

**การสังเคราะห์และศึกษาสนามลิแกนด์
ในสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทองแดงกับลิแกนด์ชนิดต่างๆ
Synthesis and Ligand Field Studies of Copper (II)
Complexes with Various Ligands**

สายใจ แหละหิม

Saijai Hlaeheem

ซูไฮลีย์ กะนา

Suhailee Kana

วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

Bachelor of Science in Chemistry

Nakhon si Thammarat Rajabhat University

2548

ชื่อวิจัย การสังเคราะห์และศึกษาสนามลิแกนด์ในสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทองแดง
กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ

ผู้วิจัย นางสาวสายใจ แหะหิม
 นางสาวชูไฮลิย์ กะนา

สาขาวิชา เคมี

ปีการศึกษา 2548

คณะกรรมการที่ปรึกษา
.....(ประธานกรรมการ)
(อาจารย์ปวีณา หนูคง)

.....(ประธานกรรมการ)
(อาจารย์ดวงรัตน์ ทองคำ)

คณะกรรมการสอบ
.....(ประธานกรรมการ)
(อาจารย์ปวีณา หนูคง)

.....(ประธานกรรมการ)
(อาจารย์ดวงรัตน์ ทองคำ)

.....(กรรมการ)
(อาจารย์ประวิทย์ เนื่องมีลา)

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช อนุมัติให้นับโครงการวิจัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

.....
(อาจารย์ดวงรัตน์ ทองคำ)

ประธานหลักสูตร โปรแกรมวิชาเคมี

ชื่อวิจัย	การสังเคราะห์และศึกษาสเปกตรัมลิแกนด์ในสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทองแดงกับลิแกนด์ชนิดต่างๆ
ผู้วิจัย	นางสาวสายใจ แผละหิม นางสาวชูไฮลิย์ กะนา
สาขาวิชา	เคมี
ปีการศึกษา	2548

บทคัดย่อ

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการสังเคราะห์และศึกษาความแรงของลิแกนด์ของสารประกอบเชิงซ้อน ได้แก่ $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ (1), $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ (2), $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ (3), $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ (4), $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ (5), $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ (6) และ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ (7) หลังจากนั้นนำสารประกอบเชิงซ้อนไปหาค่า R_f โดยใช้เทคนิคทินเลเยอร์โครมาโทกราฟีใช้เอทิลอะซิเตตเป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่ ที่พบว่ามีสารประกอบเชิงซ้อนที่ (7) มีค่า $R_f = 0.69$ สารประกอบเชิงซ้อนที่ (1) – (6) มีค่า $R_f = 0$ แสดงว่าสารประกอบเชิงซ้อนที่ (7) เป็นกลาง ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนที่เหลือมีขั้วสูง การศึกษาสมบัติ การละลายในตัวทำละลายชนิดต่างๆ ได้แก่ น้ำ, เอทานอล, เมทานอล, ไดคลอโรมีเทน, คลอโรฟอร์ม, อะซิโตน, เฮกเซน, เอทิลอะซิเตตและไดเอทิลอีเทอร์ พบว่าสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสภาพขั้วใกล้เคียงกันกับตัวทำละลายสามารถละลายได้ดี เช่น สารประกอบเชิงซ้อนตัวที่ (1) เป็นสารประกอบที่มีขั้วจะละลายได้ดีในเอทานอล, อะซิโตน และไม่ละลายในเฮกเซน การศึกษาความแรงของลิแกนด์โดยใช้แผนผัง complementary colors พบว่า สารประกอบเชิงซ้อน มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) เรียงตามลำดับดังนี้ (3), (5), (6) > (2), (4) > (1) > (7) ดังนั้น spectrochemical series เรียงตามลำดับดังนี้ (1) > (2), (4) > (3), (5), (6) ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนที่ (7) นำมาสร้างอนุกรมไม่ได้เพราะมีลิแกนด์ต่างชนิดกัน

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การสังเคราะห์และศึกษาความแรงของลิแกนด์ของสารประกอบเชิงซ้อน ได้รับการพิจารณาให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิชา โครงการวิจัยทางเคมี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ซึ่งโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาจากหลายฝ่ายที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอาจารย์ และเจ้าหน้าที่โปรแกรมวิชาเคมีและเจ้าหน้าที่ศูนย์วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ปวีณา หนูคง และ อาจารย์ดวงรัตน์ ทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยเป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือ สนับสนุน ได้สละเวลาในการตรวจ แก้ไข และให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเกษราพร ใจจง และคุณณัฐกาน กิจวิจิตร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ โปรแกรมวิชาเคมี ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ความสะดวกในการยืมอุปกรณ์ และสารเคมีในการทำวิจัยเป็นผลให้การวิจัยครั้งนี้ดำเนินไปตามวัตถุประสงค์ และ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่น้อง เพื่อนๆ ทุกคน เป็นอย่างสูงที่คอยให้กำลังใจ และช่วยเหลือตลอดเวลาในการทำวิจัยจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ตลอดจนขอขอบพระคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

สายใจ แหละหิม

ชูไฮลิย์ กะนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(4)
สารบัญ	(5)
รายการตาราง	(6)
รายการภาพประกอบ	(7)
บทที่ 1 บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	18
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	21
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	21
ขอบเขตของการวิจัย	21
บทที่ 2 วิธีการวิจัย	22
สารเคมี	22
อุปกรณ์	22
วิธีดำเนินการ	23
บทที่ 3 ผลและการอภิปรายผล	28
บทที่ 4 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	36
บรรณานุกรม	
ภาคผนวก	
ประวัติผู้เขียน	

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
1. แสดงการดูดกลืนแสงของการละลาย $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	11
2. แถบการดูดกลืนแสงสูงสุดของแอนไอออนของสารประกอบอินทรีย์บางตัว	13
3. แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้	26
4. เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้	27
5. เปรียบเทียบค่า R_f ของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ เอทิลอะซิเตตเป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่	28
6. ความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้สารประกอบเชิงซ้อน ละลายในตัวทำละลายต่างๆ	29
7. ความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้ตัวทำละลาย ละลายในสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิด	30
8. จุดหลอมเหลวของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	32
9. จุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้	32
10. แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากการเทียบสีจากแผนผัง Complementary colors	33

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1. โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$	2
2. สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$	3
3. สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$	4
4. สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $\text{V}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$	5
5. แสดงค่า Dq/B ค่าบวก	6
6. สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	7
7. แสดงค่า Dq/B ค่าลบ	7
8. สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$	8
9. สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	9
10. สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	10
11. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	10
12. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	12
13. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด	14
14. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายพราซีโอโดิเมียมคลอไรด์ (a = ค่าแอ็บซอร์บิวิตี ในหน่วยลิตร, กรัม ⁻¹ และเซนติเมตร ⁻¹)	15
15. สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไอออนของโลหะทรานสิชันบางตัว	16
16. แผนภาพสหสัมพันธ์สำหรับโครงแบบ d^1 ในสนามลิแกนด์	18
17. แผนผัง Complementary colors	24

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

สารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) หรืออาจเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า สารประกอบโคออร์ดิเนชัน (Coordination Compound) ชื่อภาษาอังกฤษ Complex Compound นั้น เป็นชื่อที่ใช้กันมาในสมัยแรก ๆ ที่เริ่มรู้จักสารประเภทนี้ เนื่องจากในขณะนั้นความรู้ในทางทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมียังไม่ก้าวหน้ามากพอที่จะอธิบายการเกิดพันธะในสารพวกนี้ได้ ในสมัยนั้นจึงเรียกสารพวกนี้ว่า Complex Compound (Complex แปลว่าซับซ้อน ยากต่อการเข้าใจ) ส่วนชื่อ Coordination Compound นั้น เป็นชื่อที่นิยมใช้กันในช่วงหลัง เมื่อมีการศึกษาสารพวกนี้อย่างละเอียดแล้วและนิยมใช้กันมาจนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ชื่อ Complex Compound ก็ยังคงมีใช้กันอยู่ในปัจจุบันเช่นกัน

กล่าวโดยกว้าง ๆ ได้ว่า สารประกอบเชิงซ้อนจะประกอบด้วยอะตอมกลาง (Central atom) เป็นหลัก และมีอะตอม (หรือโมเลกุล) อื่นอยู่ล้อมรอบ เรียกว่า ลิแกนด์ (ligand) ตั้งแต่ 2 อะตอม (หรือโมเลกุล) ขึ้นไป มีพันธะเคมีเกิดขึ้นเพื่อยึดติดกับอะตอมกลางและอาจมีประจุ (บวกหรือลบ) หรือไม่ก็ได้ จำนวนอะตอม (หรือโมเลกุล) ที่ล้อมรอบนี้อาจมีเท่าไรก็ได้ ตั้งแต่ 2 ขึ้นไป จนถึง 12 และเรียกว่า เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number) ของอะตอมกลาง แต่ที่พบบ่อยคือ 4 และ 6

ธาตุต่าง ๆ ในตารางธาตุส่วนใหญ่ทำหน้าที่อะตอมกลางได้ และทราบใดที่มีอะตอมหรือโมเลกุลอื่นมาเกิดพันธะตามลักษณะที่กล่าวมาแล้วนั้น ก็จะอยู่ในข่ายที่เป็นสารประกอบ โคออร์ดิเนชัน แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปมักนิยมใช้เรียกเฉพาะกรณีที่มีอะตอมกลางเป็นพวกโลหะทรานสิชันมากกว่า

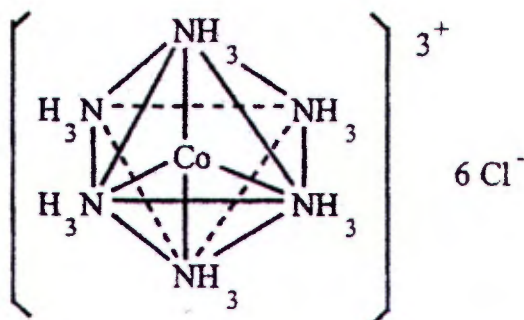
ตัวอย่างสารประกอบเชิงซ้อน หรือสารประกอบโคออร์ดิเนชันที่ได้พบมาแล้ว (ในการวิเคราะห์หาอนุมูลต่าง ๆ) เช่น

$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$	มีเลขโคออร์ดิเนชัน	เท่ากับ 2
$[\text{Co}(\text{NCS})_4]^{2-}$	มีเลขโคออร์ดิเนชัน	เท่ากับ 4
$[\text{Ni}(\text{C}_4\text{H}_7\text{N}_2\text{O}_2)_2]$	มีเลขโคออร์ดิเนชัน	เท่ากับ 4
$[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$	มีเลขโคออร์ดิเนชัน	เท่ากับ 6

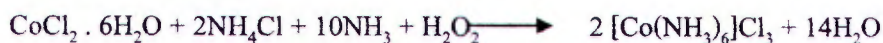
เป็นที่น่าสังเกตว่า สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานสิชันมักมีสีต่าง ๆ แด่นชัดซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัว จึงใช้ประโยชน์ในการบ่งบอกว่า เป็นอะตอมของโลหะใดได้ แต่ทั้งนี้มิได้หมายความว่าสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทุกชนิดจะต้องมีสีเสมอไปบางชนิดอาจไม่มีสีก็ได้

สำหรับการเกิดพันธะและโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนนั้น จะยกตัวอย่างของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ ในสารประกอบนี้ ส่วนที่ถือว่าเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แท้จริงคือ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$

เท่านั้น ซึ่งประกอบด้วย NH_3 6 โมเลกุล มีพันธะเคมียึดติดกับ Co (III) เป็นรูปออกตะฮีดรอล ดังรูป



ส่วน Cl^- นั้น จะอยู่ภายนอกมีหน้าที่คงประจุเท่านั้น สารประกอบ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ นี้สังเคราะห์ขึ้นได้จากปฏิกิริยาระหว่างโคบอลต์คลอไรด์, แอมโมเนียมคลอไรด์, แอมโมเนีย และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ



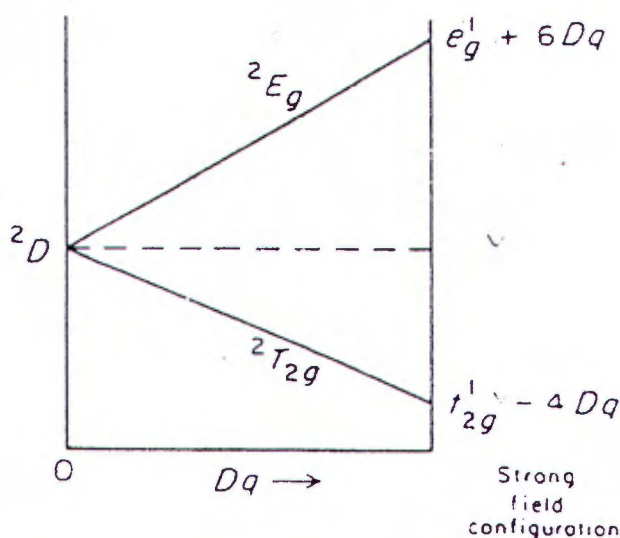
ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะกระทำในรูปของสารละลาย โดยการละลายสารตั้งต้นแล้วปล่อยให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แล้วจึงแยกผลิตภัณฑ์ออก ทำให้บริสุทธิ์ต่อไป

ความรู้เกี่ยวกับการละลายของสารจะมีประโยชน์มากในการทำสารให้บริสุทธิ์ เนื่องจากการละลายของสารประกอบส่วนใหญ่จะลดลงตามอุณหภูมิ ดังนั้นวิธีแยกที่ง่ายคือ การทำสารละลายให้เป็นจนกระทั่งตกผลึกออกมา ขณะที่อุณหภูมิลดลงจะมีสารประกอบที่ไม่ต้องการบางอย่าง เช่น พวกสารตั้งต้นที่หลงเหลืออยู่ตกผลึกออกมาด้วย ซึ่งจะกำจัดออกได้โดยการตกผลึกใหม่โดยวิธีละลายสาร (ที่ยังไม่บริสุทธิ์) ในตัวทำละลายที่ร้อนในปริมาณเล็กน้อยแล้วกรองสารละลาย เพื่อแยกเอาสารที่ไม่บริสุทธิ์ซึ่งไม่ละลายออกไปแล้วจึงทำสารละลายให้เย็นเพื่อให้สารที่ต้องการตกผลึกออกมา ซึ่งจะทำให้มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น

โลหะทรานสิชันแถวที่หนึ่งและสอง

ไอออนและสารประกอบเชิงซ้อนของธาตุ 20 ธาตุในกลุ่มโลหะทรานสิชันแถวที่หนึ่งและสองมีแนวโน้มจะดูดกลืนแสงในช่วงวิสิเบิล สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของสารกลุ่มนี้มีลักษณะแตกต่างจากสารในกลุ่มแลนทาไนด์และแอคทิไนด์ โดยสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของโลหะทรานสิชันแถวที่หนึ่งและสองจะเป็นแถบกว้างและได้รับอิทธิพลอย่างมากจากผลของสิ่งแวดล้อมทางเคมี ตัวอย่างเช่น สารละลายของไอออนทองแดง (II) ในน้ำเป็นสีฟ้าอ่อน เมื่อเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมโมเนียจะเป็นสีน้ำเงินเข้ม

การดูดกลืนแสงของธาตุในกลุ่มโลหะทรานสิชันนี้เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนที่อยู่ใน d - ออร์บิทัล โดยทั่วไปแล้วอิเล็กตรอนเหล่านี้ไม่ได้มีส่วนเกี่ยวกับการสร้างพันธะ แต่เป็นที่ทราบโดยทั่วไปว่าอิเล็กตรอนิกทรานสิชันของโลหะทรานสิชันแถวที่หนึ่งและสองเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ใน d - ออร์บิทัล โดยโลหะทรานสิชันแถวที่หนึ่งเกิดอิเล็กตรอนิกทรานสิชันของอิเล็กตรอนใน $3d$ - ออร์บิทัล และโลหะทรานสิชันแถวที่สองเกิดอิเล็กตรอนิกทรานสิชันของอิเล็กตรอนใน $4d$ - ออร์บิทัล ตัวอย่างของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไอออนโลหะทรานสิชันบางตัวเช่นไอออนของโคบอลต์ ไอออนของทิตาเนียมและไอออนของนิกเกิล แสดงในรูป 14



รูป 14 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไอออนของโลหะทรานสิชันบางตัว

ค่า $10 Dq$ หรือ Δ ซึ่งมักนิยมเรียกกันว่า ความแรงของสนามลิแกนด์ (ligand field strength) หรือพารามิเตอร์

ความแรงของลิแกนด์ อาจมีผลของสเปกตรัมการดูดกลืน (absorption spectrum) อาจเรียงลำดับความสามารถในการแยกระดับพลังงานระหว่าง t_{2g} กับ e_g หรือค่า $10 Dq$ โดยเรียงเป็นอนุกรมจากน้อยไปหามาก ดังนี้

$I^- < Br^- < S^{2-} < SCN^- < Cl^- < NO_3^- < F^- < OH^- < C_2O_4^{2-} < H_2O < NCS^- < CH_3CN < NH_3 < en < bipy < NO_2^- < CN^- < CO$

ลำดับดังกล่าวนี้เรียกว่าอนุกรมสเปกโทรเคมี (spectrochemical series) ซึ่งไม่ขึ้นกับชนิดของไอออนโลหะ คือ ไม่ว่าจะเป็นไอออนโลหะชนิดไหน ลำดับข้างบนก็จะยังคงเดิมอยู่ จากตัวอย่างข้างบนเราพอจะยกตัวอย่างได้ดังนี้ เช่น $[Ni(NH_3)_6]^{2+}$ จะมีความแรงของสนามลิแกนด์ $10 Dq$ มากกว่า $[Ni(N_2O)_6]^{2+}$ เป็นต้น เพราะว่า NH_3 อยู่ในตำแหน่งสูงกว่า H_2O ในอนุกรมสเปกโทรเคมี

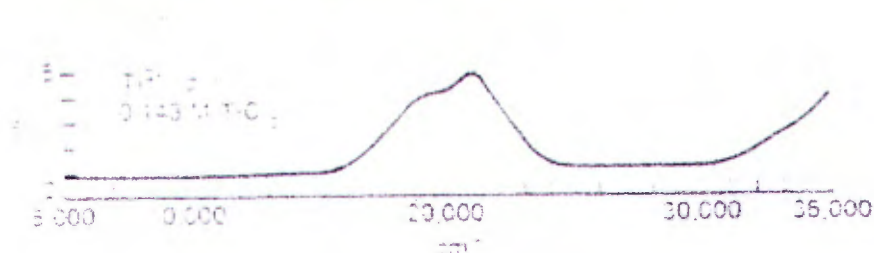
Ligand field spectra

Ligand field spectra เป็นทรานสิชันที่เกิดขึ้นระหว่าง d-d ออร์บิทัลในโลหะทรานสิชันของสารประกอบเชิงซ้อน โดยทั่วไปมักมีความเข้มต่ำเพราะเป็นทรานสิชันแบบต้องห้ามเชิงสมมาตร

1. โครงแบบ d¹

สเปกตรัมของสารละลายเกลือของ Ti^{3+} มักมีสีชมพูอ่อนสเปกตรัมดูดกลืนดังในรูป 1 เห็นเป็นแบนด์กว้าง ($\epsilon = 4$, $f = 8 \times 10^{-5}$) เกิดที่ $20,300 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแบนด์ดังกล่าวเป็นทรานสิชันระหว่าง ${}^2E_g \rightarrow {}^2T_{2g}$

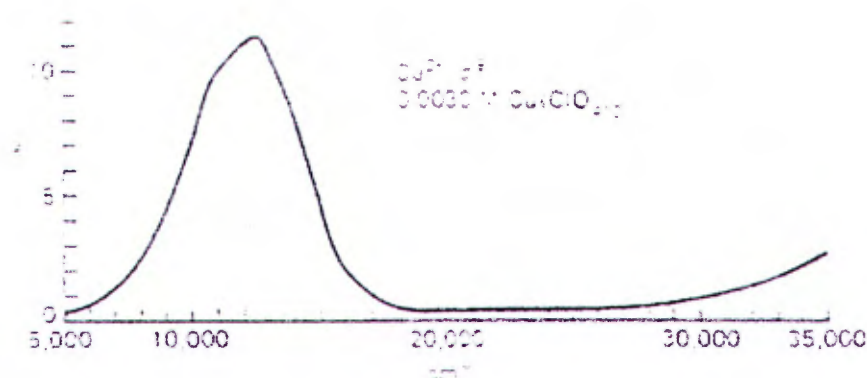
ความเข้มของแบนด์ได้จากไวยรอนิกคัปปลิง ซึ่งเป็นกลไกช่วยผ่อนคลายกฎการเลือกสำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของ $\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ มีค่า $10 Dq = 20,300 \text{ cm}^{-1}$



รูป 1 สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $\text{Ti}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$

2. โครงแบบ d⁹

สเปกตรัมของสารละลายเกลือของทองแดง, Cu^{2+} ($\epsilon = 11$, $f = 2.3 \times 10^{-4}$) มีสีฟ้าอ่อน ลักษณะแบนด์กว้างมี $2 T_{2g}$ เป็นเทอมของสถานะกระตุ้น มีทรานสิชันระหว่าง ${}^2E_g \rightarrow {}^3T_{2g}$ และรูป 2 แสดง สเปกตรัมของ $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$ มีค่าของ $10 Dq = 12,000 \text{ cm}^{-1}$



รูป 2 สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6^{2+}$

3. โครงแบบ d^2

สเปกตรัมของสารละลายเกลือของ V^{3+} มีสีเขียว ลักษณะสเปกตราเป็นแบนด์กว้างมีการดูดกลืนแสงดังนี้

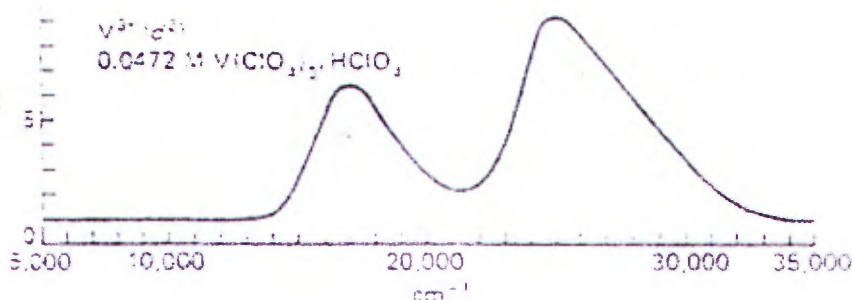
	ϵ	f
$17,200 \text{ cm}^{-1}$	6	1.1×10^{-4}
$25,600 \text{ cm}^{-1}$	8	2.4×10^{-4}

ดังแสดงในรูป 3

ในรูป 3 เป็นสเปกตรัมของ $V^{3+} (d^2)$ เราใช้แผนภาพออร์บิทัลได้ดังนี้

แบนด์ที่ 1 เป็นทรานสิชันจาก ${}^3T_{1g}(F) \rightarrow {}^3T_{2g}$ เกิดที่ $17,200 \text{ cm}^{-1}$ $\epsilon = 6$ และ $f = 1.1 \times 10^{-4}$

แบนด์ที่ 2 เป็นทรานสิชันจาก ${}^3T_{1g}(F) \rightarrow {}^3T_{1g}(P)$ เกิดที่ $25,600 \text{ cm}^{-1}$ $\epsilon = 8$ และ $f = 2.4 \times 10^{-4}$



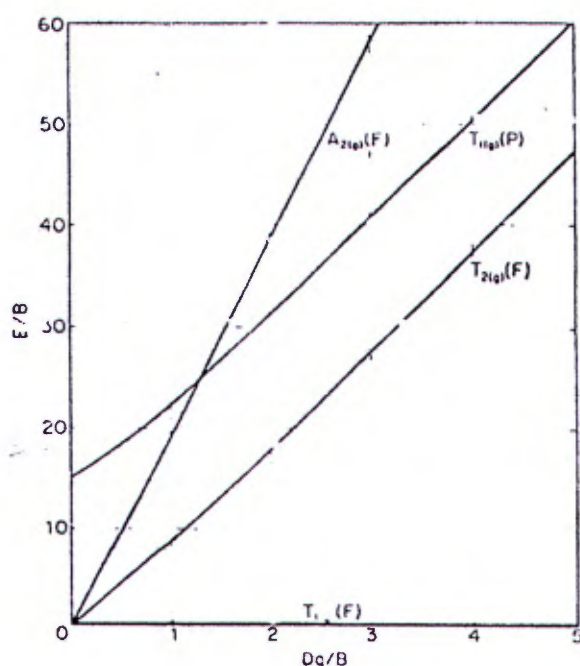
รูป 3 สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $V(H_2O)_6^{3+}$

ส่วนทรานสิชันที่สามจาก ${}^3T_{1g}(F) \rightarrow {}^3A_{2g}$ เนื่องจาก ${}^3A_{2g}$ เป็นทรานสิชันของสองอิเล็กตรอน จึงเกิดขึ้นได้น้อยและมีความเข้มต่ำมากแบนด์อันนี้เราจึงมองไม่เห็นในสเปกตรัมของ V^{3+}

ถ้าเรานำค่าของพลังงานของทรานสิชันของแบนด์ที่ 1 และ แบนด์ที่ 2 มาเข้าอัตราส่วนกัน

$$\frac{{}^3T_{1g}(F) \rightarrow {}^3T_{1g}(P)}{{}^3T_{1g}(F) \rightarrow {}^3T_{2g}(F)} = \frac{25,600}{17,200} = 1.49$$

จากอัตราส่วนที่ได้นี้คือ 1.49 นำไปเทียบหาว่าพอดีกับค่า Dq/B โดยใช้รูป 4 ผลปรากฏว่าตรงกับจุดตัดที่ Dq/B มีค่า = 2.8 ให้ค่า $E/B = 25.9$



รูป 4 แสดงค่า Dq/B ค่าบวก

สำหรับทรานสิชันในแบนด์ที่ 1 และ $E/B = 38.7$ สำหรับทรานสิชันในแบนด์ที่ 2 จากค่า $E/B = 25.9$ และ $E = 17,200 \text{ cm}^{-1}$ และ $E/B = 38.7$ ให้ $E = 25,600 \text{ cm}^{-1}$ จะได้

$$B = 665 \text{ cm}^{-1}$$

ดังนั้นในสารประกอบเชิงซ้อน $V(H_2O)_6^{3+}$ มี $10 Dq = 48,600 \text{ cm}^{-1}$

4. โครงแบบ d^8

d^8 สารประกอบเชิงซ้อนของ Ni^{2+} มีสีเขียวอ่อน จากสเปกตรัมของมัน ในรูป 5 มีการดูดกลืนแสงตามลำดับ จากพลังงานน้อยไปหาค่าพลังงานมาก ได้ดังนี้

ที่ $8,700 \text{ cm}^{-1}$	มีค่า $\epsilon = 1.6$	และ $f = 1.8 \times 10^{-5}$
ที่ $14,500 \text{ cm}^{-1}$	มีค่า $\epsilon = 2.0$	และ $f = 3.0 \times 10^{-5}$
ที่ $17,000 \text{ cm}^{-1}$	มีค่า $\epsilon = 4.6$	และ $f = 7.0 \times 10^{-5}$

จากแผนภาพที - เอส หรือ แผนภาพออร์บิทัลแยกกันแบนด์ต่างๆ ได้ดังนี้

${}^3A_{2g}(F)$	$\longrightarrow$	${}^3T_{2g}(F)$	เกิดที่ $8,700 \text{ cm}^{-1}$
${}^3A_{2g}(F)$	$\longrightarrow$	${}^3T_{1g}(F)$	เกิดที่ $14,500 \text{ cm}^{-1}$
${}^3A_{2g}(F)$	$\longrightarrow$	${}^3T_{1g}(P)$	เกิดที่ $23,500 \text{ cm}^{-1}$

อัตราส่วนของพลังงานของแบนด์ที่ 2 ต่อแบนด์ที่ 1 จะได้ว่า

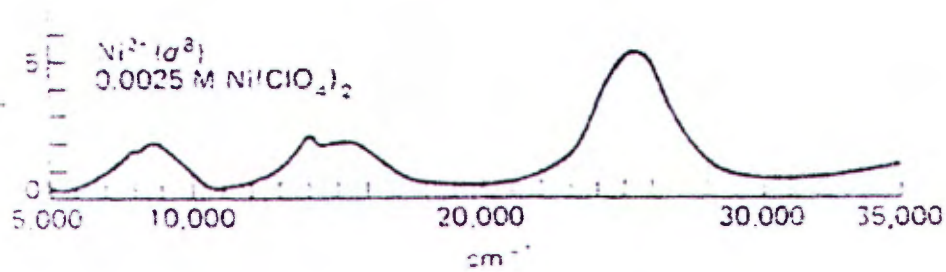
$$\frac{3A_{2g}(F) \rightarrow 3T_{1g}(P)}{3A_{2g}(F) \rightarrow 3T_{1g}(F)} = 1.74$$

เราใช้รูป 6 กับอัตราส่วน 1.74 พบว่าค่า $10Dq/B = 0.98$ จากค่า Dq/B นี้สามารถหาค่าของ B ได้

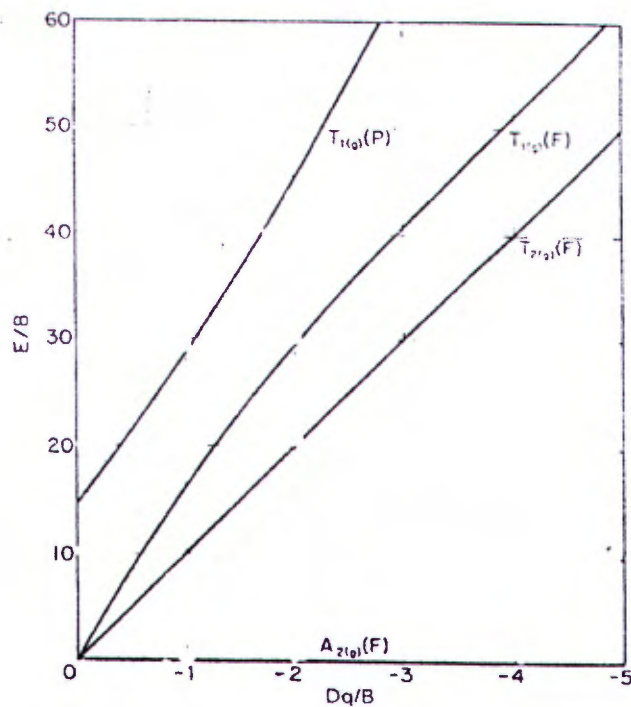
$${}^3A_{2g}(F) \longrightarrow {}^3T_{1g}(F) = 16$$

$$= 14,500/B$$

ดังนั้น $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ค่า $B = 905 \text{ cm}^{-1}$ และค่า $10Dq = 8,900 \text{ cm}^{-1}$



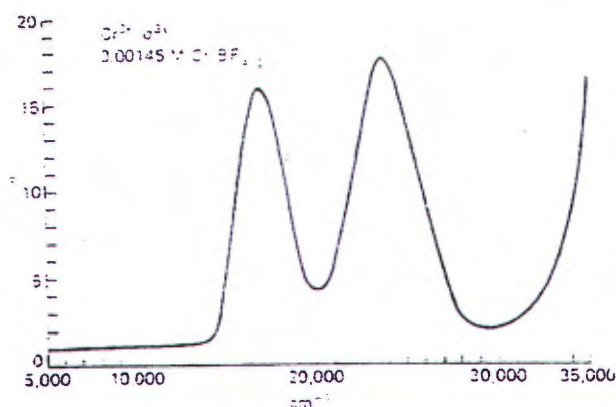
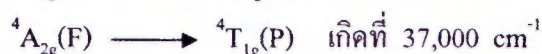
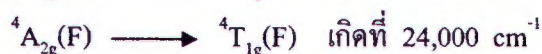
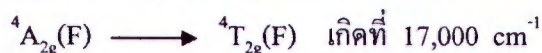
รูป 5 สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $[\text{Ni}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$



รูป 6 แสดงค่า Dq/B ค่าลบ

5. โครงแบบ d^3

สารละลายของ $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ ให้สีเขียวอ่อน มีการดูดกลืนแสงที่ $17,000 \text{ cm}^{-1}$
 $\epsilon = 14$, $f = 1.9 \times 10^{-4}$ และ $24,000 \text{ cm}^{-1}$ $\epsilon = 15$, $f = 2.6 \times 10^{-1}$ นอกจากนี้ยังมีแบนด์อีกอันหนึ่งที่
 $37,000 \text{ cm}^{-1}$ แต่มองไม่เห็นในรูปที่ 7 เพราะว่ามันจะอยู่ตรงไหล่ของ charge transfer band ซึ่งมีความเข้มสูงและมีพลังงานสูงขึ้นด้วย แบนด์ที่เกิดขึ้นมีดังนี้



รูป 7 สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$

เราใช้อัตราส่วนของสองแบนด์หลังค่า Dq/B จากรูป 6 ได้

$$|Dq/B| = 2.45$$

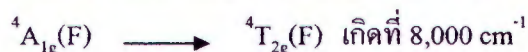
$$\begin{aligned} [{}^4A_{2g}(\text{F}) \longrightarrow {}^4T_{2g}(\text{F})]/B &= 24 \\ &= 17,000/B \end{aligned}$$

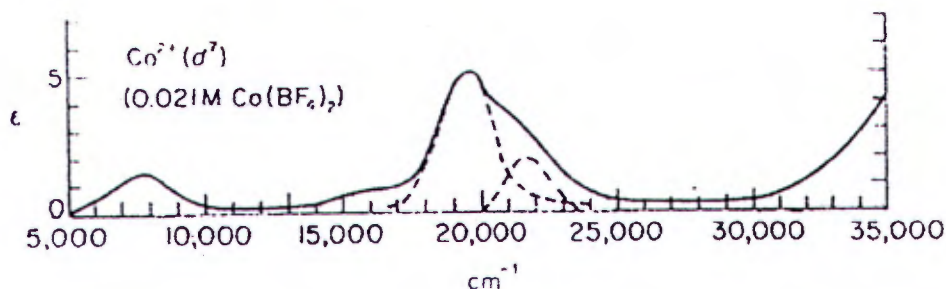
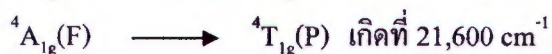
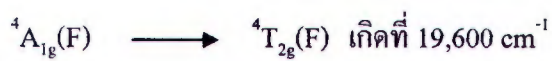
ดังนั้น $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ มีค่า $B = 695 \text{ cm}^{-1}$ และค่า $10 Dq = 17,000 \text{ cm}^{-1}$

6. โครงแบบ d^7

สารละลายของ $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ สีชมพู ในรูป 8 แสดงให้เห็นว่ามีการดูดกลืนแสงที่ 8000 cm^{-1} แต่ความเข้มน้อย กล่าวคือ $\epsilon = 1.3$ และ f มีค่าประมาณ 1.4×10^{-5} และมีการดูดกลืนแสงในช่วง $16,000 - 22,000 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งดูว่าน่าจะมีสองแบนด์ปนกันอยู่ แบนด์หนึ่งอยู่ที่ $19,600 \text{ cm}^{-1}$ มีค่า $\epsilon = 4.8$ และ $f = 5.4 \times 10^{-5}$ ส่วนอีกแบนด์หนึ่งมีเกิดที่ $21,600 \text{ cm}^{-1}$ มีค่า $\epsilon = 2.1$ และ $f = 1.8 \times 10^{-5}$

จากแผนภาพที - เอส หรือ แผนภาพออเจล อธิบายการดูดกลืนแสงได้ดังนี้





รูป 8 สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$

จะใช้พลังงานของทรานสิชันอันแรกและอันที่สาม เพื่อหาอัตราส่วนได้และมีค่าเท่ากับ 2.70 นำไปหาค่า Dq/B จากรูป 4 ซึ่งให้ค่า $Dq/B = 0.96$

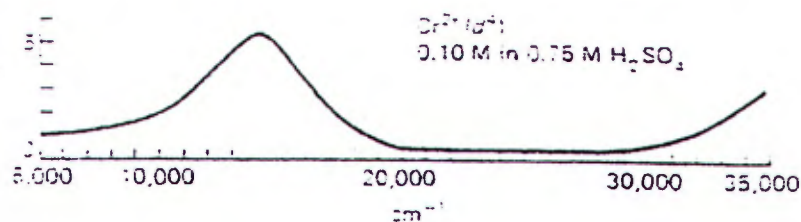


$$= 8,000/B$$

นั่นคือใน $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ มีค่า $B = 980 \text{ cm}^{-1}$ และ $10 Dq = 9,300 \text{ cm}^{-1}$

7. โครงแบบ d^4

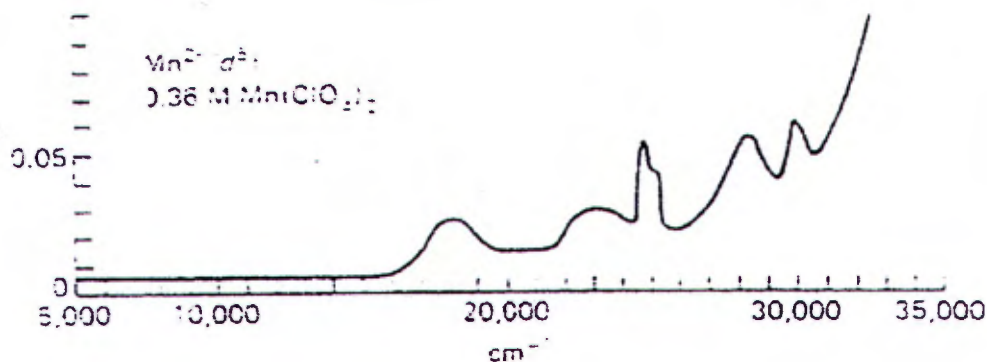
สารละลาย $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ มีสีน้ำเงินจาง ๆ ดังแสดงในรูป 9 พบว่ามีแบนด์เกิดขึ้นที่ $14,100 \text{ cm}^{-1}$ ด้วย $\epsilon = 4.2$ และ $f = 1 \times 10^{-4}$ เราใช้แผนภาพออร์บิทัลของไอออนทรานสิชันได้ว่าเกิดจาก ${}^5E_g \longrightarrow {}^5T_{2g}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $10 Dq$ นั่นเอง ดังนั้นใน $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ มีค่าของ $10 Dq = 14,100 \text{ cm}^{-1}$



รูป 9 สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของ $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$

8. โครงแบบ d^6

สารละลาย $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ มีสีเขียวอ่อน ซึ่งมีการดูดกลืนแสงที่ $10,000 \text{ cm}^{-1}$ ด้วยค่า $\epsilon = 11$, $f = 1.6 \times 10^{-5}$ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 10 และเทอมในสถานะพื้นเป็น quintet



รูป 10 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ $[\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$

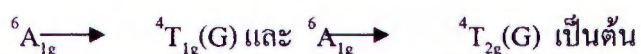
ดังนั้นจึงใช้เทอมทางซ้ายมือตามแผนภาพที่ - เอส แบนด์ที่เกิดขึ้นเป็นแบบอินยอมเชิงสปินทรานสิชันนี้เกิดจาก



ดังนั้นใน $[\text{Fe}(\text{N}_2\text{O})_6]^{2+}$ มีค่า $10 Dq = 10,000 \text{ cm}^{-1}$ แบนด์มีลักษณะเป็น doublet structure ขนาดรอยแยกของแบนด์ค่าประมาณ 2000 cm^{-1} ทั้งนี้เนื่องจาก low symmetry ligand field component ต้องการทำให้ two-fold degeneracy ของ 5E_g ขกออก

9. โครงแบบ d^5

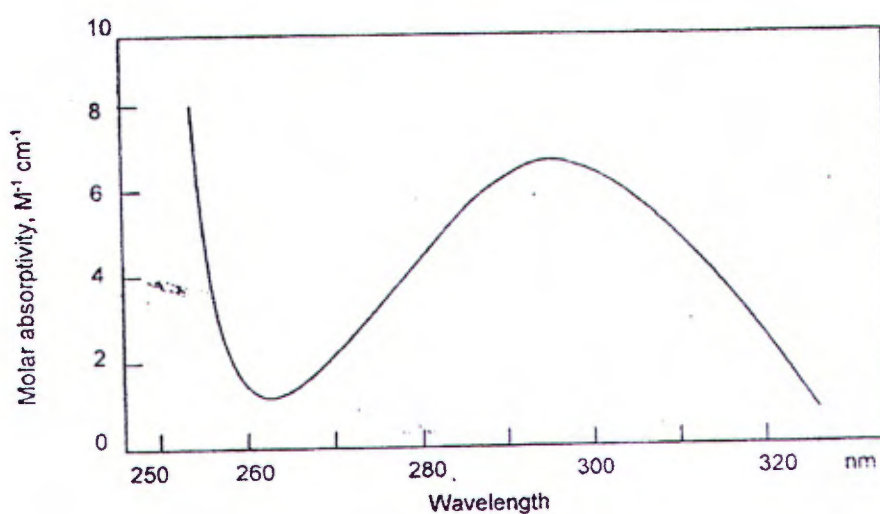
ในสารละลายของ $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ หรือของ Fe^{3+} สารละลาย $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ให้สีชมพูจาง ๆ สเปกตรัมแสดงในรูป 11 จะเห็นได้ว่าการดูดกลืนแสงได้น้อยมาก จากการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กพบว่าสารดังกล่าวมีลักษณะพื้นเป็น sextet นั่นก็คือ ${}^6A_{1g}$ ซึ่งไม่น่าจะมีแบนด์ที่เกิดขึ้นเราจะใช้แผนภาพที่ - เอส ทางด้านซ้ายมือในการอธิบายทรานสิชันต่าง ๆ ของสเปกตรัม โดยเริ่มจากสถานะพื้น



รายละเอียดของทรานสิชันจะแสดงในตาราง 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงการดูดกลืนแสงของการละลาย $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$

ตำแหน่ง	ϵ	f	ทรานสิชันที่เกิดขึ้น
18,600 cm^{-1}	0.013	1.2×10^{-7}	${}^6\text{A}_{1g} \longrightarrow {}^4\text{T}_{1g}(\text{G})$
22,900 cm^{-1}	0.009	8×10^{-8}	${}^6\text{A}_{1g} \longrightarrow {}^4\text{T}_{2g}(\text{G})$
24,900 cm^{-1}	0.031	6×10^{-8}	${}^6\text{A}_{1g} \longrightarrow {}^4\text{E}_g(\text{G})$
25,150 cm^{-1}	0.014	2×10^{-8}	${}^6\text{A}_{1g} \longrightarrow {}^4\text{A}_{1g}(\text{G})$
27,900 cm^{-1}	0.018	1×10^{-7}	${}^6\text{A}_{1g} \longrightarrow {}^4\text{T}_{2g}(\text{G})$
29,700 cm^{-1}	0.013	3×10^{-8}	${}^6\text{A}_{1g} \longrightarrow {}^4\text{E}_g(\text{G})$
32,400 cm^{-1}	0.02	1×10^{-7}	${}^6\text{A}_{1g} \longrightarrow {}^4\text{T}_{1g}(\text{P})$



รูป 11 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$

จากแบนด์ดังกล่าวข้างต้นนั้นให้ค่า $Dq/B = 1.1$

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } [{}^6\text{A}_{1g} \longrightarrow {}^4\text{T}_{1g}(\text{G})]/B &= 24.0 \\
 &= 18,600/B \\
 &= 24.0
 \end{aligned}$$

$$\text{ค่า } B = 770 \text{ cm}^{-1}$$

ใน $[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ ให้ค่า $10 Dq = 8,500 \text{ cm}^{-1}$

อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลแอมซอร์บชันสเปกโทรสโกปี

อัลตราไวโอเลตวิสิเบิลแอมซอร์บชันสเปกโทรสโกปี เป็นการศึกษาการดูดกลืนพลังงานของโมเลกุลในช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิล เมื่อโมเลกุลดูดกลืนพลังงานจากแสงแล้วอิเล็กตรอนวงนอกของโมเลกุลเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานที่เรียกว่า “อิเล็กตรอนิกทรานสิชัน” ภาพการบันทึกการดูดกลืนแสงของโมเลกุลเรียกว่า “แอมซอร์บชันสเปกตรัม” หรือ “สเปกตรัมการดูดกลืนแสง”

เมื่อแสงอัลตราไวโอเลต (ความยาวคลื่นประมาณ 200 – 400 นาโนเมตร) และวิสิเบิล (ความยาวคลื่นประมาณ 400 – 700 นาโนเมตร) ในรูปโฟตอน (hV) เมื่อเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของสารใด ๆ (M) โมเลกุลจะดูดกลืนพลังงานจากแสงแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวงนอกของโมเลกุลจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นมีผลทำให้โมเลกุลอยู่ในสถานะกระตุ้นหรือมีพลังงานสูง (M*) กระบวนการที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “อิเล็กตรอนิกทรานสิชัน” (electronic transition) หรือการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน

การดูดกลืนแสงของสารประกอบอินทรีย์

สเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของสารประกอบอินทรีย์หรือไอออนของสารประกอบเชิงซ้อนประเภทอินทรีย์จะมีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมของสารประกอบอินทรีย์คือ เป็นสเปกตรัมแถบกว้างและเห็นรูปร่างที่ชัดเจนเพียงเล็กน้อย แต่ลักษณะเฉพาะของสเปกตรัมของไอออนแลนทาไนด์ และแอกติไนด์ นั้นเป็นข้อยกเว้น

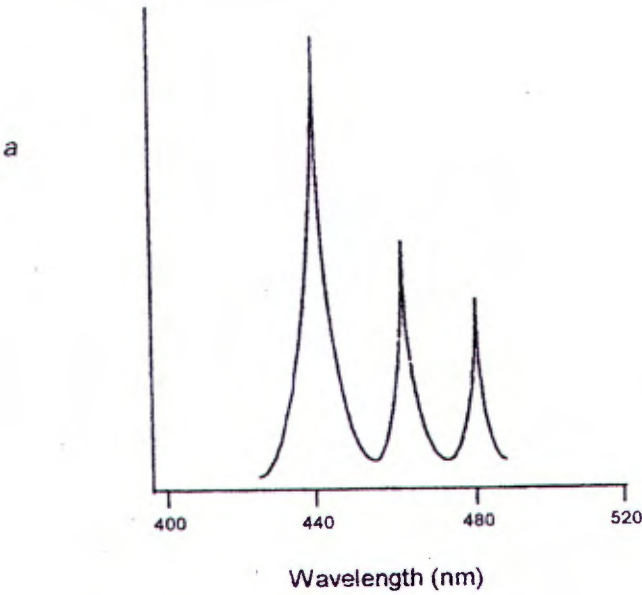
สารประกอบอินทรีย์ที่ดูดกลืนพลังงานในช่วงอัลตราไวโอเลตและวิสิเบิลแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ แอนไอออนของสารประกอบอินทรีย์ ไอออนกลุ่มแลนทาไนด์ แอกติไนด์ และโลหะทรานสิชันแถวที่หนึ่ง และแถวที่สอง

แอนไอออนของสารประกอบอินทรีย์

แอนไอออนของสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเลตและ วิสิเบิลเกิดจากการทรานสิชันชนิด $n \rightarrow \pi^*$ ตัวอย่างของการดูดแสงของไอออนกลุ่มนี้แสดงดังตารางที่ 2 และสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรตแสดงในรูปที่ 12

ตารางที่ 2 แถบการดูดกลืนแสงสูงสุดของแอนไอออนของสารประกอบอินทรีย์บางตัว

ไอออน	λ_{max} (นาโนเมตร)
nitrate ($-\text{NO}_3^-$)	313
carbonate ($-\text{CO}_3^{2-}$)	217
nitrite ($-\text{NO}_2^-$)	360 และ 280
azido	230
trithiocarbonate	500



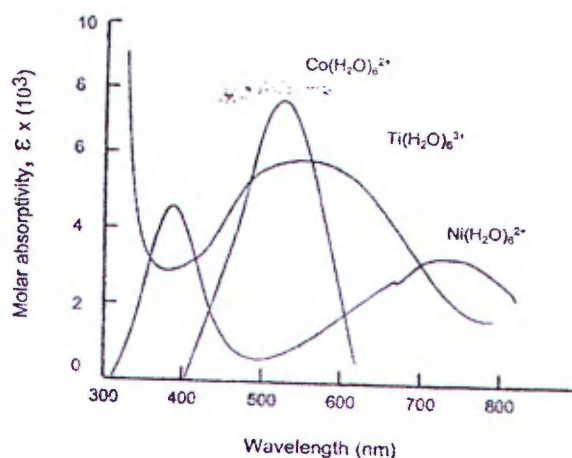
รูป 12 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายโปแตสเซียมไนเตรด

ไอออนกลุ่มแลนทาไนด์ และแอกทิไนด์

ไอออนของธาตุกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะดูดกลืนแสงอัลตราไวโอเล็ต ไอออนกลุ่มนี้จะมีลักษณะของสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่แตกต่างจากสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอินทรีย์โดยทั่วไป สเปกตรัมของไอออนกลุ่มนี้เป็นยอดแหลมแคบมีลักษณะเฉพาะชัดเจนดังตัวอย่างในรูป 13 ซึ่งเป็นสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายพราซีโอดีเมียมคลอไรด์ (praseodymium chloride)

การทรานสิชันของสารประกอบในกลุ่มแลนทาไนด์ เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานของอิเล็กตรอนชนิด $4f$ ส่วนกลุ่มแอกทิไนด์เกี่ยวข้องกับอิเล็กตรอนชนิด $5f$ การดูดกลืนแสง

ของสารกลุ่มนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากผลของตัวทำละลายและกลุ่มที่มาต่อพันธะกับอิเล็กตรอนวงนอกเลย



รูป 13 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายพราซีโอโดอิมเมียมคลอไรด์
(a = ค่าแอบซอร์บิตีวิตี ในหน่วยลิตร, กรัม⁻¹ และเซนติเมตร⁻¹)

อิเล็กตรอนิกทรานซิชันในสารประกอบเชิงซ้อน

The Beer – Lambert Law สารประกอบเชิงซ้อนจะดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้หรืออัลตราไวโอเลตพลังงานที่สารเหล่านี้จะดูดกลืนมีค่าเท่ากับ

$$E = h\lambda$$

$$\text{หรือ } E = hc/\lambda \quad (3.1)$$

เมื่อ	E	เป็นพลังงานของแสงในช่วงที่ถูกดูดกลืน (J)
	h	เป็นค่าคงที่ของพลังค์ (6.62×10^{-34} Js)
	C	เป็นความเร็วของแสง (3.00×10^8 ms ⁻¹)
	λ	เป็นความยาวคลื่น (nm)

แสงช่วงที่มองเห็นได้นั้นมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 nm จนถึง 700 nm ในการดูดกลืนแสงเรามักจะคุ้นเคยกับคำกล่าวที่ว่าเป็นไปตามกฎของ Beer – Lambert ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$A = \log_{10}(I_0/I_t) = \epsilon Cl \quad (3.2)$$

เมื่อ	A	เป็นค่าการดูดกลืนแสง (absorbance)
	I_0	เป็นความเข้มของแสงที่ตกกระทบ (the incident intensity)
	I_t	เป็นความเข้มของแสงที่ส่งผ่านออกมา (the transmitted intensity)
	ϵ	เป็นค่า molar extinction Coefficient หรือ the molar absorptivity ซึ่งเป็นฟังก์ชันของแสงที่ตกกระทบ

l เป็น path length

C เป็นความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนแสง

ในสารละลายหรือของแข็งเรามักพบสเปกตรัมเป็นแถบกว้างซึ่งในแต่ละแบนด์นี้ประกอบด้วยส่วนของทรานสิชัน ในระดับพลังงานไวเบรชันจากอิเล็กทรอนิกส์ในสถานะพื้นไปยังระดับพลังงานไวเบรชันของอิเล็กทรอนิกส์ในสถานะกระตุ้น ความสำคัญในการวัดความเข้มของอิเล็กทรอนิกส์ทรานสิชันและความเป็นไปได้ว่ามากน้อยขนาดไหน จะไม่ใช่ $\epsilon_{\max}$ หรือ molar absorptivity แต่เป็นพื้นที่ของแบนด์นั่นเอง

Orgel diagram (แผนภาพออเจล)

กรณี d^1

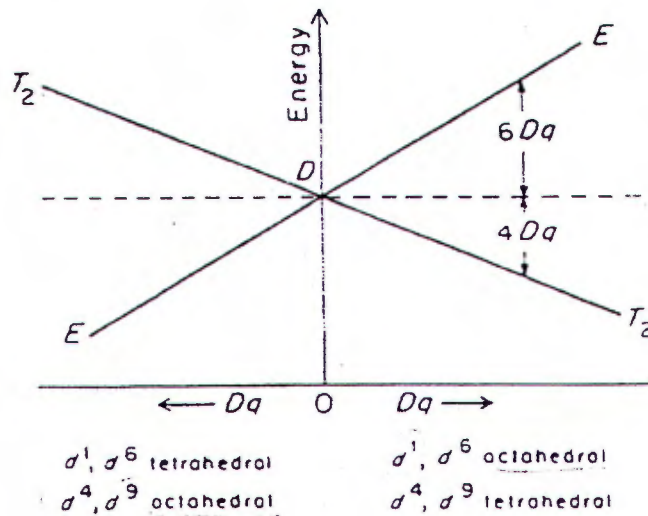
ในโครงแบบ d^1 มีจำนวนไมโครสเตตทั้งหมด 10 อัน ซึ่งถูกแทนด้วยเทอม 2D แต่เมื่อ d ออร์บิทัลอยู่ในสิ่งแวดล้อมของ O_h มันจะถูกแยกออกเป็น e_g และ t_{2g} เซต หรือเรากล่าวได้ว่า 2D (ของอะตอมอิสระ) ถูกแยกออกเป็น 2E และ $^2T_{2g}$ เมื่ออะตอม นั้นอยู่ภายใต้อิทธิพลของ O_h

d^1 เมื่ออยู่ใน Strong field (สนามแรง) มีการจัดอิเล็กตรอนที่เป็นไปได้สองแบบคือ t_{2g}^1 และ e_g^1 t_{2g}^1 นั้นมีจำนวนไมโครสเตตทั้งหมด 6 อัน ซึ่งคือเทอม $^2T_{2g}$ ส่วน e_g^1 นั้นมีจำนวนไมโครสเตตทั้งหมด 4 อันซึ่งสอดคล้องกับเทอม 2E_g ดังนั้นในกรณีที่มิอิเล็กตรอนหนึ่งตัวและมีโครงแบบ d^1, t_{2g}^1 และ e_g^1 เทอมที่สอดคล้อง คือ $^2D, ^2T_{2g}, ^2E_g$

ถ้าเราพล็อตระดับพลังงานของเทอมต่าง ๆ เป็นแกนแนวดิ่งโดยเริ่มตั้งแต่ Dq มีค่าเท่ากับศูนย์เป็นต้นไปและพลังงานของสนามลิแกนด์ที่เกี่ยวข้อง (Dq) เป็นแกนนอน ระดับพลังงานของโครงแบบแต่ละอันนั้นระบุด้วยค่า ligand field stabilization energy (LFSE) ดังนั้น t_{2g}^1 มีค่า LFSE เท่ากับ $-4Dq$ และ e_g^1 มีค่า LFSE เท่ากับ $+6Dq$ ถ้าเราเพิ่มความแรงของสนามลิแกนด์ใน O_h มากขึ้นเรื่อย ๆ มีผลทำให้ความแตกต่างของระดับพลังงานของ 2E และ $^2T_{2g}$ เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ความแตกต่างของระดับพลังงานของเทอมทั้งสองเท่ากับ $10 Dq$

กรณี d^6

d^6 high – spin (สปินสูง) เทอมที่ได้คือ 5D ซึ่งเมื่ออยู่ภายใต้สนามของ O_h แล้วจะถูกแยกออกเป็น 5E_g และ $^5T_{2g}$ (เทอมต่าง ๆ ในกรณี d^6 คล้ายคลึงกับเทอมที่ได้ใน d^1 ต่างกันเพียงค่ามัลติพลิตี เท่านั้นเอง) d^6 เมื่ออยู่ในสนามแรง มีการจัดอิเล็กตรอนได้สองแบบคือ $t_{2g}^4 e_g^2$ ให้เทอม $^5T_{2g}$ และ $t_{2g}^3 e_g^3$ ให้เทอม 5E_g เทอมที่ได้จาก d^6 และ d^1 คล้ายคลึงกัน เราสามารถใช้ correlation diagram (แผนภาพสหสัมพันธ์) ร่วมกันได้ ทรานสิชันใน d^6 เกิดขึ้นได้เพียงหนึ่งโอกาสเท่านั้น



รูป 15 แผนภาพสหสัมพันธ์สำหรับโครงแบบ d^1 ในสนามลิแกนด์

กรณี d^1

โครงแบบ d^1 เทอมที่ได้จากสภาพไอออนอิสระก็คือ 2D เหมือนเช่นใน d^1 (ตามหลัก hole formalism) การจัดอิเล็กตรอนมีได้สองแบบคือ $t_{2g}^6 e_g^3$ ซึ่งตรงกับเทอม 2E_g ส่วนอีกแบบคือ $t_{2g}^5 e_g^4$ ซึ่งตรงกับเทอม ${}^2T_{2g}$ (มีระดับพลังงานสูงกว่า) จะเห็นได้ว่าเทอม 2E_g และ ${}^2T_{2g}$ เหมือนเช่นในกรณี d^1 ต่างกันตรงที่ระดับพลังงานกลับกันเท่านั้น แผนภาพสหสัมพันธ์สำหรับโครงแบบ d^1 แสดงในรูป 16 ซึ่งได้จากการต่อเส้นของเทอมที่ได้จาก d^1 ผ่านจุดที่ $Dq = 0$ ไปอีกทางหนึ่ง

กรณี d^4

ในทำนองเดียวกันโครงแบบ d^4 แสดงก็ใช้หลักการของ hole formalism ย่อมได้เทอมต่างๆ คล้ายคลึงกับเทอมที่ได้ของกรณี d^6 นั่นเองแต่ลำดับพลังงานกลับกันเท่านั้น d^4 (สนามอ่อน) ตรงกับเทอม 5D ใน O_h จะมีเทอม 5E_g ซึ่งมีการจัดตัวของอิเล็กตรอนเป็น $t_{2g}^3 e_g^1$ และเทอม ${}^5T_{2g}$ มีการจัดตัวเป็น $t_{2g}^2 e_g^2$ แต่ 5E_g มีระดับพลังงานต่ำกว่า ดังนั้นแผนภาพสหสัมพันธ์ของ d^4 จะตรงกันข้ามกับ d^6 แต่เหมือนของ d^9

กรณี d^2

ภายในสนาม O_h d^2 (ในสภาพไอออนอิสระ) จะให้เทอมสองเทอมคือ 3F และ 3P โดยที่ 3F มีระดับพลังงานต่ำกว่า 3P จาก d^2 เปลี่ยนไปอยู่ในสนามลิแกนด์ที่แรงนั้น มีการจัดตั้งได้ 3 โครงแบบโดยมีระดับพลังงานเพิ่มขึ้นดังนี้

$$t_{2g}^2 < t_{2g}^1 e_g^1 < e_g^2$$

ภายในสนาม 0_h เทอม 3F ถูกแยกออกกลายเป็นเทอมใหม่ 3 เทอมด้วยกันคือ ${}^3T_{1g}$, ${}^3T_{2g}$ และ ${}^3A_{2g}$ ส่วนเทอมของ 3P นั้นจะกลายเป็น ${}^3T_{1g}$ โดยที่ไม่มีการแยกย่อยออกไปได้อีก

แผนภาพสหสัมพันธ์ของ d^2 ซึ่งนำไปใช้กับ d^7 (สนามอ่อน) ได้เช่นกัน ส่วน d^3 และ d^8 จะใช้เทอมที่เป็นส่วนกลับของ d^2 และ สนาม T_d ได้เช่นกัน

แผนภาพ d^3 และ d^8 ของพวก 0_h และ d^2 และ d^7 สำหรับ T_d เส้นของเทอม $T_1(F)$ ที่เดิมแตกออกมาจากเทอม F นั้น หรือเขียนแทนที่ $T_1(F)$ เมื่อค่า D_q เพิ่มขึ้นมันก็มีระดับพลังงานเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่เทอม T_1 ซึ่งมาจากเทอม P นั้นหรือ $T_1(P)$ ไม่เปลี่ยนแปลงตามไปตาม D_q ไปเป็นเส้นตรงแน่นอนว่ามันจะต้องตัดกัน แต่ในความเป็นจริงหาเป็นเช่นนั้นไม่ เส้นทั้งสองจะไม่ตัดกัน แต่จะเบี่ยงเบนห่างกันออกไป เช่นนี้เป็นไปตาม noncrossing rule

ประโยชน์ของอออนเชิงซ้อนในเคมีวิเคราะห์

ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอออนเชิงซ้อนมักจะนำมาใช้ในการทำคุณภาพวิเคราะห์สำหรับธาตุต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์อยู่ 2 ประการคือ

1. ใช้ในการทดสอบอออนของโลหะแต่ละชนิด โดยที่อออนของโลหะนั้นๆ อาจเกิดสารเชิงซ้อนที่มีสีหรือเกิดตะกอนกับเอเจนต์เฉพาะที่ทำให้เกิดสารเชิงซ้อนได้
2. ใช้ในการแยกอออน 2 ชนิด ออกจากกัน โดยการเติมเอเจนต์ที่ทำให้เกิดสารเชิงซ้อนกับอออนตัวใดตัวหนึ่งใน 2 ตัวนั้น

ประโยชน์ทั่วไปของสารประกอบเชิงซ้อน

1. เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีอินทรีย์ เคมีวิเคราะห์ และชีวเคมี
2. ประโยชน์ในการอุตสาหกรรมสิ่งทอ การย้อมสี ทั้งนี้เพราะสารประกอบเชิงซ้อนหลายชนิดที่มีสีและไม่ละลายในน้ำจึงนำไปใช้เป็นสีย้อมได้
3. สารเชิงซ้อนอาจนำไปใช้ในการแก้ไขความกระด้างของน้ำ โดยให้ไปจับกับอออนต่างๆ เช่น Ca^{2+} และ Mg^{2+} ซึ่งเป็นตัวการในการทำให้น้ำกระด้าง
4. ในห้องปฏิบัติการทางเคมีวิเคราะห์ทั้งคุณภาพวิเคราะห์ และปริมาณวิเคราะห์ก็มีการนำสารเชิงซ้อนมาใช้กันมากมาย โดยเฉพาะการหาปริมาณอออนของโลหะที่มีปริมาณน้อยๆ นิยมใช้วิธีการที่ทำให้โลหะนั้นเกิดเป็นอออนเชิงซ้อนที่เหมาะสมซึ่งจะแยกออกมาวิเคราะห์หาปริมาณได้ง่ายขึ้น
5. ได้มีผู้วิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาสารเชิงซ้อนให้อยู่ในรูปพอลิเมอร์ เพราะสารพวกนี้มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อสารเคมี และมีเสถียรภาพที่ดีอุณหภูมิสูงๆ
6. สารที่เป็นคีเลต (chelation agents) หลายตัวที่เกิด complexing action กับโลหะซึ่งนำไปใช้ในการลดผลของการเจ็บป่วยของสารกัมมันตรังสีที่ได้จากปฏิกิริยานิวเคลียร์

7. การเกิดสนิมเหล็ก เป็นผลมาจากโลหะเหล็กรวมกับออกซิเจนในอากาศและความชื้นกลายเป็นออกไซด์สีแดงน้ำตาลของเหล็กออกไซด์ที่มีสูตรเป็น $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งเรียกว่าสนิมเหล็ก แต่ถ้าเรานำเหล็กเหล่านั้นไป treat ด้วยสารที่เป็นลิแกนด์เพื่อให้เกิดสารเชิงซ้อนของเหล็กอยู่ที่ผิวของเหล็กนั้นเสียก่อนก็จะทำให้เหล็กนั้นไม่ขึ้นสนิม นอกจากนั้นเราอาจกำจัดเหล็กที่อยู่ในรูปสนิมเหล็กได้โดยให้เกิดเป็นอออนเชิงซ้อนที่ละลายได้ จากนั้นก็อาจจะล้างให้หลุดออกมาจากผิวของเหล็กได้ ในปัจจุบันจึงมีผู้ผลิตสารต่างๆ ที่เกิดเป็นอออนเชิงซ้อนกับเหล็กสำหรับการป้องกันการหรือควบคุมในการเกิดสนิมเหล็ก
8. ในทางเกษตรกรรมอาจใช้การเกิดสารเชิงซ้อนในการแก้ไขสภาพของดินให้ดีขึ้น เพราะมีสารเชิงซ้อนหลายตัว เมื่อเกิดโคออร์ดิเนชันกับโลหะแล้วอาจทำให้มันเกาะแน่นกับโลหะนั้นจนกระทั่งพืชไม่สามารถนำโลหะนั้นเข้าไปได้ กรณีนี้อาจใช้กับโลหะที่เป็นพิษต่อพืช นอกจากนั้น อออนเชิงซ้อนของโลหะบางตัวที่พืชนำเข้าไปใช้ประโยชน์ได้ง่ายและดีกว่าเมื่อโลหะนั้นอยู่ในสถานะอิสระ
9. ในอุตสาหกรรมการชุบหรือเคลือบโลหะใช้สารละลายของอออนเชิงซ้อนของโลหะในการทำอิเล็กโทรลิซิส ให้โลหะไปเกาะที่วัตถุที่ต้องการชุบหรือเคลือบให้เรียบและสม่ำเสมอ การละลายของอออนเชิงซ้อนที่ละลายกันมากได้แก่ $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$ และ $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$
10. ในการศึกษาเกี่ยวกับสารประกอบเชิงซ้อนในเวลาต่อมาทราบว่า ธาตุบางชนิดที่มีในสิ่งมีชีวิตจะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนเช่น ฮีโมโกลบินซึ่งมีในเลือดเป็นสารเชิงซ้อนของเหล็ก ทำหน้าที่พาออกซิเจนจากปอดไปสู่เนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกาย คลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นสารสีเขียวในพืชทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสง เป็นสารเชิงซ้อนของแมกนีเซียมและวิตามินบี 12 เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโคบอลต์ที่มีสีแดงเข้มในทางการแพทย์อาจใช้สารเชิงซ้อนของโลหะปนกับอาหารให้ผู้ป่วยดื่มหรือกินเข้าไป เป็นต้น

ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงสนใจการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu (II) กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ เพื่อที่จะศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้และเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu (II) กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบผลของลิแกนด์ที่มีต่อพลังงานการทรานซิชันใน d-orbital ของโลหะ Cu(II)

1.2 การตรวจสอบเอกสาร

สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรืออาจเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า สารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination compound) ชื่อภาษาอังกฤษ complex compound นั้น เป็นชื่อที่ใช้กันมาในสมัยแรกๆ ที่เริ่มรู้จักสารประเภทนี้ เนื่องจากในขณะนั้นความรู้ในทางทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมี

ยังไม่ก้าวหน้ามากพอที่จะอธิบายการเกิดพันธะในสารพวกนี้ได้ ในสมัยนั้นจึงเรียกลักษณะนี้ว่า complex compound (complex แปลว่าซับซ้อน ขาดต่อการเข้าใจ) ส่วนชื่อ coordinaton compound นั้น เป็นชื่อที่เพิ่งนิยมใช้กันในช่วงหลัง เมื่อมีการศึกษาสารพวกนี้ละเอียดแล้ว และนิยมใช้กันมาจนถึงปัจจุบันเช่นกัน

กล่าวโดยกว้างๆ ได้ว่าสารประกอบเชิงซ้อนจะประกอบด้วยอะตอมกลาง (central atom) เป็นหลัก และมีอะตอม (หรือโมเลกุล) อื่นอยู่ล้อมรอบ เรียกว่าลิแกนด์ (Ligand) ตั้งแต่ 2 อะตอม (หรือโมเลกุล) ขึ้นไป มีพันธะเคมีเกิดขึ้นเพื่อยึดให้ติดกับอะตอมกลางและอาจมีประจุ (บวกหรือลบ) หรือไม่มีก็ได้ จำนวนอะตอม (หรือโมเลกุล) ที่ล้อมรอบนี้อาจมีเท่าไรก็ได้ ตั้งแต่ 2 ขึ้นไปจนถึง 12 และเรียกว่าเลขโคออร์ดิเนชัน (coordination number) ของอะตอมกลาง แต่ที่พบบ่อยคือ 4 และ 6 (รศ.ฤดีวรรณ บุญรัตน์, 2533)

ธรรมชาติของลิแกนด์ทำให้ช่องว่าง (band gap) ระหว่าง d-orbital ของโลหะกว้างขึ้น ลิแกนด์ที่ทำให้ช่องว่างของ d-orbital กว้างมากเรียกลิแกนด์นั้นว่า strong field ligand และ weak field ligand จะทำให้ช่องว่างระหว่าง d-orbital ไม่กว้างมาก ลำดับของความสามารถของลิแกนด์ดังกล่าวเรียกว่า spectrochemical series

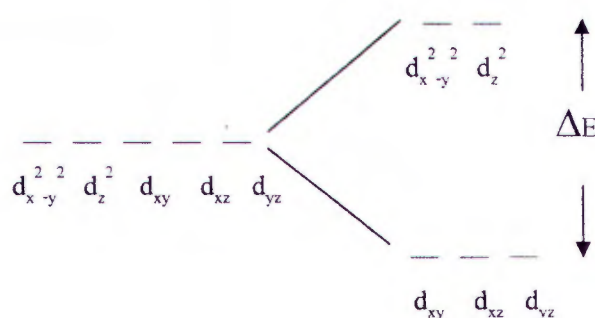
ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงแสงที่มองเห็น (visible light) แสดงผลของลิแกนด์ที่มีต่อช่องว่างระหว่าง d-orbital (<http://www.wou.edu/las/physci/ch462/tmccolors.htm>)

Co ³⁺ complex	Wavelength of light absorbed (nm)	Color of light absorbed	Color seen
[CoF ₆] ³⁻	700	red	green
[Co(H ₂ O) ₆] ³⁺	600	orange	blue
[Co(NH ₃) ₅ Cl] ²⁺	535	yellow	violet
[Co(NH ₃) ₅ H ₂ O] ³⁺	500	blue-green	red
[Co(NH ₃) ₆] ³⁺	475	blue	yellow-orange
[Co(CN) ₆] ³⁻	310	ultraviolet	tail of absorption band in visible gives pale yellow

การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu(II) กับลิแกนด์ N,N-Bis(3,5-dimethylpyrazol-1-ylmethyl)-1-hydroxy-2-aminoethane ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายในการสังเคราะห์และศึกษาโครงสร้างของผลึกเดี่ยวของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ : N,N-bis(3,5-dimethylpyrazol-1-ylmethyl)-1-hydroxy-2-aminoethane] (3,5-dimethylpyrazole)copper (II) dinitrate ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction พบว่าโลหะ Cu(II) จะเกิดพันธะกับอะตอมไนโตรเจนของ pyrazole สองโมเลกุล และไนโตรเจนของ tertiary amine และ 3,5-dimethylpyrazole (Mohamed El Kodadi และคณะ, 2003)

การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu(II) กับลิแกนด์ 3-cinnamalideneacetone และศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงเพื่อการทราบสีของโลหะพบว่าเป็นการทราบสีทั้งในสารประกอบเตตระฮีดรอนที่มีการยึดออก และพบว่ามีโครงสร้างแบบออกเตฮีดรอนที่สมมาตร (Veeraraj A. และคณะ, 2000)

ความแตกต่างของโครงสร้างของลิแกนด์ทำให้การทราบสีของโลหะใน d-orbital มีพลังงานที่ต่างกัน (ΔE) และส่งผลให้ระดับช่วงของแสงที่สามารถมองเห็นได้ต่างกันด้วยตามทฤษฎี CFT ดังนั้นการดูดกลืนแสงช่วงที่มองเห็นได้ของสารประกอบเชิงซ้อนอาจจะเป็นการทราบสีของอิเล็กตรอนจากออร์บิทัลที่มีพลังงานต่ำไปยังออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงและสีของสารประกอบเชิงซ้อนที่เห็นคือสีที่ไม่ถูกดูดกลืน (Woodrow Wilson)



1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน Cu (II) กับลิแกนด์ Aniline, *n*-Butylamine, Dibutylamine, *N*-Methylaniline, *N,N*-Dimethylaniline, Pyridine และ Phenylhydrazine
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้
3. ศึกษาและเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนด้วยแผนผัง Complementary colors
4. เปรียบเทียบพลังงานการทรานซิชันของลิแกนด์ชนิดต่างๆ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาเรียนรู้วิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนของ Cu(II)
2. ทราบสมบัติทางกายภาพของสารประกอบที่สังเคราะห์ได้
3. สามารถเปรียบเทียบความแรงของลิแกนด์จากการศึกษาพลังงานการทรานซิชัน
4. ความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนชนิดอื่นได้กว้างขวางยิ่งขึ้น
5. เป็นงานวิจัยตัวอย่างสำหรับผู้ที่มีความสนใจในการทำการวิจัยครั้งต่อไป

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1. เป็นการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ กับลิแกนด์ *N* - Methylaniline, *N,N* - Dimethylaniline, Dibutylamine, Pyridine, Aniline, *n* - Butylamine และ Phenylhydrazine
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารประกอบเชิงซ้อน
3. ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนชนิดต่างๆ ด้วยแผนผัง Complementary colors
4. เปรียบเทียบพลังงานการทรานซิชันของลิแกนด์ชนิดต่างๆ

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

สารเคมี

1. $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
2. *N*-Methylaniline
3. *N,N*-Dimethylaniline
4. Dibutylamine
5. Pyridine
6. Aniline
7. *n*-Butylamine
8. Phenylhydrazine
9. Ethanol
10. Methanol
11. Dichlorometane
12. Chloroform
13. Hexane
14. Ethylacetate
15. Diethylether
16. Acetone

อุปกรณ์การทำวิจัย

1. Melting Point Buchi 545
2. Thinlayer Chromatography ; TLC
3. Water bath
4. Hot plate
5. Thermometer
6. Volumetric flasks
7. Beakers
8. Stirring rod
9. Test tubes

10. Test tubes rack
11. Spectular
12. Dropper
13. Cappillary
14. Cylinder
15. Glasses
16. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
17. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
18. เครื่องกรองแบบลดความดัน
19. ตู้อบ
20. กระดาษกรองเบอร์ 2
21. น้ำกลั่น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. กำหนดเรื่องที่จะศึกษา
2. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารต่างๆ
3. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อนำเสนองานวิจัย
4. เขียนเค้าโครงงานวิจัย
5. นำเสนออาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อขอคำแนะนำ
6. ดำเนินการทดลองตามโครงการ

การทดลองที่ 1. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ

1. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
 - 1.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.78 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
 - 1.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที
 - 1.3 เติมลิกแกนด์ *N-Methylaniline* 1 mL ที่ละลายแล้ว สังเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
 - 1.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
 - 1.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล

- 1.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
2. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
 - 2.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.66 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
 - 2.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ 40 – 45 °C เป็นเวลา 10 นาที
 - 2.3 เติมลิแกนด์ *N,N*-Dimethylaniline 1 mL ที่ละลาย สังกเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
 - 2.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ 40–45°C เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
 - 2.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
 - 2.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
3. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
 - 3.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.49 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
 - 3.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ 40–45°C เป็นเวลา 10 นาที
 - 3.3 เติมลิแกนด์ Dibutylamine 1 mL ที่ละลาย สังกเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
 - 3.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ 40–45°C เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
 - 3.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
 - 3.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
4. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
 - 4.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1.05 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
 - 4.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ 40–45°C เป็นเวลา 10 นาที
 - 4.3 เติมลิแกนด์ Pyridine 1 mL ที่ละลาย สังกเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
 - 4.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ 40 – 45 °C เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
 - 4.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล

- 4.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
5. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
- 5.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.93 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
- 5.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที
- 5.3 เติมลิแกนด์ Aniline 1 mL ที่ละลายแล้ว สังเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
- 5.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
- 5.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
- 5.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
6. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
- 6.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.84 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
- 6.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที
- 6.3 เติมลิแกนด์ $n\text{-Butylamine}$ 1 mL ที่ละลายแล้ว สังเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
- 6.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(n\text{-butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
- 6.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
- 6.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
7. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$
- 7.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.87 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
- 7.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที
- 7.3 เติมลิแกนด์ Phenylhydrazine 1 mL ที่ละลายแล้ว สังเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
- 7.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ เกิดขึ้น
- 7.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
- 7.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์

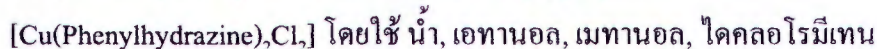
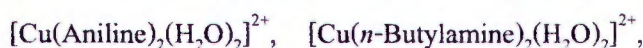
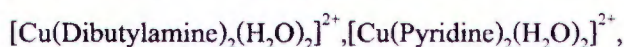
การทดลองที่ 2 การทดสอบทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี (Thinlayer Chromatography ; TLC)

โดยใช้ซิลิกาเจลเป็นตัวดูดซับ และใช้เอทิลอะซิเตตเป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่

1. spot $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ ลงบนตัวดูดซับ
2. เมื่อตัวทำละลายเคลื่อนที่ขึ้นไปเกือบถึงส่วนบนของแผ่นแก้วก็นำออกมาทำเครื่องหมาย บอกระยะทางที่สารประกอบ และตัวละลายเคลื่อนที่ไปถึง
3. หาค่า R_f ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะทางที่สารประกอบเคลื่อนที่กับระยะทางที่ตัวทำละลายเคลื่อนที่ ดังนี้

$$R_f = \frac{\text{ระยะทาง (cm) ที่สารประกอบเคลื่อนที่}}{\text{ระยะทาง (cm) ที่ตัวทำละลายเคลื่อนที่}}$$

การทดลองที่ 3 การทดสอบความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อน



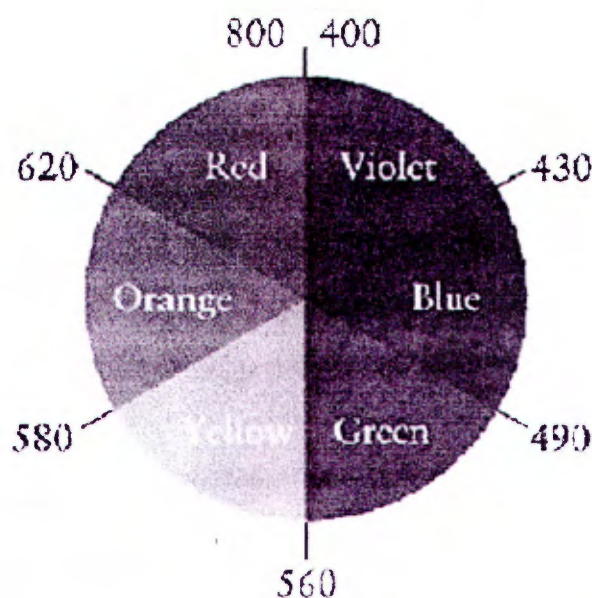
คลอโรฟอร์ม, อะซิโตน, เฮกเซน, เอทิลอะซิเตต และไดเอทิลอีเทอร์ เป็นตัวทำละลาย

1. แบ่งตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิดในปริมาณที่เท่าๆกันลงในหลอดทดลอง 9 หลอด เติมตัวทำละลายลงในหลอดทดลอง หลอดละ 3 mL ตามลำดับ คนจนตะกอนละลาย
2. เปรียบเทียบความสามารถการละลายของตะกอนสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิดในตัวทำละลายชนิดต่างๆ บันทึกผล

การทดลองที่ 4 ศึกษาจุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้เครื่องมือ Melting Point

1. บรรจุ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ลงในหลอดแคปิลลารีให้มีความสูงประมาณ 0.4-0.5 cm หาดจุดหลอมเหลวของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ บันทึกช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว
2. บรรจุ $[\text{Cu}(N\text{-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(N,N\text{-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ ตัวอย่างละ 1 หลอด หาดจุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนทั้ง 7 ชนิด บันทึกช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว

การทดลองที่ 5 ศึกษาความแรงของลิแกนด์โดยพิจารณาจาก Complementary colors



แผนผัง Complementary colors

1. บันทึกสีของสารละลายของสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิดแล้วนำไปเทียบหาความยาวคลื่นจากแผนผังการดูดกลืนแสง (Complementary colors)
2. เปรียบเทียบพลังงานในการทรานซิชัน (ความแรงของลิแกนด์) ของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu (II) ที่มีลิแกนด์ต่างชนิดกัน

บทที่ 3

ผลและการอภิปรายผล

ผลการทดลอง

1. ผลการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{n-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ และ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ ดังตาราง

ตารางที่ 1 แสดงลักษณะทางกายภาพของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้

สารประกอบเชิงซ้อน	ลักษณะทางกายภาพ
$[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	ตะกอนเป็นผงสีม่วง น้ำหนักของตะกอน 0.87 g
$[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	ตะกอนเป็นผงสีน้ำเงิน น้ำหนักของตะกอน 0.32 g
$[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	ตะกอนเป็นผงสีเขียว น้ำหนักของตะกอน 0.47 g
$[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	ตะกอนเป็นผงสีฟ้า น้ำหนักของตะกอน 1.34 g
$[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	ตะกอนเป็นผงสีเขียว น้ำหนักของตะกอน 1.26 g
$[\text{Cu}(\text{n-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	ตะกอนเหนียวสีเขียว น้ำหนักของตะกอน 0.65 g
$[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$	ตะกอนเป็นผงสีเหลือง น้ำหนักของตะกอน 0.50 g

อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ในตัวทำละลายเอทานอลกับลิแกนด์ชนิดต่างๆ จะมีสารประกอบเชิงซ้อนเกิดขึ้น แต่สีของตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของลิแกนด์ที่ใช้ในการสังเคราะห์

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้

สารประกอบเชิงซ้อน	เปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์ (%)
$[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	60.87
$[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	23.08
$[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	62.07
$[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	85.85
$[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	81.63
$[\text{Cu}(\text{n-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	53.06
$[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$	27.45

อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ ในตัวทำละลายเอทานอล จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่มีเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์สูงแสดงว่าสถานะที่ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนมีความเหมาะสม สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของ $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})]$ และ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ มีค่าเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์น้อย อาจเนื่องมาจากตัวทำละลายที่ใช้ในการทดลองไม่เหมาะสม

1. ผลการทดสอบThin Layer Chromatography (TLC)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่า R_f ของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้เอทิลอะซิเตตเป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่

สารประกอบเชิงซ้อน	R_f ของสารประกอบเชิงซ้อน (cm)	R_f ของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (cm)
	เอทิลอะซิเตต	เอทิลอะซิเตต
$[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	0	0.29
$[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	0	0.22
$[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	0	0.18
$[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	0	0.19
$[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	0	0.24
$[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	0	0.19
$[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$	0.69	0.19

อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดสอบThin Layer Chromatography (TLC) ของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ซิลิกาเจลเป็นตัวดูดซับ และใช้เอทิลอะซิเตตเป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่ ค่า R_f ของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ จะเคลื่อนที่บนตัวดูดซับแสดงว่า $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มีสภาพขั้วต่ำ หรือเป็นกลาง สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของ $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ ไม่เคลื่อนที่บนตัวดูดซับ แสดงว่าเป็นสารประกอบที่มีสภาพขั้วสูง หรือมีประจุ ส่วน $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ เคลื่อนที่บนตัวดูดซับเนื่องจากลิแกนด์เข้าแทนที่น้ำจึงทำให้มีสภาพขั้วต่ำ หรือเป็นกลาง (สารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุรวมเป็นศูนย์)

3. ผลการทดสอบความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 4 ความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อนโคออร์ดิเนตเชิงซ้อนละลายในตัวทำละลายต่างๆ

สารประกอบเชิงซ้อน	ตัวทำละลาย								
	น้ำ	เอทานอล	เมทานอล	ไคคลอโรมีเทน	คลอโรฟอร์ม	เฮกเซน	อะซิโตน	เอทิลอะซิเตท	ไดเอทิลอีเทอร์
[Cu(N-Methylaniline) ₂ (H ₂ O) ₂] ²⁺	+	+	+	+	+	-	+	-	-
[Cu(N,N-Dimethylaniline) ₂ (H ₂ O) ₂] ²⁺	+	+	+	+	-	-	+	+	-
[Cu(Dibutylamine) ₂ (H ₂ O) ₂] ²⁺	-	+	+	-	+	-	+	+	-
[Cu(Pyridine) ₂ (H ₂ O) ₂] ²⁺	-	+	+	+	+	-	+	+	-
[Cu(Aniline) ₂ (H ₂ O) ₂] ²⁺	-	+	+	+	+	-	+	+	+
[Cu(<i>n</i> -Butylamine) ₂ (H ₂ O) ₂] ²⁺	-	+	-	+	+	-	+	+	+
[Cu(Phenylhydrazine) ₂ Cl ₂]	+	+	+	+	+	-	+	+	+

หมายเหตุ – ไม่ละลาย, + ละลายได้บางส่วน, ++ ละลายหมด

ตารางที่ 5 ความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อน โดยใช้ตัวทำละลายละลายในสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิด

ตัวทำละลาย	สารประกอบเชิงซ้อน						
	[Cu(<i>N</i> -Methylaniline) ₂] (H ₂ O) ₂ ²⁺	[Cu(<i>N,N</i> -Dimethylaniline) ₂] (H ₂ O) ₂ ²⁺	[Cu(Dibutylaniline) ₂] (H ₂ O) ₂ ²⁺	[Cu(Pyridine) ₂] (H ₂ O) ₂ ²⁺	[Cu(Aniline) ₂] (H ₂ O) ₂ ²⁺	[Cu(<i>n</i> -Butylaniline) ₂] (H ₂ O) ₂ ²⁺	[Cu(Phenylhydrazine) ₂] Cl ₂
อะซิโตน	+	+	+	+	+	+	++
น้ำ	+	+	-	-	-	-	+
เอทานอล	+	+	+	+	+	+	++
เมทานอล	+	+	+	+	+	-	+
ไดคลอโรมีเทน	+	+	-	+	-	+	++
คลอโรฟอร์ม	+	-	+	+	+	+	+
เฮกเซน	-	-	-	-	-	-	+
เอทิลอะซิเตท	+	+	+	+	+	+	++
ไดเอทิลเอเทอร์	-	-	-	-	+	+	+

หมายเหตุ – ไม่ละลาย, + ละลายได้บางส่วน, ++ ละลายหมด

อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดสอบความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อนของ

$[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$,
 $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{n-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$,

$[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ ในตัวทำละลายต่างๆ สารประกอบเชิงซ้อนของ

$[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$,
 $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{n-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ ซึ่งมีประจุจะละลายใน

ตัวทำละลายที่มีสภาพขั้วใกล้เคียงกัน (like dissolve like) สำหรับสารประกอบเชิงซ้อนของ

$[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ มีสภาพขั้วต่ำหรือเป็นกลาง แต่สามารถละลายในตัวทำละลายต่างๆ ที่มีสภาพขั้วได้ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากธรรมชาติของลิแกนด์

4. ผลการศึกษาจุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 6 จุดหลอมเหลวของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

สารตั้งต้น	ช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว (°C)
$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	136.5-137.4

ตารางที่ 7 จุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้

สารประกอบเชิงซ้อน	ช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว (°C)
$[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	194.0-210.5
$[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	130.6-135.0
$[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	139.4-157.8
$[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	219.7-242.2
$[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	128.5-133.4
$[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$	91.6-115.1

อภิปรายผลการทดลอง

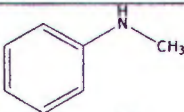
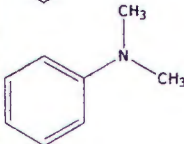
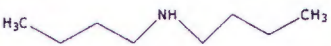
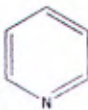
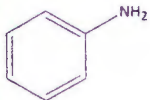
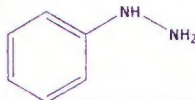
จากการศึกษาจุดหลอมเหลวของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ สารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ สรุปได้ว่า $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ มีช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวที่แคบคือ 1 °C แสดงว่า $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เป็นสารบริสุทธิ์ ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้มีช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลวที่กว้าง แสดงว่า

สารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ยังไม่บริสุทธิ์ อาจเนื่องมาจากสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ ยังไม่ได้มีการตกผลึกใหม่อีกครั้ง

5. ผลการศึกษาความแรงของลิแกนด์โดยการพิจารณาจากแผนผัง Complementary colors

ตารางที่ 8 แสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากการเทียบสีจากแผนผัง

Complementary colors

สารประกอบเชิงซ้อน	สีของสารละลาย	$\lambda_{\max}$	โครงสร้างของลิแกนด์
$[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	ม่วง	580-560	
$[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	น้ำเงิน	620-580	
$[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	เขียว	800-620	
$[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	ฟ้า	620-580	
$[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	เขียว	800-620	
$[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$	เขียว	800-620	
$[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$	เหลือง	430-400	

อภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาความแรงของลิแกนด์โดยการเทียบจากแผนผัง Complementary Colors สรุปได้ว่า สารประกอบเชิงซ้อนของ $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$

และ $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ มีค่าความยาวคลื่น (λ_{max}) สูงสุด รองลงมาคือ $[\text{Cu}(N,N\text{-Dimethylaniline})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(N\text{-Methylaniline})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ และ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2 \text{Cl}_2]$ สามารถเรียงลำดับตามระดับพลังงานในการทรานซิชันได้ดังนี้

$[\text{Cu}(N\text{-Methylaniline})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+} > [\text{Cu}(N,N\text{-Dimethylaniline})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+} > [\text{Cu}(\text{Pyridine})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
 $> [\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+} > [\text{Cu}(\text{Aniline})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ และ $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2 (\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$

ดังนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้สามารถเรียงลำดับความแรงของลิแกนด์ ได้ดังนี้ $N\text{-Methylaniline} > N,N\text{-Dimethylaniline}$, $\text{Pyridine} > \text{Dibutylamine}$, Aniline และ $n\text{-Butylamine}$ แต่ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2 \text{Cl}_2]$ เปรียบเทียบความแรงของลิแกนด์ไม่ได้ เพราะ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2 \text{Cl}_2]$ มีลิแกนด์เป็นคลอไรด์ (Cl) ไม่เหมือนกับสารประกอบเชิงซ้อนชนิดอื่นๆ

บทที่ 4

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu (II) กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ คือ

N-Methylaniline, *N,N*-Dimethylaniline, Dibutylamine, Pyridine, Aniline, *n*-Butylamine และ Phenylhydrazine ให้เปอร์เซ็นต์ผลึกภัณฑ์สูง และพบว่า $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ ให้ค่าสูงสุดคือ 83.87 % แสดงว่าสภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์มีความเหมาะสม และสารที่สังเคราะห์ได้น่าจะมีสูตรโมเลกุลตรงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ในการศึกษาลำดับความแรงของลิแกนด์ของสารประกอบเชิงซ้อนด้วยแผนผัง Complementary colors พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้สามารถเรียงลำดับความแรงของลิแกนด์ ได้ดังนี้ *N*-Methylaniline > *N,N*-Dimethylaniline, Pyridine > Dibutylamine, Aniline และ *n*-Butylamine แต่ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ เปรียบเทียบความแรงของลิแกนด์ไม่ได้ เพราะ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ มีลิแกนด์เป็นคลอไรด์ (Cl) ไม่เหมือนกับสารประกอบเชิงซ้อนชนิดอื่นๆ

ข้อเสนอแนะ

1. สารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ควรใส่ในภาชนะที่ปิดมิดชิดและเก็บให้พ้นแสงและความชื้น
2. ควรมีการตกผลึกสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์เพื่อทำให้สารมีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น
3. ในการทำวิจัยแต่ละครั้ง ควรตรวจสอบอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ ว่ามีตรงตามวัตถุประสงค์หรือไม่ และต้องตรวจสอบว่าอยู่ในสภาพที่ใช้งานได้หรือไม่เช่นกัน
4. ในการทำวิจัยครั้งต่อไปควรที่จะมีการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นโลหะตัวอื่นเช่น Cobalt (Co), Zinc (Zn), Chromium (Cr) เป็นต้น และใช้ลิแกนด์อื่นเช่น Carbonyl (CO), Nitrosyl (NO), Chloro (Cl⁻), Bromo (Br⁻) เป็นต้น

บรรณานุกรม

- จันทร์หา ชัยมงคล. (2525). อนินทรีย์เคมี (Inorganic Chemistry) ทฤษฎีและโครงสร้าง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเคียนสโตร.
- สมรรถน์ วัฒนธรรม. (2526). เคมีอนินทรีย์เชิงทฤษฎี ทฤษฎีกลุ่มกับสเปกโตรสโกปี. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- รศ.ฤดีวรรณ บุญรัตน์. (2533). สารประกอบเชิงซ้อนโลหะทรานซิชัน (Transition Metal Complex). ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันราชภัฏพิบูลสงคราม.
- ลาวัลย์ ศรีพงษ์. (2543). อัตราเร็วโอเลคโตลิติกสเปกโตรสโกปี. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. พิมพ์ครั้งที่ 2 นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ขนิษฐา หาญสูงเนิน. เคมีอนินทรีย์ขั้นสูง. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- <http://www.wou.edu/las/physci/ch462/tmcolors.htm>.

ภาคผนวก ก
เค้าโครงการวิจัย

การสังเคราะห์และศึกษาสนามลิแกนด์ในสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทองแดง กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ

Synthesis and Ligand Field Studies of Copper (II) Complexes with Various Ligands

ประเภทของงานวิจัย	วิจัยพื้นฐาน
สาขาที่ทำการวิจัย	เคมี
ชื่อผู้ทำวิจัย	นางสาวสายใจ แหละหิม Miss. Saijai Hlacheem นางสาวซูไฮลี กะนา Miss. Suhailee Kana
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ปวีณา หนูคง อาจารย์ดวงรัตน์ ทองคำ
สถานที่ทำการทดลอง	โปรแกรมวิชา เคมี และศูนย์วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหาที่ทำการวิจัย

สารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) หรืออาจเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า สารประกอบโคออร์ดิเนชัน (Coordination Compound) ชื่อภาษาอังกฤษ Complex Compound นั้น เป็นชื่อที่ใช้กันมาในสมัยแรก ๆ ที่เริ่มรู้จักสารประเภทนี้ เนื่องจากในขณะนั้นความรู้ในทางทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมียังไม่ก้าวหน้ามากพอที่จะอธิบายการเกิดพันธะในสารพวกนี้ได้ ในสมัยนั้นจึงเรียกสารพวกนี้ว่า Complex Compound (Complex แปลว่าซับซ้อน ยากต่อการเข้าใจ) ส่วนชื่อ Coordination Compound นั้น เป็นชื่อที่นิยมใช้กันในช่วงหลัง เมื่อมีการศึกษาสารพวกนี้อย่างละเอียดแล้วและนิยมใช้กันมาจนถึงปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม ชื่อ Complex Compound ก็ยังคงมีใช้กันอยู่ในปัจจุบันเช่นกัน

กล่าวโดยกว้าง ๆ ได้ว่า สารประกอบเชิงซ้อนจะประกอบด้วยอะตอมกลาง (Central atom) เป็นหลัก และมีอะตอม (หรือโมเลกุล) อื่นอยู่ล้อมรอบ เรียกว่า ลิแกนด์ (ligand) ตั้งแต่ 2 อะตอม (หรือโมเลกุล) ขึ้นไป มีพันธะเคมีเกิดขึ้นเพื่อยึดติดกับอะตอมกลางและอาจมีประจุ (บวกหรือลบ) หรือไม่มีก็ได้ จำนวนอะตอม (หรือโมเลกุล) ที่ล้อมรอบนี้อาจมีเท่าไรก็ได้ ตั้งแต่ 2 ขึ้นไปจนถึง 12 และเรียกว่า เลขโคออร์ดิเนชัน (Coordination number) ของอะตอมกลาง แต่ที่พบบ่อยคือ 4 และ 6

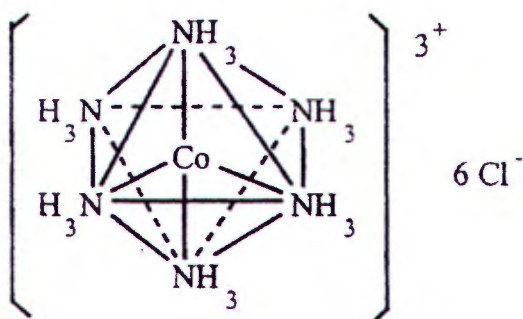
ธาตุต่าง ๆ ในตารางธาตุส่วนใหญ่ทำหน้าที่อะตอมกลางได้ และทราบโคที่มีอะตอมหรือโมเลกุลอื่นมาเกิดพันธะตามลักษณะที่กล่าวมาแล้วนั้น ก็จะอยู่ในข่ายที่เป็นสารประกอบ โคออร์ดิเนชัน แต่อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปมักนิยมใช้เรียกเฉพาะกรณีที่มีอะตอมกลางเป็นพวกโลหะทรานสิชันมากกว่า

ตัวอย่างสารประกอบเชิงซ้อน หรือสารประกอบโคออร์ดิเนชันที่ได้พบมาแล้ว (ในการวิเคราะห์หาอนุมูลต่าง ๆ) เช่น

$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$	มีเลขโคออร์ดิเนชัน	เท่ากับ 2
$[\text{Co}(\text{NCS})_4]^{2-}$	มีเลขโคออร์ดิเนชัน	เท่ากับ 4
$[\text{Ni}(\text{C}_4\text{H}_7\text{N}_2\text{O}_2)_2]$	มีเลขโคออร์ดิเนชัน	เท่ากับ 4
$[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$	มีเลขโคออร์ดิเนชัน	เท่ากับ 6

เป็นที่น่าสังเกตว่า สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานสิชันมักมีสีต่าง ๆ แด่นชัดซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะตัว จึงใช้ประโยชน์ในการบ่งบอกว่า เป็นอะตอมของโลหะใดได้ แต่ทั้งนี้มิได้หมายความว่าสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทุกชนิดจะต้องมีสีเสมอไปบางชนิดอาจไม่มีสีก็ได้

สำหรับการเกิดพันธะและ โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนนั้นจะยกตัวอย่างของ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ ในสารประกอบนี้ ส่วนที่ถือว่าเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่แท้จริงคือ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ เท่านั้น ซึ่งประกอบด้วย NH_3 6 โมเลกุล มีพันธะเคมียึดติดกับ Co (III) เป็นรูปออกตะฮีดรอล ดังรูป



ส่วน Cl^- นั้นจะอยู่ภายนอกมีหน้าที่คงประจุเท่านั้น สารประกอบ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ นี้สังเคราะห์ขึ้นได้จากปฏิกิริยาระหว่างโคบอลต์คลอไรด์, แอมโมเนียมคลอไรด์, แอมโมเนีย และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังสมการ



ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะกระทำในรูปของสารละลาย โดยการละลายสารตั้งต้น แล้วปล่อยให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ แล้วจึงแยกผลิตภัณฑ์ออก ทำให้บริสุทธิ์ต่อไป

สารประกอบเชิงซ้อนเป็นสารประกอบที่มีสี ดังนั้นจึงสามารถดูดกลืนแสงในช่วงแสงมองเห็นได้ และสารประกอบที่มีโลหะกับลิแกนด์ต่างกันก็จะให้สีที่ต่างกัน (คุณสมบัติการดูดกลืนแสงต่างกัน) เช่น $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ สีที่ดูดกลืนคือ สีฟ้า, $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ สีที่ดูดกลืนคือ สีส้ม, $[\text{Co}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ สีที่ดูดกลืนคือ สีส้ม และ $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{2+}$ สีที่ดูดกลืนคือ สีฟ้า

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้ จึงศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ และศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu (II) กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ ที่มีในห้องปฏิบัติการ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน Cu (II) กับลิแกนด์ Aniline, n-Butylamine, Dibutylamine, N-Methylaniline, N,N-Dimethylaniline, Pyridine และ Phenylhydrazine
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้
3. ศึกษาและเปรียบเทียบการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนด้วยแผนผัง Complementary colors
4. เปรียบเทียบพลังงานการทรานซิชันของลิแกนด์ชนิดต่างๆ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ศึกษาเรียนรู้วิธีการเตรียมสารประกอบเชิงซ้อนของ Cu(II)
2. ทราบสมบัติทางกายภาพของสารประกอบที่สังเคราะห์ได้
3. สามารถเปรียบเทียบความแรงของลิแกนด์จากการศึกษาพลังงานการทรานซิชัน
4. ความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ในการทำวิจัยครั้งนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนชนิดอื่นได้กว้างขวางยิ่งขึ้น
5. เป็นงานวิจัยตัวอย่างสำหรับผู้ที่มีความสนใจในการทำวิจัยครั้งต่อไป

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

สารประกอบเชิงซ้อน (complex compound) หรืออาจเรียกได้อีกชื่อหนึ่งว่า สารประกอบโคออร์ดิเนชัน (coordination compound) ชื่อภาษาอังกฤษ complex compound นั้น เป็นชื่อที่ใช้กันมาในสมัยแรกๆ ที่เริ่มรู้จักสารประเภทนี้ เนื่องจากในขณะนั้นความรู้ในทางทฤษฎีเกี่ยวกับการเกิดพันธะเคมียังไม่ก้าวหน้ามากพอที่จะอธิบายการเกิดพันธะในสารพวกนี้ได้ ในสมัยนั้นจึงเรียกสารพวกนี้ว่า complex

compound (complex แปลว่าซับซ้อน ขาดต่อการเข้าใจ) ส่วนชื่อ coordination compound นั้น เป็นชื่อที่เพิ่งนิยมใช้กันในช่วงหลัง เมื่อมีการศึกษาสารพวกนี้อย่างละเอียดแล้ว และนิยมใช้กันมาจนถึงปัจจุบันเช่นกัน

กล่าวโดยกว้างๆ ได้ว่าสารประกอบเชิงซ้อนจะประกอบด้วยอะตอมกลาง (central atom) เป็นหลัก และมีอะตอม (หรือโมเลกุล) อื่นอยู่ล้อมรอบ เรียกว่าลิแกนด์ (Ligand) ตั้งแต่ 2 อะตอม (หรือโมเลกุล) ขึ้นไป มีพันธะเคมีเกิดขึ้นเพื่อยึดให้ติดกับอะตอมกลางและอาจมีประจุ (บวกหรือลบ) หรือไม่มีก็ได้ จำนวนอะตอม (หรือโมเลกุล) ที่ล้อมรอบนี้อาจมีเท่าไรก็ได้ ตั้งแต่ 2 ขึ้นไปจนถึง 12 และเรียกว่าเลขโคออร์ดิเนชัน (coordination number) ของอะตอมกลาง แต่ที่พบบ่อยคือ 4 และ 6 (รศ.ฤดีวรรณ บุญรัตน์, 2533)

ธรรมชาติของลิแกนด์ทำให้ช่องว่าง (band gap) ระหว่าง d-orbital ของโลหะกว้างขึ้น ลิแกนด์ที่ทำให้ช่องว่างของ d-orbital กว้างมากเรียกลิแกนด์นั้นว่า strong field ligand และ weak field ligand จะทำให้ช่องว่างระหว่าง d-orbital ไม่กว้างมาก ลำดับของความสามารถของลิแกนด์ดังกล่าวเรียกว่า spectrochemical series

ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดในช่วงแสงที่มองเห็น (visible light) แสดงผลของลิแกนด์ที่มีต่อช่องว่างระหว่าง d-orbital

(<http://www.wou.edu/las/physci/ch462/tmcolors.htm>)

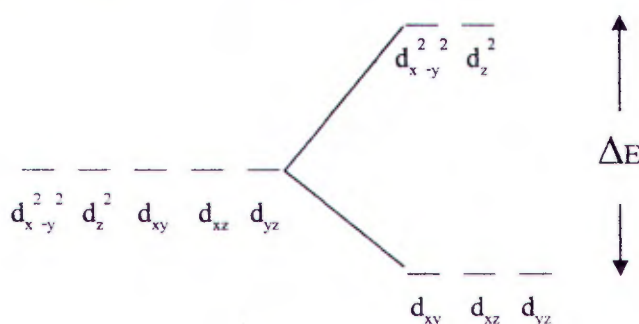
Co ³⁺ complex	Wavelength of light absorbed (nm)	Color of light absorbed	Color seen
[CoF ₆] ³⁻	700	red	green
[Co(H ₂ O) ₆] ³⁺	600	orange	blue
[Co(NH ₃) ₅ Cl] ²⁺	535	yellow	violet
[Co(NH ₃) ₅ H ₂ O] ³⁺	500	blue-green	red
[Co(NH ₃) ₆] ³⁺	475	blue	yellow-orange
[Co(CN) ₆] ³⁻	310	ultraviolet	tail of absorption band in visible gives pale yellow

การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu(II) กับลิแกนด์ N,N-Bis(3,5-dimethylpyrazol-1-ylmethyl)-1-hydroxy-2-aminoethane ใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายในการสังเคราะห์ และศึกษาโครงสร้างของผลิตภัณฑ์ของสารประกอบเชิงซ้อนที่สังเคราะห์ได้ : N,N-bis(3,5-dimethylpyrazol-1-ylmethyl)-1-hydroxy-2-aminoethane] (3,5-dimethylpyrazole)copper (II) dinitrate

ด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction พบว่าโลหะ Cu(II) จะเกิดพันธะกับอะตอมไนโตรเจนของ pyrazole สองโมเลกุล และไนโตรเจนของ tertiary amine และ 3,5-dimethylpyrazole (Mohamed El Kodadi และคณะ, 2003)

การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu(II) กับลิแกนด์ 3-cinnamalideneacetone และศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนแสงเพื่อดูการทรานซิชันของโลหะพบว่าเป็นการทรานซิชันทั้งในสารประกอบเตตระฮีดรอนที่มีการบิดออก และพบว่ามีโครงสร้างแบบออกตะฮีดรอนที่สมมาตร (Veeraraj A. และคณะ, 2000)

ความแตกต่างของโครงสร้างของลิแกนด์ทำให้การทรานซิชันของโลหะใน d-orbital มีพลังงานที่ต่างกัน (ΔE) และส่งผลให้ระดับช่วงของแสงที่สามารถมองเห็นได้ต่างกันด้วยตามทฤษฎี CFT ดังนั้นการดูดกลืนแสงช่วงที่มองเห็นได้ของสารประกอบเชิงซ้อนอาจจะเป็นการทรานซิชันของอิเล็กตรอนจากออร์บิทัลที่มีพลังงานต่ำไปยังออร์บิทัลที่มีพลังงานสูงและสีของสารประกอบเชิงซ้อนที่เห็นคือสีที่ไม่ถูกดูดกลืน (Woodrow Wilson)



วิธีดำเนินการวิจัย

1. กำหนดเรื่องที่จะศึกษา
2. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารต่างๆ
3. ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อนำเสนองานวิจัย
4. เขียนเค้าโครงการงานวิจัย
5. นำเสนออาจารย์ที่ปรึกษาเพื่อขอคำแนะนำ
6. ดำเนินการทดลองตามโครงการ

การทดลองที่ 1. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ กับลิแกนด์ชนิดต่างๆ

1. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
 - 1.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.78 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
 - 1.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ 40–45°C เป็นเวลา 10 นาที
 - 1.3 เติมลิแกนด์ *N*-Methylaniline 1 mL ที่ละลายแล้ว สังเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
 - 1.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ 40–45°C เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
 - 1.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
 - 1.6 ตั้ทั้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
2. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
 - 2.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.66 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
 - 2.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ 40 – 45 °C เป็นเวลา 10 นาที
 - 2.3 เติมลิแกนด์ *N,N*-Dimethylaniline 1 mL ที่ละลายแล้ว สังเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
 - 2.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ 40–45°C เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
 - 2.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
 - 2.6 ตั้ทั้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
3. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
 - 3.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.49 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
 - 3.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ 40–45°C เป็นเวลา 10 นาที
 - 3.3 เติมลิแกนด์ Dibutylamine 1 mL ที่ละลายแล้ว สังเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
 - 3.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ 40–45°C เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
 - 3.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล

- 3.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
4. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
- 4.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1.05 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
- 4.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที
- 4.3 เติมลิแกนด์ Pyridine 1 mL ที่ละลาย สะเก็ดการเกิดตะกอนของสารละลาย
- 4.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
- 4.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
- 4.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
5. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
- 5.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.93 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
- 5.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที
- 5.3 เติมลิแกนด์ Aniline 1 mL ที่ละลาย สะเก็ดการเกิดตะกอนของสารละลาย
- 5.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
- 5.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
- 5.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์
6. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$
- 6.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.84 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
- 6.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที
- 6.3 เติมลิแกนด์ *n*-Butylamine 1 mL ที่ละลาย สะเก็ดการเกิดตะกอนของสารละลาย
- 6.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(n\text{-butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$ เกิดขึ้น
- 6.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
- 6.6 ตั้งทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์

7. การสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$

- 7.1 นำสารตั้งต้น $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.87 g ละลายด้วยตัวทำละลายเอทานอลในปริมาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สารตั้งต้นละลายหมด
- 7.2 นำสารละลายไปอุ่นใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที
- 7.3 เติมลิแกนด์ Phenylhydrazine 1 mL ที่ละลายแล้ว สังเกตการเกิดตะกอนของสารละลาย
- 7.4 อุ่นสารละลายใน water bath ที่อุณหภูมิ $40-45^\circ\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที จะมีตะกอนของ $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ เกิดขึ้น
- 7.5 นำตะกอนกรองแบบลดความดัน ล้างตะกอนด้วยเอทานอล
- 7.6 ตั้ทิ้งไว้ให้แห้ง ชั่งน้ำหนักตะกอน คำนวณเปอร์เซ็นต์ผลึกภัณฑ์

การทดลองที่ 2 การทดสอบทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี (Thinlayer Chromatography ; TLC)

โดยใช้ซิลิกาเจลเป็นตัวดูดซับ และใช้เอทิลอะซิเตตเป็นตัวทำละลายเคลื่อนที่

1. spot $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และสารประกอบเชิงซ้อน $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ ลงบนตัวดูดซับ
2. เมื่อตัวทำละลายเคลื่อนที่ขึ้นไปเกือบถึงส่วนบนของแผ่นแก้วก็นำออกมาทำเครื่องหมาย บอกระยะทางที่สารประกอบ และตัวละลายเคลื่อนที่ไปถึง
3. หาค่า R_f ซึ่งหาได้จากอัตราส่วนระหว่างระยะทางที่สารประกอบเคลื่อนที่กับระยะทางที่ตัวทำละลาย เคลื่อนที่ ดังนี้

$$R_f = \frac{\text{ระยะทาง (cm) ที่สารประกอบเคลื่อนที่}}{\text{ระยะทาง (cm) ที่ตัวทำละลายเคลื่อนที่}}$$

การทดลองที่ 3 การทดสอบความสามารถในการละลายของสารประกอบเชิงซ้อน

$[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(n\text{-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ โดยใช้ น้ำ, เอทานอล, เมทานอล, ไดคลอโรมีเทน, คลอโรฟอร์ม, อะซิโตน, เฮกเซน, เอทิลอะซิเตต และไดเอทิลอีเทอร์ เป็นตัวทำละลาย

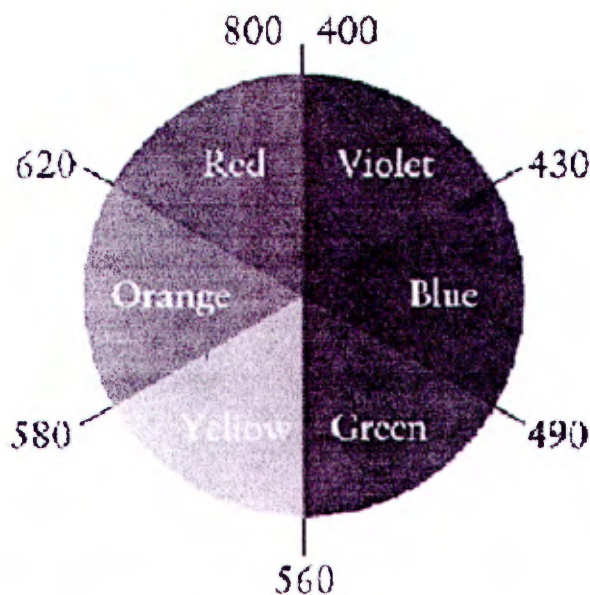
1. แบ่งตะกอนของสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิดในปริมาณที่เท่าๆกันลงในหลอดทดลอง 9 หลอด เติมตัวทำละลายลงไป ในหลอดทดลอง หลอดละ 3 mL ตามลำดับ คนจนตะกอนละลาย

2. เปรียบเทียบความสามารถการละลายของตะกอน สารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิดในตัวทำละลายชนิดต่างๆ บันทึกผล

การทดลองที่ 4 ศึกษาจุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนโดยใช้เครื่องมือ Melting Point

1. บรรจุ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ลงในหลอดแคปิลลารีให้มีความสูงประมาณ 0.4-0.5 cm หาจุดหลอมเหลวของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ บันทึกช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว
2. บรรจุ $[\text{Cu}(\text{N-Methylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{N,N-Dimethylaniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Dibutylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Pyridine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Aniline})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{n-Butylamine})_2(\text{H}_2\text{O})_2]^{2+}$, $[\text{Cu}(\text{Phenylhydrazine})_2\text{Cl}_2]$ ตัวอย่างละ 1 หลอด
3. หาจุดหลอมเหลวของสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิด บันทึกช่วงอุณหภูมิของการหลอมเหลว

การทดลองที่ 5 ศึกษาความแรงของลิแกนด์โดยพิจารณาจาก Complementary colors



แผนผัง Complementary colors

1. บันทึกสีของสารละลายของสารประกอบเชิงซ้อนแต่ละชนิดแล้วนำไปเทียบหาความยาวคลื่นจากแผนผังการดูดกลืนแสง (Complementary colors)

2. เปรียบเทียบพลังงานในการทรานซิชัน (ความแรงของลิแกนด์) ของสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะ Cu (II) ที่มีลิแกนด์ต่างชนิดกัน

ขอบเขตของการวิจัย

1. เป็นการสังเคราะห์สารประกอบเชิงซ้อนของ $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ กับลิแกนด์ *N* - Methylaniline, *N,N* - Dimethylaniline, Dibutylamine, Pyridine, Aniline, *n* - Butylamine และ Phenylhydrazine
2. ศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารประกอบเชิงซ้อน
3. ศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนชนิดต่างๆ ด้วยแผนผัง Complementary colors
4. เปรียบเทียบพลังงานการทรานซิชันของลิแกนด์ชนิดต่างๆ

ระยะเวลาการทำวิจัย

โครงการมีระยะเวลาการทำวิจัย ตั้งแต่เดือน กรกฎาคม 2547 - มิถุนายน 2548

แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ

กิจกรรมการวิจัย	2547						2548					
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.
1. ศึกษาเอกสารวิจัยที่เกี่ยวข้องและเขียนเค้าโครงการวิจัย												
2. สร้างเครื่องมือและทำการทดลอง												
3. รวบรวมข้อมูล												
4. วิเคราะห์ข้อมูลแปลผลและสรุปผลการทดลอง												
5. จัดเอกสารรายงานผลการวิจัยและเผยแพร่												

อุปกรณ์การทำวิจัย

1. Melting Point Buchi 545
2. Thinlayer Chromatography ; TLC
3. Water bath
4. Hot plate
5. Thermometer
6. Volumetric flasks
7. Beakers
8. Stirring rod
9. Test tubes
10. Test tubes rack
11. Spectular
12. Dropper
13. Cappillary
14. Cylinder
15. Glasses
16. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง
17. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง
18. เครื่องกรองแบบลดความดัน
19. ตู้อบ
20. กระดาษกรองเบอร์ 2
21. น้ำกลั่น

สารเคมี

1. $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
2. *N*-Methylaniline
3. *N,N*-Dimethylaniline
4. Dibutylamine
5. Pyridine
6. Aniline
7. *n*-Butylamine

8. Phenylhydrazine
9. Ethanol
10. Methanol
11. Dichlorometane
12. Chloroform
13. Hexane
14. Ethylacetate
15. Diethylether
16. Acetone

ลงชื่อ.....*สจจ. งามชื่น*.....

(นางสาวสายใจ แหละหิม)

ลงชื่อ.....*ช้อย ภาณุ*.....

(นางสาวชูชัย กะนา)

ความคิดเห็นของอาจารย์ที่ปรึกษา

.....*เห็นสมควรให้ดำเนินการต่อไป*.....

ลงชื่อ.....*พรพิม*.....

(นางสาวปวีณา หนูคง)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลงชื่อ.....*ดวงรัตน์*.....

(นางสาวดวงรัตน์ ทองคำ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณและการเรียกชื่อสารประกอบเชิงซ้อน

การคำนวณโมลของสารตั้งต้น ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)



$$\text{M.W.} = 107.16, d = 0.99 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{N-Methylaniline } 1 \text{ mL} = 0.99 \times 1 = 0.99$$

$$\text{N-Methylaniline } 107.16 = 1 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} 0.99 &= \frac{0.99}{107.16} \text{ mol} \\ &= 0.0092 \text{ mol} \\ &= 0.0092 \times 10^3 \\ &= 9.2 \text{ mmol} \end{aligned}$$

ให้จำนวน โมลเป็นครึ่งหนึ่งของ *N*-Methylaniline

$$\frac{9.2}{2} = 4.6 \text{ mmol}$$

ให้ mmol ของสารตั้งต้นเป็นจำนวน g จะได้

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 1000 \text{ g มี} = 4.6 \text{ mmol}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 170.48 \text{ g มี} = \frac{4.6 \times 170.48}{1000}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0.78 \text{ g}$$



$$\text{M.W.} = 121.18, d = 0.96 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{N,N-Dimethylaniline } 1 \text{ mL} = 0.96 \times 1 = 0.96$$

$$\text{N,N-Dimethylaniline } 121.18 = 1 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} 0.96 &= \frac{0.96}{121.18} \text{ mol} \\ &= 0.0079 \text{ mol} \\ &= 0.0079 \times 10^3 \\ &= 7.9 \text{ mmol} \end{aligned}$$

ให้จำนวน โมลเป็นครึ่งหนึ่งของ *N,N*-Dimethylaniline

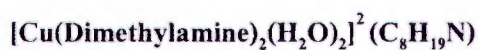
$$\frac{7.9}{2} = 3.95 \text{ mmol}$$

ให้ mmol ของสารตั้งต้นเป็นจำนวน g จะได้

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ 1000 g มี } = 3.95 \text{ mmol}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ 170.48 g มี } = \frac{3.95 \times 170.48}{1000}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0.67 \text{ g}$$



$$\text{M.W.} = 129.25, d = 0.76 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Dimethylamine 1 mL} = 0.76 \times 1 = 0.76$$

$$\text{Dimethylamine 129.25} = 1 \text{ mol}$$

$$0.76 = \frac{0.76}{129.25} \text{ mol}$$

$$= 0.0058 \text{ mol}$$

$$= 0.0058 \times 10^3$$

$$= 5.8 \text{ mmol}$$

ให้จำนวนโมลเป็นครึ่งหนึ่งของ Dimethylamine

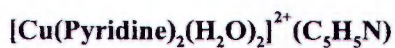
$$\frac{5.8}{2} = 2.90 \text{ mmol}$$

ให้ mmol ของสารตั้งต้นเป็นจำนวน g จะได้

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ 1000 g มี } = 2.90 \text{ mmol}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ 170.48 g มี } = \frac{2.90 \times 170.48}{1000}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0.49 \text{ g}$$



$$\text{M.W.} = 79.10, d = 0.98 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Pyridine } 1 \text{ mL} = 0.98 \times 1 = 0.98$$

$$\text{Pyridine } 79.10 = 1 \text{ mol}$$

$$0.98 = \frac{0.98}{79.10} \text{ mol}$$

$$= 0.1234 \text{ mol}$$

$$= 0.1234 \times 10^3$$

$$= 12.34 \text{ mmol}$$

ให้จำนวนโมลเป็นครึ่งหนึ่งของ Pyridine

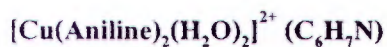
$$\frac{12.34}{2} = 6.17 \text{ mmol}$$

ให้ mmol ของสารตั้งต้นเป็นจำนวน g จะได้

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 1000 \text{ g มี} = 6.17 \text{ mmol}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 170.48 \text{ g มี} = \frac{6.17 \times 170.48}{1000}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 1.05 \text{ g}$$



$$\text{M.W.} = 93.13, d = 1.03 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Aniline } 1 \text{ mL} = 1.03 \times 1 = 1.03$$

$$\text{Aniline } 93.13 = 1 \text{ mol}$$

$$1.03 = \frac{1.03}{93.13} \text{ mol}$$

$$= 0.0110 \text{ mol}$$

$$= 0.0110 \times 10^3$$

$$= 11 \text{ mmol}$$

ให้จำนวนโมลเป็นครึ่งหนึ่งของ Aniline

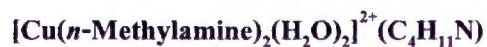
$$\frac{11}{2} = 5.5 \text{ mmol}$$

ให้ mmol ของสารตั้งต้นเป็นจำนวน g จะได้

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ 1000 g มี } = 5.5 \text{ mmol}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ 170.48 g มี } = \frac{5.5 \times 170.48}{1000}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0.93 \text{ g}$$



$$\text{M.W.} = 73.14, d = 0.74 \text{ g/cm}^3$$

$$n\text{-Methylamine } 1 \text{ mL} = 0.74 \times 1 = 0.74$$

$$n\text{-Methylamine } 73.14 = 1 \text{ mol}$$

$$0.74 = \frac{0.74}{73.14} \text{ mol}$$

$$= 0.0101 \text{ mol}$$

$$= 0.0101 \times 10^3$$

$$= 10.1 \text{ mmol}$$

ให้จำนวนโมลเป็นครึ่งหนึ่งของ *n*-Methylamine

$$\frac{10.1}{2} = 5.05 \text{ mmol}$$

ให้ mmol ของสารตั้งต้นเป็นจำนวน g จะได้

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ 1000 g มี } = 5.05 \text{ mmol}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \text{ 170.48 g มี } = \frac{5.05 \times 170.48}{1000}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0.86 \text{ g}$$



$$\text{M.W.} = 108.14, d = 1.10 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Phynylhydrazine } 1 \text{ mL} = 1.10 \times 1 = 1.10$$

$$\text{Phynylhydrazine } 108.14 = 1 \text{ mol}$$

$$\begin{aligned} 1.10 &= \frac{1.10}{108.14} \text{ mol} \\ &= 0.0102 \text{ mol} \\ &= 0.0102 \times 10^3 \\ &= 10.2 \text{ mmol} \end{aligned}$$

ให้จำนวนโมลเป็นครึ่งหนึ่งของ Phynylhydrazine

$$\frac{10.2}{2} = 5.1 \text{ mmol}$$

ให้ mmol ของสารตั้งต้นเป็นจำนวน g จะได้

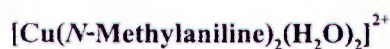
$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 1000 \text{ g มี} = 5.1 \text{ mmol}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O } 170.48 \text{ g มี} = \frac{5.1 \times 170.48}{1000}$$

$$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0.87 \text{ g}$$

การคำนวณเปอร์เซ็นต์ผลิตภัณฑ์

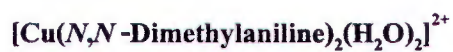
$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{โมลผลิตภัณฑ์}}{\text{โมลสารตั้งต้น}} \times 100$$



$$\% \text{ Yield} = \frac{\frac{0.87 \text{ g}}{313.87 \text{ g/mol}}}{\frac{0.78 \text{ g}}{170.48 \text{ g/mol}}} \times 100$$

$$= \frac{0.0028}{0.0046} \times 100$$

$$\% \text{ Yield} = 60.87 \%$$



$$\begin{aligned} \% \text{ Yield} &= \frac{\frac{0.32 \text{ g}}{341.91 \text{ g/mol}}}{\frac{0.67 \text{ g}}{170.48 \text{ g/mol}}} \times 100 \\ &= \frac{0.0009}{0.0039} \times 100 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Yield} = 23.08 \%$$



$$\begin{aligned} \% \text{ Yield} &= \frac{\frac{0.47 \text{ g}}{258.50 \text{ g/mol}}}{\frac{0.49 \text{ g}}{170.48 \text{ g/mol}}} \times 100 \\ &= \frac{0.0018}{0.0029} \times 100 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Yield} = 62.07 \%$$



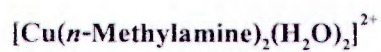
$$\begin{aligned} \% \text{ Yield} &= \frac{\frac{0.134 \text{ g}}{251.75 \text{ g/mol}}}{\frac{1.05 \text{ g}}{170.48 \text{ g/mol}}} \times 100 \\ &= \frac{0.0052}{0.0062} \times 100 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Yield} = 83.87 \%$$



$$\begin{aligned} \% \text{ Yield} &= \frac{\frac{1.26 \text{ g}}{285.81 \text{ g/mol}}}{\frac{0.93 \text{ g}}{170.48 \text{ g/mol}}} \times 100 \\ &= \frac{0.0044}{0.0054} \times 100 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Yield} = 81.48 \%$$



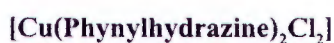
$$\begin{aligned} \% \text{ Yield} &= \frac{\frac{0.65 \text{ g}}{245.83 \text{ g/mol}}}{\frac{0.86 \text{ g}}{170.48 \text{ g/mol}}} \times 100 \\ &= \frac{0.0026}{0.0050} \times 100 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Yield} = 52 \%$$



$$\begin{aligned} \% \text{ Yield} &= \frac{\frac{0.50 \text{ g}}{315.83 \text{ g/mol}}}{\frac{0.87 \text{ g}}{170.48 \text{ g/mol}}} \times 100 \\ &= \frac{0.0016}{0.0051} \times 100 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Yield} = 31.37 \%$$



$$\begin{aligned} \% \text{ Yield} &= \frac{\frac{0.50 \text{ g}}{350.83 \text{ g/mol}}}{\frac{0.84 \text{ g}}{170.48 \text{ g/mol}}} \times 100 \\ &= \frac{0.0014}{0.0051} \times 100 \end{aligned}$$

$$\% \text{ Yield} = 27.45 \%$$

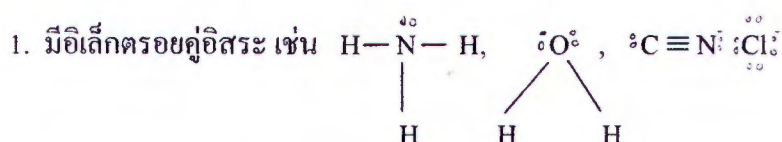
คำจำกัดความของพจน์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับสารประกอบเชิงซ้อน

เลขโคออร์ดิเนชัน หรือเวเลนซีทุติยภูมิ (coordination number or secondary valency) หมายถึงจำนวนอะตอมที่เป็นผู้ให้คู่อิเล็กตรอนแก่โลหะศูนย์กลางเพื่อเกิดพันธะโคออร์ดิเนต เช่น $[\text{CoCl}_6]^{3-}$, $[\text{Co}(\text{en})_3]^{3+}$, $[\text{CoCl}_2(\text{en})_2]^+$ Co ต่างมีเลขโคออร์ดิเนชัน 6

ทรงกลมโคออร์ดิเนชัน (coordination sphere) กลุ่มอะตอมหรือไอออนที่เกิดพันธะโคออร์ดิเนตกับโลหะศูนย์กลางในสารประกอบเชิงซ้อนเดียวกัน ถือว่าอยู่ในทรงกลมโคออร์ดิเนชันเดียวกัน เช่น $[\text{Co}(\text{NH}_3)_4\text{Cl}_2]\text{Cl}$ ซึ่งมีแอมโมเนีย สี่โมเลกุล คลอไรด์ไอออนสองไอออนเป็น ลิแกนด์คือให้อิเล็กตรอนคู่แก่โคบอลต์ไอออน เราเรียกกลุ่มที่อยู่ในเครื่องหมายวงเล็บสี่เหลี่ยม [] ว่าอยู่ในวงกลมโคออร์ดิเนชัน ส่วนคลอไรด์ที่อยู่นอกวงเล็บสี่เหลี่ยม ถือว่าอยู่นอกทรงกลมโคออร์ดิเนชัน

ไอออนเชิงซ้อน (complex ion) หมายถึง สารประกอบเชิงซ้อน ซึ่งเมื่อรวมค่าสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) บนโมเลกุลของโลหะศูนย์กลางกับลิแกนด์ทั้งหมดภายในทรงกลมโคออร์ดิเนชันแล้วมีประจุเด่นขึ้น เช่น $[\text{Ni}(\text{CN})_4]^{2-}$ เนื่องจากโลหะ Ni มีค่าสถานะออกซิเดชัน +2 CN มีค่าสถานะออกซิเดชัน -1 ต่อหนึ่งหมู่ เมื่อรวมค่าสถานะออกซิเดชันทั้งหมด +2 รวมกับ (-4) จึงเป็น -2 ไอออนเชิงซ้อนอยู่เป็นอนุภาคอิสระที่เสถียรได้

สมบัติของลิแกนด์



เพื่อที่จะเกิดพันธะโคออร์ดิเนตโคเวเลนต์กับอะตอมกลางได้

2. จะเป็นโมเลกุลหรือไอออนลบก็ได้
3. ยึดเหนี่ยวกับอะตอมที่เป็นศูนย์กลางด้วยพันธะโคเวเลนต์ชนิดโคออร์ดิเนต
4. จำนวนลิแกนด์ที่พบในสารประกอบเชิงซ้อนในธรรมชาติมักเป็นเลขคู่ เช่น 2, 4, 6, 8, 10, 12 เป็นต้น

5. ลิแกนด์ส่วนมากเป็นไอออนลบซึ่งประกอบด้วยธาตุที่มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงๆ เช่น F^- , Cl^- , Br^- , OH^- , CN^- , SCN^- และ S^{2-} เป็นต้น นอกจากนี้ลิแกนด์อาจเป็นสารประกอบที่ไม่มีประจุ เช่น CO , NH_3 และ H_2O เป็นต้น

การเขียนสูตรสารประกอบเชิงซ้อน

หลักเกณฑ์ในการเขียนสูตรมีรายละเอียดดังนี้

1. สารประกอบเชิงซ้อน ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุหรือไม่มีประจุจะเขียนอยู่ในเครื่องหมายวงเล็บสี่เหลี่ยม คือ $[\]$ ซึ่งหมายถึงอยู่ในวงกลมโคออร์ดิเนชัน
2. ภายในวงเล็บสี่เหลี่ยมนั้น จะต้องเขียนสัญลักษณ์ของโลหะที่ทำหน้าที่เป็นอะตอมหรือไอออนศูนย์กลางก่อน ตามด้วยลิแกนด์ ถ้าลิแกนด์มีหลายหมู่ บอกจำนวนหมู่โดยเขียนตัวเลขไว้ข้างล่าง เช่น $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$ ถ้าลิแกนด์มีหลายชนิดแตกต่างกัน เขียนลิแกนด์ประจุลบก่อนต่อมาเป็นลิแกนด์ไม่มีประจุ ลิแกนด์ ประจุบวกไว้ท้ายสุด เช่น $[\text{CoCl}_2(\text{NH}_3)_4]^+$
- 3.เกลือของสารประกอบเชิงซ้อน (salt of complex) สารประกอบเชิงซ้อนที่จะเกิดเกลือ คือ แคตไอออนเชิงซ้อน (complex cation : สารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวก) หรือแอนไอออน (complex

anion : สารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุลบ) หรือที่เรียกว่าไอออนเชิงซ้อน เมื่อรวมกับไอออนอื่นที่มีประจุตรงกันข้ามเกิดเป็นเกลือขึ้น ให้เขียนไอออนที่มีประจุบวกไว้หน้าเสมอ โดยไอออนเชิงซ้อนยังอยู่ในวงเล็บสี่เหลี่ยมตามเดิม เช่น $K_4[Fe(CN)_6]$ หรือ $[Co(NH_3)_6]Cl_3$ สำหรับเกลือของไอออนเชิงซ้อนประจุบวกและไอออนเชิงซ้อนประจุลบก็เขียนทำนองเดียวกัน คือ ไอออนบวกอยู่หน้าไอออนลบอยู่หลัง เช่น $[Pt(NH_3)_4] [PtCl_4]$

การเรียกชื่อสารประกอบเชิงซ้อน

เรียกได้สองระบบ ดังนี้

1. ระบบสามัญ (common name)

ระบบสามัญเป็นการเรียกกันมาตั้งแต่ดั้งเดิมโดยไม่มีระบบ เช่น $K_4[Fe(CN)_6]$ เรียกว่า potassium ferrocyanide $K_3[Fe(CN)_6]$ เรียกว่า potassium ferricyanide

2. ระบบชื่อนุกรมวิธาน (systematic name or IUPAC name)

คำว่า IUPAC ย่อมาจาก International Union of Pure and Applied Chemistry

การเรียกชื่อตามระบบนุกรมวิธานมีหลักเกณฑ์ดังนี้

1. การเรียงลำดับ

ก. สารประกอบเชิงซ้อนที่เป็นเกลือ อ่านไอออนบวกก่อนเสมอ เช่น $K_3[Fe(CN)_6]$ อ่าน K^+ ก่อนตามด้วย $[Fe(CN)_6]^{3-}$ $[Ag(NH_3)_2]Cl$ อ่าน $[Ag(NH_3)_2]^+$ ก่อนตามด้วย Cl^-

ข. องค์ประกอบภายในทรงกลมโคออร์ดิเนชัน หรือที่อยู่ในวงเล็บสี่เหลี่ยม [] อ่านลิแกนด์ก่อนตามด้วยโลหะศูนย์กลาง ถ้าลิแกนด์ชนิดเดียวกันมีหลายหมู่บอกจำนวนหมู่ด้วยภาษากรีก ถ้าลิแกนด์มีหลายชนิดแตกต่างกันให้อ่านลิแกนด์ประจุลบก่อนถัดมาเป็นลิแกนด์ไม่มีประจุ ส่วนลิแกนด์ประจุบวกอยู่อันดับสุดท้าย

2. การเรียกชื่อโลหะศูนย์กลางมีรายละเอียดดังนี้

ก. แคลไอออนเชิงซ้อนหรือสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวก การเรียกชื่อโลหะศูนย์กลางจะไม่เปลี่ยนแปลง โดยเรียกชื่อโลหะดังกล่าวตามด้วยสถานะออกซิเดชันที่เขียนเป็นเลขโรมัน

ข. สารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่มีประจุ การเรียกชื่อโลหะศูนย์กลางจะไม่เปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกับแคลไอออนเชิงซ้อน ตามด้วยสถานะออกซิเดชันที่เขียนเป็นเลขโรมัน

ค. แอนไอออนเชิงซ้อน หรือสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุลบ การเรียกชื่อโลหะศูนย์กลางเปลี่ยนแปลงโดยตัดอักษรหรือสระของโลหะตามความเหมาะสมแล้วเดิมคำว่า “เอต” (-ate) ตามด้วยสถานะออกซิเดชันที่เขียนด้วยเลขโรมัน ตัวอย่างเช่น

ตารางที่ 1 แสดงการเรียกชื่อโลหะในแอนไอออนเชิงซ้อน

โลหะ	ชื่อโลหะในแอนไอออนเชิงซ้อน
aluminium	aluminate
chromium	chromate
manganese	manganate
nickel	nickelate
cobalt	cobaltate
molybdenum	molybdate
tungsten	tungstate
zinc	zincate

โลหะบางตัวนิยมใช้ภาษาละติน

โลหะ	ชื่อภาษาละติน	ชื่อโลหะในแอนไอออนเชิงซ้อน
iron	ferrum	Ferrate
copper	cuprum	Cuprate
lead	plumbum	Plumbate
silver	argentum	Argentite
gol	aurum	Aurate
tin	stunnum	stannate

3. การเรียกชื่อลิแกนด์ มีรายละเอียดดังนี้

ก. ลิแกนด์ประจุลบ (anionic ligand) ลงท้ายด้วย ซuffix “โอ” (suffix-o)

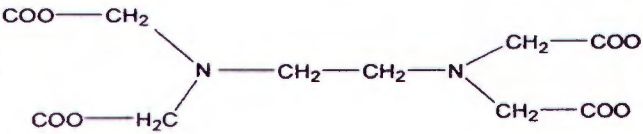
ดังตัวอย่าง

ตารางที่ 2 แสดงการเรียกชื่อลิแกนด์ประจุลบ

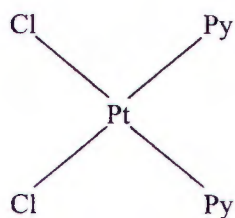
ลิแกนด์	ชื่อ
F^-	Floro
Cl^-	Chloro
Br^-	Bromo
I^-	Iodo
O^-	Oxo
OH^-	Hydroxo
CN^-	Cyano
SCN^-	Thiocyanato (s-bond)
SCN^-	Isothiocyanato (n-bond)
S^{2-}	Thio
SO_3^{2-}	Sulfito
$S_2O_3^{2-}$	Thaiosulfato
SO_4^{2-}	Sulfato
N_3^+	Azido
NO_3^-	Nitrato
NO_2^-	Nitrito (o-bond)
NO_2^-	Nitro (n-bond)
N^{3-}	Nitrido
$C_2O_4^{2-}$	Oxatato
CH_3COO^-	Acetato
CO_3^{2-}	carbonato

ข. ลิแกนด์ที่เป็นกลาง (neutral ligand) เรียกตามระบบสามัญดังตัวอย่าง

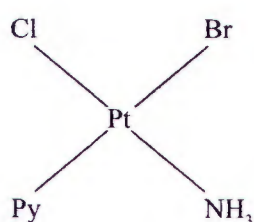
ตารางที่ 3 แสดงการเรียกชื่อลิแกนด์ที่เป็นกลาง

ลิแกนด์	ชื่อ
H_2O	Aquo
NH_3	Ammine
CO	Carbonyl
NO	Nitrosyl
PF_3	Trifluorophosphine
$(\text{NH}_2)_2\text{CO}$	Urea
$(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{P}$	Triphenylphosphine
$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	Pyridine
CH_3	Methyl
C_6H_5	Phenyl
$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{NH}_2$	Ethylenediamine
	ethylenediaminetetraacetate

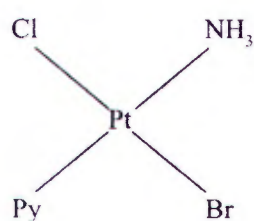
ฉ. ถ้าเกิดไอโซเมอร์เชิงเรขาคณิต (geometrical isomer) ให้ใช้คำนำหน้า ซิส – (Cis-) กับ ลิแกนด์เหมือนกันแต่อยู่ตรงกันข้าม หรือใช้ ซิส- กับ แทรนส์- ในการบอกความแตกต่างระหว่างสองไอโซเมอร์ในกรณีที่ตำแหน่งของลิแกนด์ไม่เหมือนกันเป็นคู่ๆ



Cis – dichlorodipyridineplatinum (II)



Cis – bromoammine- *Cis*- chloropyridineplatinum (II)



trans – chlorobromo – *trans*- amminepyridineplatinum(II)

รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีไอโซเมอร์ รูปแบบ ซิส และรูปแบบ แทรนส์

4. ไอออนเชิงเดี่ยว ซึ่งหมายถึงไอออนที่อยู่นอกทรงกลมโคออร์ดิเนชัน ให้ใช้ชื่อเดิมของไอออนนั้นๆ ไม่ว่าจะเป็นแคตไอออน (Cation) หรือ แอนไอออน(Anion)

ตัวอย่างการเรียกชื่อตามกฎเกณฑ์ที่กล่าวมา

1. การเรียกชื่อแอนไอออนเชิงซ้อน

$[\text{PtCl}_4]^{2-}$	tetrachloroplatinate (II) ion
$[\text{BF}_4]^-$	tetrafluoroborate (III)ion
$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$	hexacyanoferrate (III)ion
$[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$	hexacyanoferrate (II)ion
$[\text{CuCl}_3\text{H}_2\text{O}]^-$	hexacyanoferrate (III)ion
$[\text{HgI}_4]^{2-}$	tetraiodomercurate (II)ion
$[\text{Cr}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$	trisoxalatochromate (III)ion

$[\text{SnS}_3]^{2-}$	trithiostannate(IV) ion
$[\text{Co}(\text{NCS})_4]^{2-}$	tetraisothiocyanatocobaltate(II) ion
$[\text{Pb}(\text{OH})_3]^-$	trihydroxoplumbate (II) ion
$[\text{Co}(\text{NCS})_4]^{2-}$	hexacyanoferrate (III) ion

2. การเรียกชื่อแคตไอออนเชิงซ้อน

$[\text{Be}(\text{H}_2\text{O})_3]^{2+}$	tetraaquoberyllium(II) ion
$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]^+$	diamminesilver (I) ion
$[\text{CoClNO}_2(\text{NH}_3)_4]^+$	chloronitrotetraamminecobalt (III) ion
$[\text{Co}(\text{CN})_2(\text{NH}_3)_4]^+$	dicyanotetraamminecobalt (III) ion
$[\text{CoSO}_4(\text{NH}_3)_5]^+$	sulfatopentaamminecobalt (III) ion
$[\text{Ni}(\text{NH}_3)_6]^+$	hexaamminenickel (II) ion
$[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^+$	hexaaquachromium (III) ion

3. การเรียกชื่อสารประกอบเชิงซ้อนไม่มีประจุ

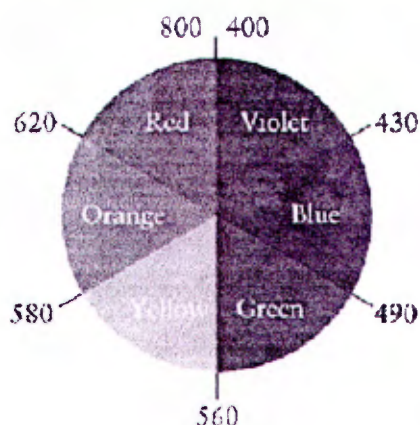
$[\text{Fe}(\text{CO})_5]$	pentacarbonyliron (0)
$[\text{Co}(\text{NO}_2)_3(\text{NH}_3)_3]$	triamminetrinitrocobalt (III)
$[\text{PtCl}_2(\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3)]$	dichloroethylenediammineplatinum (II)
$[\text{Cr}(\text{CO})_6]$	hexacarbonylchromium (0)
$[\text{Zn}(\text{SO}_4)_2(\text{NH}_2^+ \text{NH}_3)_2]$	disulfatobishydraziniumzinc (II)

4. การเรียกชื่อเกลือของสารประกอบเชิงซ้อน

$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$	potassium hexacyanoferrate (III)
$[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$	hexaamminecobalt (III) chloride
$\text{K}_3[\text{CrOF}_4]$	potassium oxotetrafluorochromate (III)
$[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2]\text{Cl}_3^-$	diamminesilver (I) chloride
$[\text{CoN}_3(\text{NH}_3)_5]\text{SO}_4^-$	azidopentaamminecobalt (III) sulfate
$\text{NH}_4[\text{Cr}(\text{SCN})_4(\text{NH}_3)_2]$	ammoniumtetrathiocyanatodiamminechromate (III)
$\text{Na}_3[\text{Ag}(\text{S}_2\text{O}_3)_2]$	sodiumbisthiosulfatoargente (I)
$[\text{CoCl}(\text{NH}_3)_5](\text{NO}_3)_2$	chloropentaamminecobalt (III) nitrate
$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{CO}]$	potassium pentacyanocarbonylferrate (II)
$[\text{PtCl}_2(\text{NH}_3)_4][\text{PtCl}_4]$	dichlorotetraammineplatinum (IV)
	tetrachloroplatinum (II)

วิธีการอ่านแผนผัง Complementary colors

สีที่มองเห็นจะอยู่ตรงกันข้ามกับสีที่ถูกดูดกลืน แล้วอ่านค่าความยาวคลื่น($\lambda_{\max}$) เช่น
สีที่มองเห็นคือ สีม่วง ดังนั้นสีที่ถูกดูดกลืนคือ สีเหลือง มีความยาวคลื่น 580-560 นาโนเมตร (nm)



แผนผัง Complementary colors

สภาพขั้วของตัวทำละลายต่างๆ

น้ำ (H_2O)	9.0
เมทานอล (MeOH)	6.6
อะซิโตไนไตรล์ (Acetonitrile)	6.2
อะซิโตน (Acetone)	5.4
เอทานอล (EtOH)	5.2
คลอโรฟอร์ม (CHCl_3)	4.4
เอทิลอะซิเตต (EtOAc)	4.3
ไดคลอโรมีเทน (CH_2Cl_2)	3.4
โทลูอีน (Toluene)	2.3
Carbontetrachloride	1.7

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ นางสาวสายใจ แหะหิม

วัน เดือน ปีเกิด 10 ตุลาคม 2526

ภูมิลำเนาเดิม 84 หมู่ 6 ต.เกาะหมาก อ.ปากพะยูน จ.พัทลุง 93120

ที่อยู่ 84 หมู่ 6 ต.เกาะหมาก อ.ปากพะยูน จ.พัทลุง 93120

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนบ้านเกาะหมาก	2538
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนมัธยมเกาะหมาก	2545
ระดับอุดมศึกษา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช	2548

ประวัติผู้ทำวิจัย

ชื่อ นางสาวชอุทัย กะนา
วัน เดือน ปีเกิด 22 กันยายน 2526
ภูมิลำเนาเดิม 194/1 หมู่ 5 ต.เกาะมาตี อ.บางเจาะ จ.นราธิวาส 96170
ที่อยู่ 194/1 หมู่ 5 ต.เกาะมาตี อ.บางเจาะ จ.นราธิวาส 96170
วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
ระดับประถมศึกษา	โรงเรียนอัสรียะห์ อิสลามียะห์	2538
ระดับมัธยมศึกษา	โรงเรียนนราสิกาลัย	2545
ระดับอุดมศึกษา	มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช	2548