$	S.D.	$k_{p,1}$	$k_{p,2}$
303	14.9	3.8	0.018	0.8666	0.838	15.9	0.016	0.9999	0.014	3.07	0.31
313	15.6	3.9	0.029	0.9205	0.807	16.5	0.018	0.9998	0.011	3.28	0.34
323	16.5	4.1	0.027	0.9641	0.816	17.5	0.016	0.9999	0.041	3.50	0.31
333	17.7	7.6	0.086	0.9433	0.587	18.1	0.023	0.9999	0.006	3.76	0.45

#### 4. สรุป

การใช้ไคโตซานเรซินดูดซับไอออนเงิน พบว่าที่อุณหภูมิ 333 เคลวิน มีความสามารถในการดูดซับดีที่สุดเท่ากับ 17.7 มิลลิกรัมต่อกรัม เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดทางไฟฟ้าสถิตระหว่างตัวดูดซับกับตัวดูดซับที่ถูกดีโพรโตน การเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน มีค่าเท่ากับ 29.9 กิโลจูลต่อโมล การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของกิบส์เฉลี่ย มีค่าเท่ากับ -306.3 จูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสามารถเกิดขึ้นเองได้ จลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับ Pseudo-second order กลไกการดูดซับเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน การแพร่ที่ผิวเป็นขั้นตอนการจำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนสนับสนุนจาก คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T.W. Purcell and J.J. Peters, "Sources of silver in the environment," *Environment Toxicology and Chemistry*, Vol. 17, pp. 539-546, 1998.
- [2] C. Songkroah, W. Nakbanpote and P. Thiravetyan, "Recovery of silver-thiosulphate complexes with chitin," *Process Biochemistry*, Vol. 39, pp. 1553-1559, 2004.
- [3] W. Sripakdee and K. Piyamongkala, "Equilibrium chromium(VI) adsorption from electroplating wastewater by crosslinked chitosan resin," *The Journal of Applied Science*, Vol. 8, No.2, pp. 6-21, 2009.
- [4] N. Das "Recovery of precious metals through biosorption," *Hydrometallurgy* Vol. 103, pp. 180-189, 2010.
- [5] N. Ruengrong, M. Taewsub and K. Piyamongkala, "Adsorption direct blue 86 dye by chitosan and rice husk," *Ladkrabang Engineering Journal*, Vol. 31, No. 3, pp. 55-60, 2014.
- [6] V. Kittithawornkul, S. Aoonpoontarik and K. Piyamongkala, "Adsorption of cutting oil by synthetic acid soil," *The Journal of KMUTNB*, Vol. 20, No. 2, pp. 266-277, 2010.
- [7] J.W. Moore, W.G. Davies and R.W. Collins, *Chemistry*, McGraw-Hill, 1978.
- [8] R. Suttanan and K. Piyamongkala, "Kinetics and thermodynamics of adsorption methylene blue by groundnut shell," *KMUTT Research and Development Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 751-763, 2008.
- [9] L. Jin and R. Bai, "Mechanisms of lead adsorption on chitosan/PVA hydrogel beads," *Langmuir*, Vol. 18, pp. 9765-9770, 2002.
- [10] C. H. Wu, "Adsorption of reactive dye onto carbon nanotubes: Equilibrium, kinetics and thermodynamics," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 144, pp. 93-100, 2007.
- [11] A. Ramesh, H. Hasegawa, W. Sugimoto, T. Maki and K. Ueda, "Adsorption of gold(III), platinum(IV) and palladium(II) onto glycine modified crosslinked chitosan resin," *Bioresource Technology*, Vol. 99, pp. 3801-3809, 2008.
- [12] J.U.K. Oubagaranadin, N. Sathyamurthy and Z.V.P. Murthy, "Evaluation of fuller's earth for the adsorption of mercury from aqueous solutions: A comparative study with activated carbon," *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 142, pp. 165-174, 2007.
- [13] D. Mohan and K.P. Singh, "Single-and multi-component adsorption of cadmium and zinc using activated carbon derived from bagasse-an agricultural waste," *Water Research*, Vol. 36, pp. 2304-2318, 2002.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้