

บทที่ 4

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะทรานสิชันบางตัว ได้แก่ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ กับ TEDA บนถ่านกัมมันต์ เพื่อนำไปหาไอโซเทอร์มการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิดที่จะใช้ในกระบวนการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ และได้ศึกษาวิธีการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยไอออนโลหะ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ กับ TEDA ผสมพร้อมกันทุกตัว เพื่อหาวิธีที่จะได้ประสิทธิภาพการเคลือบผิวสูงสุด และวิเคราะห์หาปริมาณโลหะที่เคลือบผิวถ่านกัมมันต์อยู่จริง

4.1 การเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนและการหาค่าความยาวคลื่นที่เหมาะสม

การทดลองในขั้นแรกได้ทำการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนโลหะทรานสิชันบางตัวกับไตรเอทิลีนไดอะมีน ในสารละลายบัฟเฟอร์กรดอะซิติก - อะซิเตท pH 4 เนื่องจากเป็นสถานะที่สารประกอบเชิงซ้อนแต่ละตัวเกิดได้ดีที่สุด²⁵ จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า อัตราส่วนโดยโมลของการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไอออนของโลหะ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ กับ TEDA เป็น 1:2 แต่ในการเตรียมจะใช้ปริมาณไอออนโลหะเป็นตัวกำหนดปริมาณ และใช้ปริมาณของ TEDA ที่มากเกินไป คือใช้ TEDA เป็นสี่เท่าของไอออนโลหะ เนื่องจากต้องการให้ไอออนโลหะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนอย่างสมบูรณ์ จากนั้นได้ทำการเตรียมสารละลายของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้เครื่อง UV - VIS spectrophotometer เพื่อหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่จะใช้ในการทดลองต่อไป

(ก) สารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA

จากรูป 3.1 พบว่าสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA จะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงความยาวคลื่นแสงยูวีและคลื่นแสงวิสิเบิล เมื่อเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเข้มข้น 1.00×10^{-3} ถึง 1.20×10^{-2} M แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ทั้งสองช่วงความยาวคลื่น จากรูป 3.3 และ 3.4 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) จะไม่แน่นอนที่ทั้งสองช่วงความยาวคลื่น จึงได้เลือกความยาวคลื่นที่เหมาะสม ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นที่มีแนวโน้มทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นเส้นตรง จากการทดลองพบว่า ที่ความยาวคลื่น 285 และ 770 nm เป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสม โดยที่ทั้งสองความยาวคลื่นจะให้กราฟเป็นเส้นตรง จากนั้นได้สร้างกราฟมาตรฐานของสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA ที่

ความยาวคลื่น 285 และ 770 nm ตามลำดับ ดังผลในตาราง 3.1 - 3.2 และรูป 3.5 - 3.6 ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้ทำการทดลองทั้งสองช่วงความยาวคลื่น เพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลการทดลองที่ได้ต่อไป

(ข) สารประกอบเชิงซ้อน Cr^{3+} - TEDA

จากรูป 3.8 เป็นผลการทดลองการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารประกอบเชิงซ้อน Cr^{3+} - TEDA โดยเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเข้มข้น 1.00×10^{-3} ถึง 1.20×10^{-2} M แล้วนำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300 - 750 nm พบว่าพีคของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ค่าความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน จึงเลือกความยาวคลื่นเดียวที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนเป็นเส้นตรง จากการทดลองพบว่า ที่ความยาวคลื่น 570 nm จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง จึงเลือกใช้ความยาวคลื่นดังกล่าว ในการสร้างกราฟมาตรฐานการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Cr^{3+} - TEDA ดังตาราง 3.3 และรูป 3.9

(ค) สารประกอบเชิงซ้อน Ag^+ - TEDA

จากรูป 3.11 เป็นผลการทดลองการหาความยาวคลื่นที่เหมาะสมของสารประกอบเชิงซ้อน Ag^+ - TEDA โดยการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนที่มีความเข้มข้นระหว่าง 1.00×10^{-5} ถึง 5.00×10^{-5} M นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 200 - 300 nm แต่เนื่องจากสารละลาย Ag^+ สารละลาย TEDA และสารละลายบัฟเฟอร์กรดอะซิติก - อะซีเตท pH 4 มีค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Ag^+ - TEDA จะต้องใช้ blank เพื่อลบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย TEDA และสารละลายบัฟเฟอร์กรดอะซิติก - อะซีเตท pH 4 ด้วย จากรูป 3.11 จะเห็นว่าค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดจะเลื่อน (shift) ไปเรื่อย ๆ ตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น จึงเลือกความยาวคลื่นเพียงค่าเดียวที่ทำให้แนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนเป็นเส้นตรง พบว่าที่ความยาวคลื่น 210 nm จะให้กราฟที่เป็นเส้นตรง จึงเลือกใช้ความยาวคลื่นดังกล่าวเป็นความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Ag^+ - TEDA และในการสร้างกราฟมาตรฐานการดูดกลืนแสง ได้ผลดังตาราง 3.4 และรูป 3.12

4.2 การหาปริมาณการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนบนถ่านกัมมันต์

ในการศึกษาปริมาณการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะทรานสิชันบางตัว ได้แก่ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ กับลิแกนด์ TEDA บนถ่านกัมมันต์ เริ่มจากการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละตัวที่ความเข้มข้นที่จะศึกษา จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม

แล้วปีเปตสารละลายสารประกอบเชิงซ้อนมาความเข้มข้นละ 20 ml เดิมถ่านกัมมันต์ลงไป 0.1 กรัม นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ปรับอุณหภูมิเป็น 25 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดสมดุลของการดูดซับ และเกิดการดูดซับอย่างสมบูรณ์บนถ่านกัมมันต์ แล้วกรองเอาถ่านกัมมันต์ออก ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นที่เหมาะสม ผลต่างของค่าการดูดกลืนแสงก่อนและหลังเติมถ่านกัมมันต์ จะเป็นค่าการดูดกลืนแสงที่ถูกถ่านกัมมันต์ดูดซับไว้ เมื่อนำไปเทียบกับกราฟมาตรฐานการดูดกลืนแสง ก็จะได้จำนวนโมลที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ จากนั้นศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการของแลงเมียร์และฟรอยด์ลิค ซึ่งเป็นไอโซเทอร์มที่ใช้ศึกษาการดูดซับในสารละลายโดยทั่วไป³⁹ เพื่อพิจารณาว่าจะเป็นไอโซเทอร์มการดูดซับแบบใด

(ก) สารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA

จากรูป 3.13 เป็นการพล็อตกราฟระหว่างจำนวนโมลของสารประกอบเชิงซ้อนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่เหลือ จะได้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบชั้นเดียว คือ ปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรก และจะคงที่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น⁴⁰ ซึ่งพบว่าเป็นผลที่สอดคล้องกันทั้งสองความยาวคลื่น แต่ที่ความยาวคลื่น 285 nm จะให้กราฟที่เป็นไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ที่ดีกว่า เนื่องจากผลของความไว (sensitivity) ในการวัดที่ความยาวคลื่นดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามปริมาณสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA ที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ มีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน คือ 0.82 mmol และ 1.0 mmol ที่ความยาวคลื่น 285 nm และ 770 nm ตามลำดับ ถ้าคิดเป็นร้อยละของโลหะที่ถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์จะมีค่าประมาณ 5.21 และ 6.35% โดยมวล ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับร้อยละของโลหะที่มีอยู่ในถ่านกัมมันต์เคลือบผิวจากหน้ากากป้องกันแก๊สพิษในตาราง 1.2 พอสมควร จากลักษณะของไอโซเทอร์มที่ได้ดังรูป 3.13 แสดงให้เห็นว่า การดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA มีแนวโน้มจะเป็นแบบแลงเมียร์ เพื่อยืนยันผลการทดลองดังกล่าว ได้พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA ที่เหลือจากการดูดซับต่อจำนวนโมลที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ $[C/Y]$ และความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เหลือจากการดูดซับ $[C]$ ของการทดลองทั้งสองชุดคือ ที่ความยาวคลื่น 285 และ 770 nm ตามลำดับ ดังรูป 3.14 พบว่า ได้กราฟเป็นเส้นตรงตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ เมื่อหาความชันของกราฟตามสมการของแลงเมียร์ จะได้เท่ากับ 7.34×10^2 g/mol และ 7.14×10^2 g/mol ตามลำดับ ซึ่งสวนกลับของความชันจะเป็นค่าที่บอกถึงจำนวนโมลของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง Cu^{2+} กับ TEDA ที่คลุมผิวแบบชั้นเดียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.36 mmol/g และ 1.40 mmol/g ที่ความยาวคลื่น 285 และ

770 nm ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกับปริมาณการดูดซับเฉลี่ยที่หาได้จากไฮโซเทอร์มในรูป 3.13 ส่วนจุดตัดแกน $[C/Y]$ เท่ากับ 6.00 และ 4.20 ซึ่งสามารถนำไปหาค่า k ได้เท่ากับ 122 และ 170 ที่ความยาวคลื่น 285 และ 770 nm ตามลำดับ โดยที่ค่า k จากสมการของแลงเมียร์จะเป็นค่าคงที่เฉพาะที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ เท่านั้น⁴¹

(ข) สารประกอบเชิงซ้อน Cr^{3+} - TEDA

จากรูป 3.16 เป็นการพล็อตกราฟระหว่างจำนวนโมลของสารประกอบเชิงซ้อน Cr^{3+} - TEDA ที่ถูกดูดซับ $[Y]$ กับความเข้มข้นของสารประกอบเชิงซ้อนที่เหลือ จะได้กราฟเป็นเส้นตรงมีความชันในตอนแรกและจะคงที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้น ลักษณะไฮโซเทอร์มที่ได้คล้ายกับกรณีของ Cu^{2+} - TEDA แสดงว่าเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียวเช่นกัน และปริมาณการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อนต่อกรัมของถ่านกัมมันต์มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.61 mmol หรือถ้าคิดเป็นร้อยละโลหะโครเมียมที่ถูกดูดซับเท่ากับ 3.17% โดยมวล ซึ่งใกล้เคียงกับปริมาณโลหะโครเมียมที่เคลือบผิวถ่านกัมมันต์ในหน้ากากป้องกันแก๊สพิษจากตาราง 1.2 พอสมควร เมื่อพล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นสารละลายของสารประกอบเชิงซ้อน Cr^{3+} - TEDA ที่เหลือจากการดูดซับต่อจำนวนโมลที่ถูกดูดซับต่อกรัมถ่านกัมมันต์ $[C/Y]$ และความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เหลือจากการดูดซับ $[C]$ ดังรูป 3.17 จะได้กราฟเป็นเส้นตรงตามสมการของแลงเมียร์ มีความชันเท่ากับ 1.40×10^3 g/mol โดยค่าส่วนกลับของความชันจะบอกถึงจำนวนโมลสารประกอบเชิงซ้อนที่คลุมผิวแบบชั้นเดียวมีค่า 0.71 mmol/g ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณการดูดซับเฉลี่ยที่หาได้จากไฮโซเทอร์มในรูป 3.16 สำหรับจุดตัดแกน $[C/Y]$ มีค่า 4.40 นำไปหาค่า k ได้เท่ากับ 318

(ค) สารประกอบเชิงซ้อน Ag^+ - TEDA

จากรูป 3.19 เป็นการพล็อตกราฟระหว่างจำนวนโมลของสารประกอบเชิงซ้อน Ag^+ - TEDA ที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์กับความเข้มข้นที่เหลือ จะได้ไฮโซเทอร์มการดูดซับเป็นชั้นเดียวอิมิตัวโดยมีปริมาณการดูดซับเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.81×10^{-5} mol/g หรือคิดเป็น 0.20% โดยมวล ซึ่งมากกว่าปริมาณ Ag^+ ที่เคลือบผิวถ่านกัมมันต์ในหน้ากากป้องกันแก๊สพิษจากตาราง 1.2 เมื่อพล็อตระหว่างความเข้มข้นสารละลายสารประกอบเชิงซ้อน Ag^+ - TEDA ที่เหลือจากการดูดซับต่อจำนวนโมลที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ $[C/Y]$ กับความเข้มข้นของสารละลายสารประกอบเชิงซ้อนที่เหลือจากการดูดซับ $[C]$ ดังรูป 3.20 จะได้กราฟเป็นเส้นตรงตามสมการของแลงเมียร์ มีความชันเท่ากับ 5.40×10^4 mol/g โดยค่าส่วนกลับของความชันจะบอกถึงจำนวนโมลสารประกอบเชิงซ้อนที่คลุมผิวแบบชั้นเดียวมีค่า 1.85×10^{-5} mol/g ซึ่งเป็นค่าที่ใกล้เคียง

กับปริมาณที่ถูกดูดซับที่ได้จากไอโซเทอร์มในรูป 3.19 สำหรับจุดตัดแกน $[C/Y]$ มีค่า 0.17 นำไปหาค่า k ได้เท่ากับ 3.18×10^5

เพื่อให้แน่ใจว่า การดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนทุกตัวข้างต้น เป็นการดูดซับตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ จึงได้ตรวจสอบไอโซเทอร์มแบบฟรอยดิลิค โดยพล็อตกราฟระหว่างค่าลอการิทึมของจำนวนโมลประกอบเชิงซ้อนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ $[\log Y]$ กับค่าความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เหลือจากการดูดซับ $[\log C]$ ของสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA, Cr^{3+} - TEDA และ Ag^+ - TEDA ดังรูป 3.15, 3.18 และ 3.21 ตามลำดับ และจะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ แต่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น จะเกิดการเปลี่ยนความชันของเส้นตรง แสดงว่าพฤติกรรมของการดูดซับที่เกิดขึ้น จะไม่เป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบฟรอยดิลิคอย่างแน่นอน

จากการศึกษาการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อนของไอออนโลหะ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ กับ TEDA บนถ่านกัมมันต์ พบว่าการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อนทุกตัวจะเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ แต่ไม่เป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบฟรอยดิลิค เพราะหาปริมาณการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนแรก และจะคงที่เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น มีปริมาณการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียว อิมิตัวตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ แต่จากสมการของฟรอยดิลิค จะไม่สามารถหาปริมาณการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียวอิมิตัวได้ สามารถพิจารณาเปรียบเทียบได้ดังนี้⁴²

$$\text{ไอโซเทอร์มแบบฟรอยดิลิค} \quad Y = kC^{1/n} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์} \quad C/Y = 1/kW_m + C/W_m \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{เมื่อจัดรูปสมการ (2) ใหม่ จะได้} \quad Y = \frac{kW_m C}{1 + kC} \quad \dots\dots\dots(3)$$

จากสมการ (3) จะเห็นว่า ถ้า C เข้าใกล้ศูนย์ จะทำให้เทอม $1 + kC$ มีค่าเท่ากับ 1

$$\text{ดังนั้น} \quad Y = kW_m C \quad \dots\dots\dots(4)$$

จากสมการ (1) ถ้า n มีค่าเท่ากับ 1 จะได้

$$Y = kC \quad \dots\dots\dots(5)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (4) เปรียบเทียบกับสมการ (5) จะเห็นได้ว่าการดูดซับจะเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบฟรอยดิลิคที่มีการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียวอิมิตัวได้ ความเข้มข้นจะต้องต่ำมาก ๆ และ n จากสมการของฟรอยดิลิค ต้องมีค่าเท่ากับ 1 เท่านั้น แต่ผลจากการทดลองที่ได้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว ดังนั้นการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อนทุกตัวบนถ่านกัมมันต์ จึงเป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์เท่านั้น ไม่เป็นไปตามไอโซเทอร์มแบบฟรอยดิลิค

4.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนบนถ่านกัมมันต์

จากการทดลองที่ผ่านมาเป็นการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ประมาณ 25°C ในการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับนี้ จะใช้เครื่องเขย่าที่ปรับอุณหภูมิได้ เพื่อปรับอุณหภูมิให้เป็น 20, 25, 30, 40, 60 และ 80°C แล้วเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายก่อน และหลังการดูดซับ นำค่าผลต่างค่าการดูดกลืนแสงไปเทียบหาจำนวนโมลสารประกอบเชิงซ้อนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์โดยใช้กราฟมาตรฐาน จากตาราง 3.16 - 3.18 และรูป 3.22 จะได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้จำนวนโมลสารประกอบเชิงซ้อนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของถ่านกัมมันต์มีแนวโน้มลดลงในสารประกอบของโลหะทุกตัวกับ TEDA โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูงขึ้นมาก ๆ เช่น $60 - 80^{\circ}\text{C}$ เป็นต้น จะเห็นค่าการลดลงชัดเจน แต่ในช่วงอุณหภูมิห้อง ปริมาณการดูดซับจะไม่แตกต่างกันมากนักจนเรียกได้ว่าเกือบคงที่ แสดงว่าการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} -TEDA, Cr^{3+} -TEDA และ Ag^{+} -TEDA บนถ่านกัมมันต์ เป็นการดูดซับประเภทคายความร้อน นั่นคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับมีแนวโน้มลดลง จากการพล็อตกราฟระหว่างค่าลอการิทึมธรรมชาติของความเข้มข้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เหลือจากการดูดซับ $[\ln C]$ กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ $[1/T]$ ตามสมการของเคลาเซียส – แคลปัยอง ดังรูป 3.23 – 3.25 พบว่า ความชันที่ได้มีค่าเท่ากับ 85, 64 และ 400 K ตามลำดับ ซึ่งนำไปหาความร้อนของการดูดซับ (ΔH_{ads}) ได้เท่ากับ -0.71, -0.53 และ -3.32 kJ/mol ตามลำดับ จากผลที่ได้สอดคล้องกับรูป 3.22 นั่นคือ ΔH_{ads} ที่ได้มีค่าเป็นลบ เป็นการดูดซับแบบคายความร้อน⁴³ และค่าความร้อนของการดูดซับมีค่าต่ำกว่า 20 kJ/mol แสดงให้เห็นว่าการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวบนถ่านกัมมันต์ เป็นการดูดซับทางกายภาพ

จากตาราง 3.20 และรูป 3.22 พบว่าปริมาณการดูดซับของสารละลายสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} -TEDA > Cr^{3+} -TEDA > Ag^{+} -TEDA เมื่อพิจารณาขนาดไอออนกับการดูดซับ จะได้ว่าโดยทั่วไปไอออนที่มีขนาดใหญ่ จะสามารถเกิดการดูดซับได้ดีกว่าไอออนขนาดเล็ก¹⁰ เนื่องจากไอออนที่มีขนาดใหญ่จะถูกล้อมรอบด้วยน้ำ (hydrated) ได้น้อยกว่าไอออนที่มีขนาดเล็ก การเกิด hydration จะบดบัง (shield) การดูดซับของไอออนเนื่องจากโมเลกุลของน้ำที่มาล้อมรอบ ทั้งนี้รัศมีไอออน (ionic radius) ของ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^{+} มีค่าเท่ากับ 71, 75.5 และ 114 พิโคเมตร⁴⁴ ตามลำดับ ดังนั้นลำดับการดูดซับไอออนโลหะบนถ่านกัมมันต์น่าจะเป็นดังนี้ Ag^{+} > Cr^{3+} > Cu^{2+} แต่ในการทดลองนี้ ไอออนโลหะจะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ TEDA ก่อนที่จะถูกดูดซับ และ TEDA เป็นลิแกนด์ที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้น ทำให้ไอออนโลหะ Cu^{2+} และ Cr^{3+} ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า Ag^{+} เมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับ TEDA ที่มีขนาดใหญ่ได้ดี ทำให้ Cu^{2+} -TEDA และ Cr^{3+} -TEDA จะถูกดูดซับได้ดีกว่า Ag^{+} -TEDA เพราะขนาดโมเลกุลจะเล็กกว่า และเนื่องจาก Cu^{2+} เกิดสาร

ประกอบเชิงซ้อนกับ TEDA ได้ดีกว่า Cr^{3+} จึงทำให้สารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA ถูกดูดซับได้ดีที่สุด ผลจากการทดลอง พบว่าปริมาณการดูดซับของสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA , Cr^{3+} - TEDA และ Ag^+ - TEDA มีค่าประมาณ 1.0 mmol/g , 0.61 mmol/g และ 18 $\mu\text{mol/g}$ ตามลำดับ ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างน้อย เนื่องจากสารประกอบเชิงซ้อนเป็นคีเลตซึ่งโมเลกุลมีขนาดใหญ่ ทำให้ผ่านกัมมันต์ซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็กมากโดยเฉลี่ยประมาณ 8 – 20 Å⁴⁵ มีพื้นที่ผิวและรูพรุนไม่เพียงพอที่จะดูดซับโมเลกุลใหญ่ ๆ จากโครงสร้างสารประกอบเชิงซ้อนได้ และเนื่องจากในการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนจะใช้ปริมาณ TEDA ที่มากเกินไป ซึ่งปริมาณ TEDA ที่ไม่ได้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนโลหะ สามารถที่จะถูกดูดซับโดยผ่านกัมมันต์ได้ ทำให้พื้นที่ผิวของผ่านกัมมันต์ลดลง จึงอาจทำให้ปริมาณการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนน้อยกว่าความเป็นจริงได้ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นตามสมการของแลงเมียร์ สามารถเรียงลำดับความเข้มข้นจากน้อยไปมากได้ดังนี้คือ Cu^{2+} - TEDA < Cr^{3+} - TEDA < Ag^+ - TEDA ซึ่งถ้าค่าความเข้มข้นต่ำ การดูดซับจะเกิดได้ดี⁴⁶ สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้ คือสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA ถูกดูดซับได้ดีที่สุด รองลงมาคือ Cr^{3+} - TEDA และ Ag^+ - TEDA ตามลำดับ

ขั้นตอนที่สำคัญที่อาจมีผลต่อการศึกษาการดูดซับสารประกอบเชิงซ้อนบนผ่านกัมมันต์ คือในการกรองสารละลายหลังการดูดซับ เมื่อล้างผ่านกัมมันต์แล้ว จะต้องปรับปริมาตรให้เท่ากันทุกความเข้มข้น ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสง แต่การทดลองในครั้งนี้ไม่ได้ปรับปริมาตรหลังจากกรองแล้ว ทำให้ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ไม่เป็นเส้นตรงเท่าที่ควร แต่มีแนวโน้มเป็นเส้นตรง

4.4 การเคลือบผิวผ่านกัมมันต์ด้วยไอออนโลหะผสมกับไตรเอธิลีนไดอะมิน

การเตรียมสารละลายผสมของไอออนโลหะ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ กับ TEDA เพื่อนำไปเคลือบผิวผ่านกัมมันต์ โดยคำนวณร้อยละต่ำสุดและสูงสุดของไอออนแต่ละตัวและ TEDA ที่อ้างอิงจากหน้ากากป้องกันแก๊สพิษทางทหาร จากนั้นนำสารละลายผสมที่เตรียมได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 190 - 820 nm ดังรูป 3.26 - 3.28 พบว่าสเปกตรัมที่ได้จะเป็นพีคของสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA ที่ความยาวคลื่นประมาณ 260 nm ซึ่งเลื่อนมาจากพีคของสารละลาย Cu^{2+} อย่างชัดเจน และที่ความยาวคลื่นประมาณ 770 nm ก็จะมีพีคของสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} - TEDA เช่นกัน โดยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่าสารละลาย Cu^{2+} นอกจากนี้จะพบพีคของสารประกอบเชิงซ้อน Cr^{3+} - TEDA ที่ความยาวคลื่นประมาณ 414 และ 570 nm มีค่าการดูดกลืนแสงสูงกว่า Cr^{3+} และจากสเปกตรัมที่ได้จะไม่พบพีคของสารประกอบเชิงซ้อน Ag^+ - TEDA เนื่องจากในสารละลายผสมที่เตรียมมีไอออนโลหะ Ag^+ น้อยมากเมื่อเทียบกับ Cu^{2+} และ Cr^{3+}

จึงไม่น่าจะมีสารประกอบเชิงซ้อน Ag^+ -TEDA นอกจากนี้ปริมาณ TEDA ที่เติมลงไปมีน้อยกว่าปริมาณของ Cu^{2+} และ Cr^{3+} ในสารละลายผสม ดังนั้นจำนวนสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ จะเป็นสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} -TEDA และ Cr^{3+} -TEDA ซึ่งยืนยันจากรูป 3.27 และ 3.28 nm โดยที่ในสารละลายผสมจะมีไอออนโลหะ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ ที่ไม่ได้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนรวมอยู่ด้วย

หลังจากเตรียมสารละลายผสมของไอออนโลหะกับ TEDA แล้ว ตามปริมาณโลหะต่ำสุดและสูงสุดที่มีอยู่ในหน้ากากป้องกันแก๊สพิษในตาราง 1.2 แล้ว ต่อไปได้นำสารละลายไปศึกษาการดูดซับโดยตรงบนถ่านกัมมันต์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 1.0 กรัม วิเคราะห์หาปริมาณไอออนโลหะแต่ละชนิดด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี ผลจากตาราง 3.25 และ 3.27 พบว่าปริมาณโลหะที่เคลือบผิวถ่านกัมมันต์จากการเคลือบผิวโดยวิธีการดูดซับโดยตรง จากการทดลองชุดที่ 1 มีปริมาณ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ เท่ากับ 1.35%, 0.09% และ 0.002% โดยมวลตามลำดับ และจากการทดลองชุดที่ 2 มีปริมาณ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ เท่ากับ 0.925%, 0.12% และ 0.007% โดยมวลตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณของสารประกอบเชิงซ้อนที่เคลือบผิวถ่านกัมมันต์มีปริมาณที่น้อยมาก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ปริมาณ TEDA ที่ใช้ผสมน้อยกว่าปริมาณไอออนโลหะ Cu^{2+} และ Cr^{3+} ทำให้ปริมาณ TEDA ถูกใช้ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจนหมด และจะเหลือสารละลายไอออนโลหะ Cu^{2+} และ Cr^{3+} ดังนั้น ในสารละลายผสมจะมีทั้งโมเลกุลของสารประกอบเชิงซ้อน Cu^{2+} -TEDA และ Cr^{3+} -TEDA ที่มีขนาดใหญ่ รวมทั้งสารละลายไอออนโลหะ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ อยู่ด้วย จึงทำให้เกิดการบดบังกันเอง เป็นผลให้ปริมาณการเคลือบผิวที่ได้ต่ำมาก

จากผลการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์โดยวิธีดูดซับโดยตรง พบว่ามีประสิทธิภาพการเคลือบผิวต่ำมาก จึงได้เปลี่ยนมาใช้วิธีการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์โดยการระเหยน้ำ ซึ่งเป็นตัวทำละลายของสารละลายไอออนโลหะออก ในการทดลองได้เติมสารละลายผสมของไอออนโลหะทุกตัวกับ TEDA ที่จะทำให้เคลือบผิวถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10.0 กรัม ทั้งการทดลองชุดที่ 1 และ 2 ลงในขวดระเหย จากนั้นเติมถ่านกัมมันต์ลงไป 10.0 กรัม แล้วทำการระเหยเอาน้ำออกโดยใช้เครื่อง Rotatory Evaporator ที่อุณหภูมิประมาณ 60 - 70 °C นำถ่านกัมมันต์ที่เคลือบผิวแล้วไปอบจนได้น้ำหนักคงที่ จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณโลหะที่เคลือบผิวถ่านกัมมันต์ โดยการสกัดถ่านกัมมันต์ 1.0 กรัม โดยวิธีรีฟลักซ์ นำสารละลายไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี ส่วนโลหะที่เหลือติดอยู่ข้างขวดระเหยให้ล้างออกด้วย 20% HNO_3 และนำมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะ เพื่อยืนยันจำนวนโมลของโลหะที่เติมลงไป และจำนวนโมลที่เคลือบผิวอยู่จริงได้

จากตาราง 3.31 และรูป 3.32 จะเห็นว่า ปริมาณโลหะที่เคลือบผิวถ่านกัมมันต์จากการทดลองทั้งสองชุด ได้ผลคือ ปริมาณ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ จากการทดลองชุดที่ 1 เท่ากับ 5.80%, 1.16% และ 0.013% โดยมวลตามลำดับ และปริมาณ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ จากการทดลองชุดที่ 2 เท่ากับ 8.95%, 2.88% และ 0.007% โดยมวล ตามลำดับ จะเห็นว่าปริมาณโลหะ Cu^{2+} และ Cr^{3+} ที่เคลือบผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มจำนวนโมลของสารละลายไอออนโลหะลงไป ส่วนสารละลายไอออนโลหะ Ag^+ ทั้งการทดลองชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ใช้จำนวนโมลเท่าเดิมทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการดูดซับของไอออนโลหะ Ag^+ จะต่ำกว่า Cu^{2+} และ Cr^{3+} และสารประกอบเชิงซ้อน Ag^+ - TEDA เกิดยากกว่า Cu^{2+} - TEDA และ Cr^{3+} - TEDA จากการวิเคราะห์ปริมาณ Ag^+ ที่เคลือบผิวของชุดที่ 2 จะลดลงกว่าชุดที่ 1 อาจเป็นเพราะว่าการเพิ่มปริมาณสารละลาย Cu^{2+} และ Cr^{3+} ในชุดที่ 2 จึงทำให้ Cu^{2+} และ Cr^{3+} เข้าไปเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ได้มากขึ้น ทำให้พื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ถูกไอออนโลหะ Cu^{2+} และ Cr^{3+} ครอบครองเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณ Ag^+ ที่มีส่วนร่วมในการเคลือบผิวน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ทั้งสองวิธี พบว่าวิธีระเหยตัวทำละลายจะได้ปริมาณโลหะเคลือบอยู่ที่ผิวถ่านกัมมันต์มากกว่าวิธีการดูดซับโดยตรง

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของการเคลือบผิวทั้งสองวิธี ดังตาราง 3.32 และรูป 3.33 โดยคิดจากปริมาณไอออนโลหะที่ใส่เข้าไปและปริมาณที่เคลือบผิวอยู่จริง คำนวณออกมาในเทอมของร้อยละการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยไอออนโลหะ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ ด้วยวิธีการดูดซับโดยตรงได้เท่ากับ 21.2, 5.77 และ 6.17% ของการทดลองชุดที่ 1 และมีค่า 9.67, 3.30 และ 21.6% ของการทดลองชุดที่ 2 ตามลำดับ สำหรับร้อยละการเคลือบผิวถ่านกัมมันต์ด้วยไอออนโลหะ Cu^{2+} , Cr^{3+} และ Ag^+ ด้วยวิธีการระเหยตัวทำละลายเท่ากับ 91.3, 74.7 และ 40.7% ของการทดลองชุดที่ 1 และเท่ากับ 93.3, 79.0 และ 21.6% ของการทดลองชุดที่ 2 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเคลือบผิวทั้ง 2 วิธี พบว่า วิธีระเหยตัวทำละลายจะให้ร้อยละการเคลือบผิวดีกว่าวิธีการดูดซับโดยตรงของการทดลองทั้ง 2 ชุด ซึ่งเมื่อประสิทธิภาพการเคลือบผิวสูง ปริมาณไอออนโลหะที่เคลือบผิวถ่านกัมมันต์ก็จะสูงด้วย เป็นผลที่สอดคล้องกัน

ถ่านกัมมันต์เคลือบผิวที่เตรียมได้นั้น จะมีประสิทธิภาพในการใช้งาน เช่น การดูดซับแก๊สได้ดีเพียงใด เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เคลือบผิวในหน้ากากป้องกันแก๊สพิษสำเร็จรูป เป็นเรื่องที่น่าสนใจศึกษาต่อไป