

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานการวิจัย

การศึกษาสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะทรานซิชันบางตัว  
กับสารประกอบที่มีไพริดอกซาลเป็นโครงสร้างหลัก

Complex Formation of Transition Metal Ions with Pyridoxal Base Compounds



RCH  
๐๗  
172  
Tb  
ป361ก

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 54627  
วัน,เดือน,ปี 24 ส.ค. 2548

ดร. ประยงค์ ดวงดี

ทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2538

11/๗๘๙๙๙๙
.b.....
.i.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน และการหาค่าคงตัวเสถียรภาพ ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง ไพริคอกซาลไอโซนิโคตินอิลไฮดราโซน (PIH) กับไอออนของโลหะทรานสิชัน 7 ตัวคือ แคลเซียม(II) โคบอลต์(II) คอปเปอร์(II) เหล็ก(II) เหล็ก(III) นิกเกิล(II) และ ซิงค์(II) โดยใช้เทคนิคโพเทนชิอเมตริกไทเทรชัน ทำการไทเทรตในช่วงที่เอชประมาณ 1.8 - 12.0 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.5 M โพแทสเซียมไนเตรท แล้วนำผลที่ได้มาทำการคำนวณโดยใช้โปรแกรม SUPERQUAD ทำให้ทราบถึงโครงสร้างของโมเลกุลของสารเชิงซ้อนสปีชีส์ต่าง ๆ ได้แก่  $LH_2^+$ ,  $LH^+$ ,  $[CaLH]^+$ ,  $[CoLH]^+$ ,  $[CuLH]^+$ ,  $[Fe(II)LH]^+$ ,  $[Fe(III)LH]^+$ ,  $[Ni(II)LH]^+$  และ  $[Zn(II)LH]^+$  (เมื่อ  $LH_2$  คือ PIH ที่เป็นลิแกนด์อิสระ) ค่าคงตัวเสถียรภาพ ( $\log \beta$ ) เท่ากับ 5.75, -8.58, -3.75690, -3.46286, -3.18877, -4.59039, -3.58120, -3.47439 และ -4.36767 ตามลำดับ โดยส่วนใหญ่จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะได้ดีในสภาวะที่เป็นเบส และ ความเข้มข้นของโลหะมาก ๆ

นอกจากนี้ผลจากการวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง ยูวี สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สามารถยืนยันได้ว่าเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH กับ โลหะได้จริง

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2538



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
สารบัญกราฟ	ซ
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎี	2
- ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารประกอบเชิงซ้อน	2
- ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสีเลชัน	3
- ผลของการเกิดสีเลชันในเชิงกายภาพ	4
- ค่าคงตัวของสารประกอบเชิงซ้อน	4
- ไพริคอกซาลไอโซนิโคตินอิล (PIH)	6
- การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ PIH	8
- ผลของความแรงไอออนต่อค่าคงตัวของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน	9
- โพลีเมอร์ซิงเกิลไทเทรชัน	10
- ศักย์ไฟฟ้าของขั้ว	13
- หลักการของโปรแกรม SUPERQUAD	16
- หลักการของโปรแกรม BLE	17
บทที่ 3 การทดลอง	
- สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	19
- อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	20
- การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดลอง	20
- วิธีการทดลอง	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การคำนวณ	30
- การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	30-1
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	
- ผลการทดลองที่ได้จากการไทเทรต	31
- การแคลิเบรทอิลิคโทรค	31
- การศึกษาปฏิกิริยาโปรโตเนชัน และดีโปรโตเนชัน	31
- การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH+Cd(II)	33
- การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH+Co(II)	34
- การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH+Cu(II)	34
- การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH+Fe(II)	35
- การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH+Fe(III)	36
- การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH+Ni(II)	37
- การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH+Zn(II)	38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและเสนอแนะ	128
บรรณานุกรม	130

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 4-1	แสดงค่าคงตัวสปีชีส์ต่าง ๆ ของ PIH และ สารประกอบเชิงซ้อนและช่วงพีเอชที่เกิด	39
ตารางที่ 4-2	แสดงข้อมูลที่ได้จากการแคลิเบรทอิลเลคโทรด	40
ตารางที่ 4-3	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตไป-กลับของ PIH	41
ตารางที่ 5-1	แสดงเปอร์เซนการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสปีชีส์ต่าง ๆ ของโลหะทรานสิชัน กับ PIH ที่พีเอช 7	129



## สารบัญรูป

รูปที่ 2-1	แสดงตัวอย่างลิแกนด์ที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนคีเลตกับอะตอมของโลหะ	3
รูปที่ 2-2	สมการแสดงการสังเคราะห์ PIH	6
รูปที่ 2-3	แสดงโครงสร้างโมเลกุลของ PIH	7
รูปที่ 2-4	แสดงสภาวะสมดุลการเกิดโปรโตเนชัน และ ดีโปรโตเนชันของ PIH	7
รูปที่ 2-5	แสดง โครงสร้างของ PIH ที่มีการจัดเรียงตัวในรูป trans-keto form	8
รูปที่ 2-6	แสดง โครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH กับ Fe(III) ในอัตราส่วนโมลของ PIH : Fe(III) = 2:1	8
รูปที่ 2-7	แสดง Combination electrode	12
รูปที่ 3-1	แสดงการจัดวางเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	30-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญกราฟ

กราฟที่ 4-1	แสดงข้อมูลที่ได้จากการทำแคลิเบรทอิลเลคโทรด	44
กราฟที่ 4-2	แสดงผลที่ได้จากการศึกษาปฏิกิริยาโปรโตเนชัน และ ปฏิกิริยาคีโปรโตเนชัน จากกรดไปเบส	45
กราฟที่ 4-3	แสดงผลที่ได้จากการศึกษาปฏิกิริยาโปรโตเนชัน และ ปฏิกิริยาคีโปรโตเนชัน จากเบสไปกรด	46
กราฟที่ 4-4	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Cd(II) 0.00446 mM	47
กราฟที่ 4-5	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Cd(II) 0.00842 mM	48
กราฟที่ 4-6	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Cd(II) 0.01634 mM	49
กราฟที่ 4-7	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Co(II) 0.00350 mM	50
กราฟที่ 4-8	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Co(II) 0.00680 mM	51
กราฟที่ 4-9	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Co(II) 0.01330 mM	52
กราฟที่ 4-10	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Cu(II) 0.00432 mM	53
กราฟที่ 4-11	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Cu(II) 0.00816 mM	54
กราฟที่ 4-12	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Cu(II) 0.01584 mM	55
กราฟที่ 4-13	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Fe(II) 0.00495 mM	56
กราฟที่ 4-14	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Fe(II) 0.00798 mM	57
กราฟที่ 4-15	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Fe(II) 0.01473 mM	58
กราฟที่ 4-16	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Fe(III) 0.00555 mM	59
กราฟที่ 4-17	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Fe(III) 0.01295 mM	60
กราฟที่ 4-18	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Fe(III) 0.02775 mM	61
กราฟที่ 4-19	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Ni(II) 0.00458 mM	62
กราฟที่ 4-20	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Ni(II) 0.00865 mM	63
กราฟที่ 4-21	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Ni(II) 0.01679 mM	64
กราฟที่ 4-22	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Zn(II) 0.00309 mM	65
กราฟที่ 4-23	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Zn(II) 0.00669 mM	66
กราฟที่ 4-24	แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรต PIH + Zn(II) 0.01236 mM	67

กราฟที่ 4-25	แสดงเส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ต่างๆ ของ PIH	68
กราฟที่ 4-26	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Cd(II) 0.00446 mM	69
กราฟที่ 4-27	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Cd(II) 0.00842 mM	70
กราฟที่ 4-28	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Cd(II) 0.01634 mM	71
กราฟที่ 4-29	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Co(II) 0.00350 mM	72
กราฟที่ 4-30	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Co(II) 0.00680 mM	73
กราฟที่ 4-31	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Co(II) 0.01330 mM	74
กราฟที่ 4-32	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Cu(II) 0.00432 mM	75
กราฟที่ 4-33	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Cu(II) 0.00816 mM	76
กราฟที่ 4-34	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Cu(II) 0.01584 mM	77
กราฟที่ 4-35	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Fe(II) 0.00495 mM	78
กราฟที่ 4-36	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Fe(II) 0.00798 mM	79
กราฟที่ 4-37	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Fe(II) 0.01473 mM	80
กราฟที่ 4-38	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Fe(III) 0.00555 mM	81
กราฟที่ 4-39	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Fe(III) 0.01295 mM	82
กราฟที่ 4-40	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Fe(III) 0.02775 mM	83
กราฟที่ 4-41	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Ni(II) 0.00458 mM	84
กราฟที่ 4-42	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Ni(II) 0.00865 mM	85
กราฟที่ 4-43	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Ni(II) 0.01679 mM	86
กราฟที่ 4-44	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Zn(II) 0.00309 mM	87
กราฟที่ 4-45	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Zn(II) 0.00669 mM	88
กราฟที่ 4-46	เส้นโค้งการกระจายตัวสปีชีส์ของ PIH + Zn(II) 0.01236 mM	89
กราฟที่ 4-47	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Ni(II) ที่ pH 1.54	90
กราฟที่ 4-48	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Ni(II) ที่ pH 11.5	90
กราฟที่ 4-49	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Ni(II) ที่ pH 12.46	91
กราฟที่ 4-50	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Cu(II) ที่ pH 2.04	91
กราฟที่ 4-51	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Cu(II) ที่ pH 2.38	92
กราฟที่ 4-52	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Cu(II) ที่ pH 4	92
กราฟที่ 4-53	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Co(II) ที่ pH 2.10	93
กราฟที่ 4-54	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Co(II) ที่ pH 11.54	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-55	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Zn(II) ที่ pH 2.04	94
กราฟที่ 4-56	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Zn(II) ที่ pH 11.8	94
กราฟที่ 4-57	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Cd(II) ที่ pH 1.71	95
กราฟที่ 4-58	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Cd(II) ที่ pH 11.8	95
กราฟที่ 4-59	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(III) ที่ pH 2.18	96
กราฟที่ 4-60	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(III) ที่ pH 10	96
กราฟที่ 4-61	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 1.85	97
กราฟที่ 4-62	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 11.8	97
กราฟที่ 4-63	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 12.0	98
กราฟที่ 4-64	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 12.16	98
กราฟที่ 4-65	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 12.36	99
กราฟที่ 4-66	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 2.0	99
กราฟที่ 4-67	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 5.0	100
กราฟที่ 4-68	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 7.0	100
กราฟที่ 4-69	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 11.0	101
กราฟที่ 4-70	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 12.0	101
กราฟที่ 4-71	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(II) ที่ pH 2.0	102
กราฟที่ 4-72	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(II) ที่ pH 5.2	102
กราฟที่ 4-73	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(II) ที่ pH 8.9	103
กราฟที่ 4-74	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(II) ที่ pH 10	103
กราฟที่ 4-75	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(II) ที่ pH 11	104
กราฟที่ 4-76	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Cd(II) ที่ pH 2.0	104
กราฟที่ 4-77	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Cd(II) ที่ pH 5.0	105
กราฟที่ 4-78	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Cd(II) ที่ pH 8.34	105
กราฟที่ 4-79	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Cd(II) ที่ pH 9.92	106
กราฟที่ 4-80	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Cd(II) ที่ pH 11.35	106
กราฟที่ 4-81	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Ni(II) ที่ pH 1.99	107
กราฟที่ 4-82	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Ni(II) ที่ pH 3.51	107
กราฟที่ 4-83	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Ni(II) ที่ pH 6.27	108
กราฟที่ 4-84	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Ni(II) ที่ pH 8.02	108

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-85	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Ni(II) ที่ pH 10.2	109
กราฟที่ 4-86	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Ni(II) ที่ pH 11.75	109
กราฟที่ 4-87	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Co(II) ที่ pH 1.74	110
กราฟที่ 4-88	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Co(II) ที่ pH 1.96	110
กราฟที่ 4-89	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Co(II) ที่ pH 4.11	111
กราฟที่ 4-90	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Co(II) ที่ pH 10.01	111
กราฟที่ 4-91	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Co(II) ที่ pH 11.96	112
กราฟที่ 4-92	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Cu(II) ที่ pH 3	112
กราฟที่ 4-93	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Cu(II) ที่ pH 6.6	113
กราฟที่ 4-94	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Cu(II) ที่ pH 10	113
กราฟที่ 4-95	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Cu(II) ที่ pH 11.8	114
กราฟที่ 4-96	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Zn(II) ที่ pH 1.97	114
กราฟที่ 4-97	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Zn(II) ที่ pH 4.6	115
กราฟที่ 4-98	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Zn(II) ที่ pH 7.37	115
กราฟที่ 4-99	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Zn(II) ที่ pH 8.23	116
กราฟที่ 4-100	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Zn(II) ที่ pH 11.07	116
กราฟที่ 4-101	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Zn(II) ที่ pH 11.17	117
กราฟที่ 4-102	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(III) ที่ pH 1.99	117
กราฟที่ 4-103	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(III) ที่ pH 4.5	118
กราฟที่ 4-104	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(III) ที่ pH 8	118
กราฟที่ 4-105	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(III) ที่ pH 10	119
กราฟที่ 4-106	แสดงข้อมูลการวัดการดูดกลืนแสง PIH + Fe(III) ที่ pH 11.78	119
กราฟที่ 4-107	แสดงการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH ต่าง ๆ	120
กราฟที่ 4-108	แสดงการดูดกลืนแสงรวมของ PIH + Cd(II) ที่ pH ต่าง ๆ	121
กราฟที่ 4-109	แสดงการดูดกลืนแสงรวมของ PIH + Co(II) ที่ pH ต่าง ๆ	122
กราฟที่ 4-110	แสดงการดูดกลืนแสงรวมของ PIH + Cu(II) ที่ pH ต่าง ๆ	123
กราฟที่ 4-111	แสดงการดูดกลืนแสงรวมของ PIH + Fe(II) ที่ pH ต่าง ๆ	124
กราฟที่ 4-112	แสดงการดูดกลืนแสงรวมของ PIH + Fe(III) ที่ pH ต่าง ๆ	125
กราฟที่ 4-113	แสดงการดูดกลืนแสงรวมของ PIH + Ni(II) ที่ pH ต่าง ๆ	126
กราฟที่ 4-114	แสดงการดูดกลืนแสงรวมของ PIH + Zn(II) ที่ pH ต่าง ๆ	127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### ที่มาของปัญหาและวัตถุประสงค์

สารประกอบจำพวก ไพรดอกซาลที่เป็น ไลโปฟิลิก คีเลเตอร์ (Lipophilic Chelator) เป็นสารประกอบที่ชอบทำปฏิกิริยากับเหล็กสำหรับการใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการกำจัดปริมาณของเหล็กที่มากเกินไปที่สะสมอยู่ในร่างกาย สารประกอบ ไพรดอกซาลที่ใช้ในการศึกษานี้คือ ไพรดอกซาลไอโซนิกโคติโนลไฮดราโซน (PIH)

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH กับ โลหะทรานซิชัน 7 ตัวได้แก่ คอปเปอร์(II) แคลเซียม(II) โคบอลต์(II) นิกเกิล(II) ชิงค์(II) เหล็ก(II) และ เหล็ก(III) โดย PIH จะทำหน้าที่เป็นลิแกนด์ และมีวัตถุประสงค์ในการหาค่าคงตัวเสถียรภาพในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสปีชีส์ต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคโพเทนชิอเมตริกไทเทรชันในการหาค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของสารประกอบเชิงซ้อน เมื่อเปลี่ยนแปลงสภาพความเป็น กรด-ด่าง ของสารละลายของสารประกอบเชิงซ้อนนั้นที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ความแรงไอออน 0.5 โมลาร์ โพแทสเซียมไนเตรด

ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตจะนำไปคำนวณโดยใช้โปรแกรม SUPERQUAD เป็นโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทนที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับ ลิแกนด์ ผลจากโปรแกรมที่ได้จะบ่งถึงค่าปริมาณสัมพันธ์ของสปีชีส์ที่สามารถเกิดขึ้นได้พร้อมทั้งคำนวณค่าคงตัวเสถียรภาพในการเกิดสารเชิงซ้อนสปีชีส์เหล่านั้นด้วย นอกจากนี้ยังแสดงอัตราส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่พิเศษต่างๆ ในรูปแบบของเส้นกราฟทำให้ทราบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงรวมทั้งการกระจายปริมาณของสารเชิงซ้อนแต่ละสปีชีส์เมื่อค่าความเป็น กรด-ด่าง เปลี่ยนแปลงไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับสารเชิงซ้อน

สารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) หรือสารประกอบโคออร์ดิเนต (Coordination Compound) เป็นสารประกอบที่เกิดจากพันธะชนิดโควาเลนต์ (Covalent Bond) โดยมีอะตอมกลาง (Central Atom) ของโลหะ หรือ แคทไอออน (Cation) ที่สามารถรับคู่อิเล็กตรอนจากแอนไอออน (Anion) หรือโมเลกุลที่เป็นกลางที่เรียกว่า ลิแกนด์ (Ligand) จำนวนพันธะที่เกิดขึ้นในสารประกอบเชิงซ้อนเรียกว่า โคออร์ดิเนชันนัมเบอร์ (Coordination Number)

สารประกอบเชิงซ้อนโดยทั่วไปประกอบด้วย

#### 1. อะตอมกลาง (Central Atom)

อะตอมกลาง คือ อะตอมของโลหะหรืออะตอมที่มีประจุบวก (Cation) ซึ่งจะรับคู่อิเล็กตรอน (Lone Pair Electron) จากแอนไอออน (Anion) หรือโมเลกุลที่เป็นกลางที่เรียกว่า ลิแกนด์ (Ligand) จำนวนพันธะที่เกิดขึ้นในสารประกอบเชิงซ้อนเรียกว่า โคออร์ดิเนชันนัมเบอร์ (Coordination Number) ถ้าอะตอมกลางสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนได้ โดยรับคู่ของอิเล็กตรอนเพียง 2 คู่จากลิแกนด์เรียกโลหะนั้นว่ามี 2 โคออร์ดิเนชันนัมเบอร์ ถ้าสามารถรับคู่อิเล็กตรอนได้ 4 คู่ เรียกโลหะนั้นว่ามี 4 โคออร์ดิเนชันนัมเบอร์ เป็นต้น

#### 2. ลิแกนด์ (Ligand)

ลิแกนด์ คือ โมเลกุลที่เป็นกลางหรืออะตอมที่มีประจุลบ (Anion) ซึ่งมีคู่อิเล็กตรอนอิสระ เช่น  $\text{NH}_3$ ,  $\text{Cl}^-$  ลิแกนด์บางตัวอาจมีคู่อิเล็กตรอนมากกว่า 1 คู่ ดังนั้นสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจึงสามารถเป็นได้ทั้งประจุบวก, ลบ หรือ เป็นกลาง เช่น  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ ,  $[\text{CuCl}_4]^{2-}$ ,  $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COO})_2]$

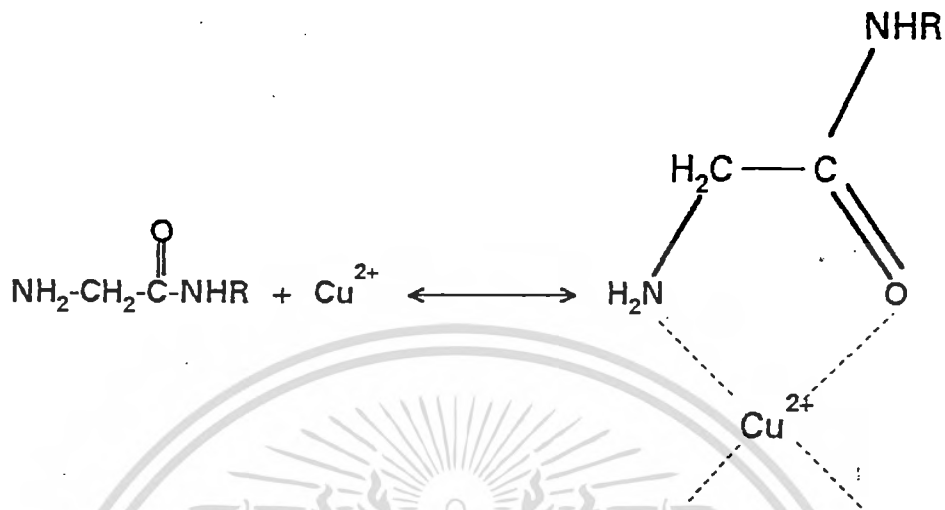
-ลิแกนด์ที่มีคู่อิเล็กตรอนอิสระ 1 คู่ เรียก โมโนเดนเทตลิแกนด์ (Monodentate Ligand)

-ลิแกนด์ที่มีคู่อิเล็กตรอนอิสระ 2 คู่ เรียก ไบเดนเทตลิแกนด์ (Bidentate Ligand)

-ลิแกนด์ที่มีคู่อิเล็กตรอนอิสระมากกว่า 1 คู่ เรียกโดยทั่วไปว่า โพลีเดนเทตลิแกนด์ (Polydentate Ligand)

สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากลิแกนด์ชนิดโพลีเดนเทตลิแกนด์ กับ อะตอมของโลหะ จะได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิดเป็นวง (Ring) เรียกโดยทั่วไปว่า สารประกอบเชิงซ้อนคีเลต (Chelate Complex Compound) และเรียกลิแกนด์นั้นว่า คีเลติงเอเจนต์ (Chelating Agent) ดังรูปที่ (2-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-1 แสดงตัวอย่างลิแกนด์ที่สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนคีเลตกับอะตอมของโลหะ

### 3. ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้อง

ปฏิกริยาที่เกี่ยวข้องในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนคีเลต คือ ปฏิกริยาการแทนที่ของกรด และค่าตามทฤษฎีของลิวอิส โดยลิแกนด์ทำหน้าที่เป็นด่างคือให้คู่อิเล็กตรอน และอะตอมกลาง (โลหะ) ทำหน้าที่เป็นกรดคือรับคู่อิเล็กตรอน

-สารประกอบเชิงซ้อนที่สามารถเกิดปฏิกริยาการแทนที่ได้อย่างรวดเร็ว เรียกว่า ลาไบล์ คอมเพล็กซ์ (Labile Complex)

-สารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดปฏิกริยาการแทนที่ได้ช้ามาก ๆ เรียกว่า นอนลาไบล์ คอมเพล็กซ์ (Non-labile Complex) หรือ อินเนทคอมเพล็กซ์ (Inert Complex)

### ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดคีเลชัน

การเกิดคีเลชันนั้นสารประกอบเชิงซ้อนต้องเกิดเป็นวง (Ring Formation) โมเลกุลของลิแกนด์ต้องมีอะตอมที่ให้อิเล็กตรอนอย่างน้อย 2 อะตอม อะตอมเหล่านี้ได้แก่ ออกซิเจน , กำมะถัน หรือ ไนโตรเจน ทำให้เกิดวงเฮเทอโรไซคลิก (Heterocyclic Ring) ซึ่งโลหะมีพันธะโคเวเลนต์อย่างน้อย 1 พันธะ จากข้อจำกัดของค่าโคเวเลนต์ (Covalency) ทำให้มีเพียงโลหะจำพวก อัลคาไลน์เอิร์ธ แรเอิร์ธ และทรานสิชันเท่านั้นที่สามารถเกิดคีเลชันได้ สารประกอบเชิงซ้อนคีเลตที่เกิดเป็นวงที่มี

ความเสถียร มากที่สุด ใน 1 วงประกอบด้วยอะตอม 5 และ 7 อะตอม ในกรณีที่โลหะมีค่าวาเลนซ์มากกว่า 1 (Multivalency) อาจเกิดวงได้มากกว่า 1 วง วงที่เสถียรแบบไม่อิ่มตัวมีความเสถียรมากกว่าแบบอิ่มตัวเนื่องจากวงที่เสถียรแบบไม่อิ่มตัวสามารถเกิดโครงสร้างแบบเรโซแนนซ์ (Resonance) ได้

นอกจากนี้ค่าพีเอช (pH) ของตัวกลาง ต้องมีค่าสูงพอที่โลหะสามารถแข่งขันกับโปรตรอนในการจับกับอะตอมของลิแกนด์ที่มีค่าพีเอชสูง แต่ถ้าลิแกนด์มีค่าพีเอชสูงเกินไป อาจทำให้โปรตรอนของลิแกนด์หลุดออกเกิดเป็นโลหะไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ ซึ่งจะลดความเข้มข้นของไอออนของโลหะที่สามารถเกิดคีเลชันได้

### ผลของการเกิดคีเลชันในเชิงกายภาพ

การเกิดคีเลชัน สามารถช่วยรักษาความเข้มข้นของไอออนโลหะได้ โดยเฉพาะเมื่อความเข้มข้นของไอออนโลหะมีค่าต่ำ การเกิดคีเลชันจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันและรีดักชันของไอออนโลหะ ซึ่งส่งผลให้เกิดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างทางเคมีขึ้นใหม่และจะมีผลต่อการเร่ง หรือหน่วงความว่องไวต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์

การเกิดคีเลชัน สามารถเพิ่มหรือลดอิเล็กตรอนของเอนไซม์ได้ โดยในการเกิดคีเลชันไอออนของโลหะจะทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมโยงลิแกนด์ 2 ตัว หรือมากกว่าเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีผลต่อการเพิ่มหรือลดอิเล็กตรอนของเอนไซม์ได้

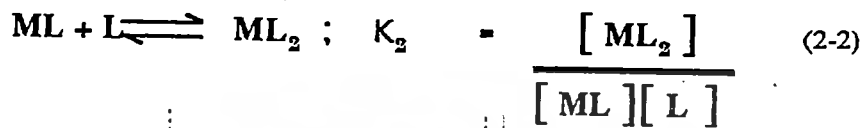
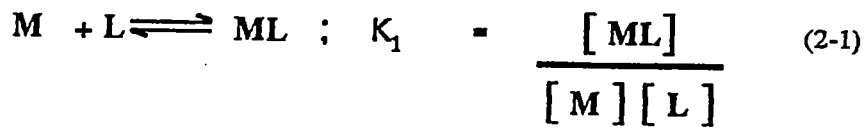
### ค่าคงตัวของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Formation Constant, $K$ )

โดยปกติสารประกอบเชิงซ้อนทุกตัวมีโลหะที่สามารถรับคู่อิเล็กตรอนได้มากกว่า 1 คู่ ดังนั้นในการเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน ถ้ามีไอออนของโลหะละลายอยู่ในน้ำ โลหะเหล่านั้นจะถูกไฮเดรตด้วยโมเลกุลของน้ำ เพราะฉะนั้นแล้วค่าคงตัวของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพิจารณาได้จากปฏิกิริยาการแทนที่ของลิแกนด์ที่แรงกว่าน้ำ

ค่าคงตัวของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นค่าที่แสดงถึงความอยู่ตัว (Stable) ของสารประกอบที่เกิดขึ้น ดังนั้นถ้ามีค่ามากแสดงว่า สารประกอบที่ได้มีความอยู่ตัวสูง (High Stability)

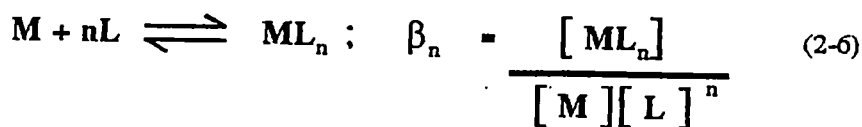
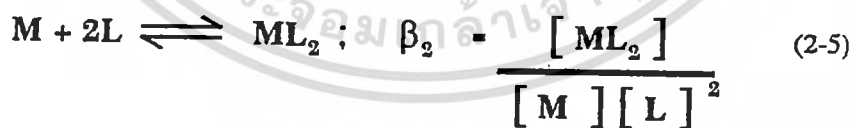
#### **1. ค่าคงตัวของการเกิดแบบขั้น (Stepwise Formation Constant ; $K$ )**

เนื่องจากสารเชิงซ้อนทุกตัวจะมีอะตอมกลางที่สามารถรับคู่อิเล็กตรอนได้มากกว่า 1 คู่ ในกรณีที่ลิแกนด์เป็นชนิดโมโนเดนเทตลิแกนด์ การเกิดสารประกอบก็จะเกิดแบบขั้น (Stepwise) โดยแสดงได้ดังสมการ



## 2. ค่าคงตัวของการเกิดแบบรวม (Overall Formation Constant ; $\beta$ )

คือการหาค่าคงตัวทั้งหมดของแต่ละขั้นที่เกิดปฏิกิริยา โดยสามารถแสดงได้ดังสมการ



**หมายเหตุ :** M แทน อะตอมกลาง

L แทน ลิแกนด์ (Ligand)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงตัวทั้ง 2 แบบมีความสัมพันธ์กันดังนี้

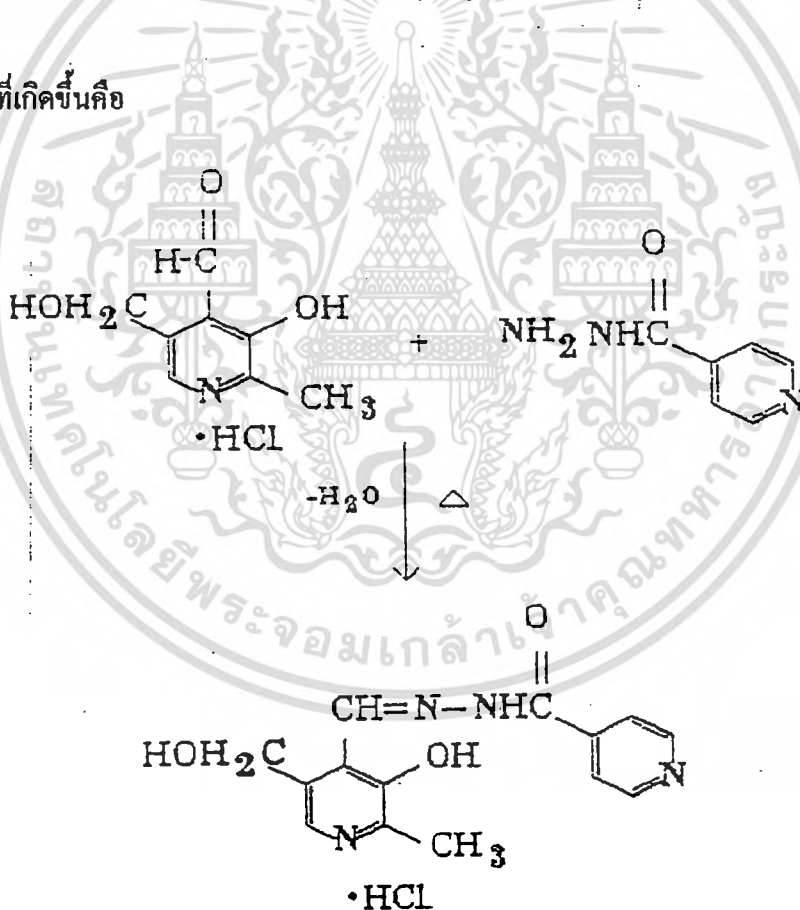
$$\beta_n = K_1 K_2 K_3 \dots K_n$$

(2-7)

**ไพริดอกซัลไอโซนิโคตินอิลไฮดราโซล (Pyridoxal Isonicotinoyl Hydrazone)**

Pyridoxal Isonicotinoyl Hydrazone หรือ PIH เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ ในการรักษาสภาพที่ร่างกายมีไอออนของโลหะเหล็กมากเกินไป (Iron Overload) ซึ่งมักมีสาเหตุมาจากการรักษาโรคเกี่ยวกับเลือด โดยอาศัยคุณสมบัติในการจับกับไอออนของโลหะเหล็กเกิดเป็นสารเชิงซ้อน PIH ถูกสังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1979 โดย Ponka โดยปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่าง Isonicotinoyl Hydrazide กับ Pyridoxal ในบัฟเฟอร์ Sodium Acetate 0.1 M

สมการที่เกิดขึ้นคือ

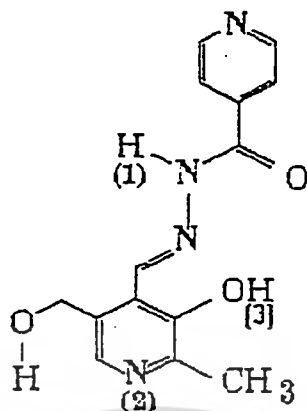


รูปที่ 2-2 สมการแสดงการสังเคราะห์ไพริดอกซัลไอโซนิโคตินอิลไฮดราโซล

หมายเหตุ : ใช้ Pyridoxalhydrochloride ทำปฏิกิริยากับ Isonicotinic Acid Hydrazide

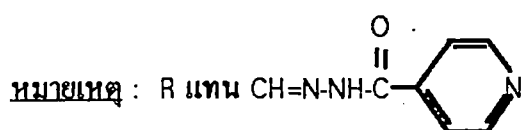
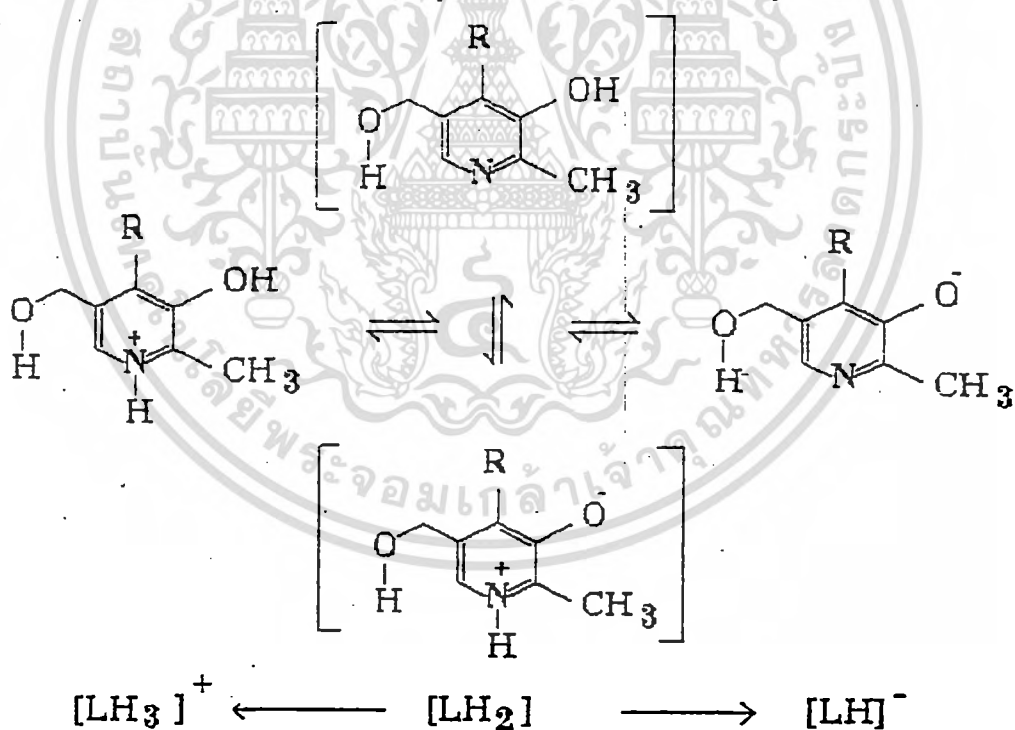
ใน Methanol % Product = 93.60 ; อุณหภูมิการสลายตัวของ Product = 244 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-3 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของ PIH

จากรูปที่ (2-3) โมเลกุล PIH จะมีการรับโปรตอน (Protonation) ที่ตำแหน่งที่ 2 และปลดปล่อยโปรตอน (Deprotonation) ที่ตำแหน่งที่ 1 และ 3 นอกจากนี้ PIH สามารถเกิดการเปลี่ยนรูปได้ที่ภาวะปกติ ดังแสดงในรูปที่ (2-4)

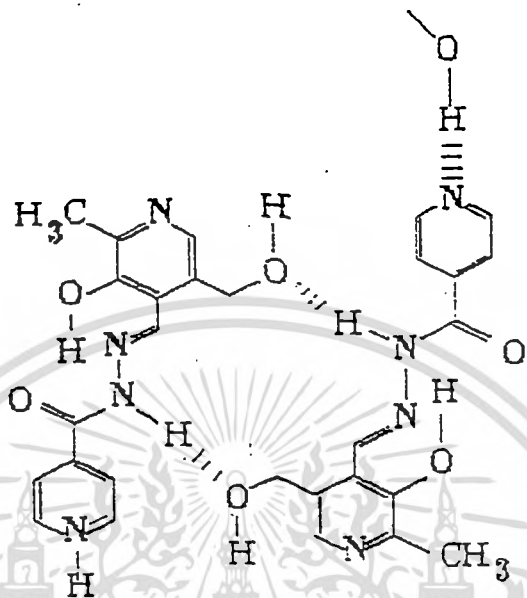


รูปที่ 2-4 แสดงสภาวะสมดุลการเกิด Protonation และ Deprotonation ของ PIH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

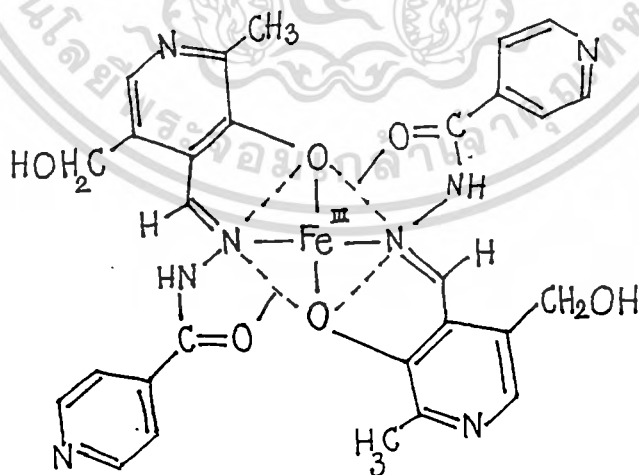
**การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของ PIH**

ในสถานะของแข็ง PIH จะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า และมีการจัดเรียงตัวแบบ ไซคลิกไดเมอร์ (Neutral Cyclic Dimer) ในรูป ทรานส์ ทีโต-ฟอร์ม (trans keto-form) ดังแสดงในรูปที่ (2-5)



รูปที่ 2-5 แสดงโครงสร้างของ PIH ที่มีการจัดเรียงตัวในรูป trans-keto form

PIH สามารถทำปฏิกิริยากับเหล็ก [Fe(II)] ได้ดี เกิดเป็น  $[PIH]_2Fe(III) \cdot 0.5H_2O$  และสารประกอบที่ได้จะมีความคงตัวสูง (high stability) ซึ่งจะเกิดได้ทั้งในสภาวะ กรด กลาง และ เบสโดยสารประกอบเชิงซ้อนดังกล่าวจะเกิดได้ 2 สปีชีส์ คือ  $PIH : Fe(III) = 1:1$  และ  $PIH : Fe(III) = 2:1$

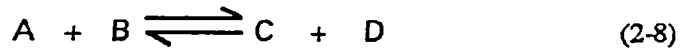


รูปที่ 2-6 แสดงโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH กับ Fe(III)

ในอัตราส่วนโมล  $PIH : Fe(III) = 2:1$

### ผลของความแรงไอออนต่อค่าคงตัวการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน

เพื่อความถูกต้องของค่าคงตัวของสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้ ค่าความเข้มข้นที่ใช้ควรเป็นค่าแอกทิวิตี (Activity) แทนค่าความเข้มข้นที่แท้จริงของสารละลายเนื่องจากในปฏิกิริยาที่ผันกลับได้จะมีสมดุลของปฏิกิริยาเกิดขึ้น ดังตัวอย่างเช่น



ค่าคงตัวของสารประกอบเชิงซ้อนสามารถแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของสารผลิตภัณฑ์ต่อสารตั้งต้น คือ

$$K = \frac{a_C a_D}{a_A a_B} \quad (2-9)$$

K คือค่าคงตัวสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Equilibrium) ต้องใช้ความเข้มข้นส่วนที่มีความไว (Active Concentration หรือ Activity) ของสารผลิตภัณฑ์ด้วยความเข้มข้นส่วนที่มีความไวของสารตั้งต้น

K เป็นค่าคงที่เฉพาะอุณหภูมิที่คงที่ค่าหนึ่ง ๆ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิค่าคงที่นี้จะเปลี่ยนไป ค่าแอกทิวิตีสามารถเปลี่ยนให้มีความเข้มข้นเป็นหน่วยโมลาร์ ได้ดังนี้

$$K = \frac{f_C [C] \times f_D [D]}{f_A [A] \times f_B [B]} = \frac{f_C f_D [C] [D]}{f_A f_B [A] [B]} \quad (2-10)$$

เมื่อ  $f_i$  คือค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีของสาร i

การวิเคราะห์หาปริมาณจะทำในสถานะที่สารละลายมีความเจือจางมาก ๆ ซึ่งสารละลายที่มีความเจือจางมาก ๆ นี้ ค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีจะมีค่าเข้าใกล้ 1 ทำให้ค่า  $f_C f_D / f_A f_B$  มีค่าประมาณ 1 ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายแทนค่าแอกทิวิตีได้และสามารถแสดงค่าคงตัวสมดุลเทอร์โมไดนามิกส์ในเทอมของความเข้มข้นเป็นโมลาร์ของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ได้ดังนี้

$$K = \frac{[C][D]}{[A][B]} \quad (2-11)$$

เดบายและฮัคเกิล (Debye and Huckle) ได้แสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์แอกทิวิตีมีความสัมพันธ์กับประจุของไอออนทั้งหมดในสารละลาย โดยสามารถรายงานจำนวนของประจุไอออนทั้งหมดในสารละลายในเทอม ความแรงของไอออน (Ionic Strength ;  $\mu$ ) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้น ดังสมการ

$$\mu = 1/2 \times \sum (C_i Z_i^2) \quad (2-12)$$

เมื่อ  $C_i$  คือความเข้มข้นเป็นโมลาร์ของไอออนที่มีประจุเป็น  $Z_i$

ถ้าในสารละลายมีสารประกอบหลาย ๆ ชนิดปนกัน สามารถคำนวณค่าความแรงไอออนได้ โดยนำความเข้มข้นของแต่ละไอออนคูณกับกำลังสองของประจุแล้วนำมาบวกกันทุก ๆ ตัว

แต่ในกรณีที่สารละลายที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นเจือจางเพียงพอ สามารถใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายแทนค่าแอกทิวิตีได้และค่าคงตัวที่ได้จะเป็นค่าคงตัวเทอร์โมไดนามิกส์ (Thermodynamic Formation Constant) เนื่องจากค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายที่วัดได้นั้นขึ้นอยู่กับแอกทิวิตีของไอออน ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการทดลองผิดพลาดเนื่องจากการที่ความเข้มข้นสารละลายที่ใช้ควรมีค่าความแรงไอออนเท่ากัน ทำให้โดยการทำให้สารละลายทุกตัวให้มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์คล้ายคลึงกันมากที่สุด ด้วยการเติมอิเล็กโทรไลต์เฉื่อยให้มากเกินพอและเท่ากัน ลงในสารละลายทุกตัวที่ต้องทำการทดลองวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ความแรงไอออนมีค่าคงที่และค่าคงตัวที่วัดได้เมื่อความแรงไอออนคงที่จะเป็นค่าคงตัวของปริมาณสัมพันธ์ (Stoichiometric Formation Constant)

### โพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน (Potentiometric Titration)

#### 1. วิธีโพเทนชิโอเมตริก (Potentiometric method)

โพเทนชิโอเมตริก คือ วิธีการวัดศักย์ไฟฟ้าโดยอิเล็กโทรดที่ไวต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณ ลักษณะของเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้สำหรับวิธีการวิเคราะห์นี้คือกัลวานิกเซลล์ การใช้วิธีโพเทนชิโอเมตริกควบคู่กับเทคนิคการไทเทรต เรียกว่า **โพเทนชิโอเมตริกไทเทรชัน (Potentiometric titration)**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ แบบกัลวานิกเซลล์ ขึ้นอยู่กับแอกทิวิตี (Activity) ของไอออนที่ไวต่อขั้ว (Electrode) ที่มีอยู่ในสารละลาย ดังนั้นจึงสามารถนำวิธีวัดนี้มาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของสารได้

การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ แบบกัลวานิกเซลล์ ประกอบด้วยขั้ว (Electrode) ของเซลล์ 2 ชนิด ดังนี้

1. ขั้วที่บ่งบอก (Indicator Electrode) หรือ ขั้วทำงาน (Working Electrode) เป็นขั้วของเซลล์ที่ไวต่อไอออนที่ต้องการวิเคราะห์หาปริมาณ

2. ขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) เป็นขั้วของเซลล์ที่ต้องไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของไอออนในสารละลาย และต้องมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

จากคุณสมบัติของขั้วอ้างอิง ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้แปรผันโดยตรงกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วบ่งบอก หรือแปรผันตามความเข้มข้นของไอออนในสารละลายนั่นเอง โดยทั่วไปขั้วบ่งบอกจะถูกออกแบบให้มีความไวกับไอออนชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ มีชื่อเรียกทั่วไปว่า ไอออน ซีเลคทีฟ อิเล็กโทรด (Ion Selective Electrode) สำหรับ พีเอชอิเล็กโทรด (pH electrode) หรือ กลาสอิเล็กโทรด (glass electrode) จะถูกออกแบบให้มีความไวกับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) เท่านั้น ส่วนประกอบสำคัญของขั้วชนิดนี้ คือ glass membrane ทำหน้าที่เป็นผนังกั้นที่ยอมให้ไฮโดรเจนไอออนเพียงชนิดเดียวผ่านเข้าออก pH electrode

pH electrode โดยทั่วไปมีลักษณะดังรูปที่ (2-7) ซึ่งเป็นคอมบิเนชันอิเล็กโทรด (Combination Electrode) ประกอบด้วยขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) ซึ่งทำด้วย Ag/AgCl จุ่มอยู่ในสารละลาย KCl 3 M สารละลายนี้จะเชื่อมต่อกับสารละลายภายนอกที่ต้องการวัดโดยผ่าน ไดอะเฟรม (diaphragm) สำหรับขั้วบ่งบอก (Indicator Electrode) ประกอบด้วยหลอดแก้ว ที่แยกต่างหากกับขั้วอ้างอิง (Reference Electrode) ซึ่งข้างในจะประกอบด้วย ส่วนที่นำไฟฟ้าที่ทำด้วย Ag/AgCl เช่นกัน จุ่มอยู่ในกรดไฮโดรคลอริก (HCl acid) และสามารถเชื่อมต่อกับสารละลายภายนอกที่ต้องการวัดโดยผ่าน glass membrane โดย membrane ชนิดนี้จะยอมให้  $H^+$  ผ่านเข้าออก ดังนั้น pH electrode จึงมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า กลาสอิเล็กโทรด (glass electrode)



รูปที่ 2-7 แสดง Combination electrode

ข้อจำกัดบางประการของ pH electrode ที่อาจมีผลต่อการวัดความเข้มข้นของ  $H^+$

1. ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สมมาตร (Asymmetry Potential) น้ำสารละลายที่ต้องการวัดค่าพีเอช มีสมบัติเหมือนกับสารละลายภายใน pH electrode ทุกอย่าง และผิวของ glass membrane ทั้งสองข้างก็มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหมือนกัน ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้ควรมีค่าเท่ากับศูนย์ แต่จากการวัดจริงๆ พบว่า ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ ( $E^0$ ) ไม่เป็นศูนย์ ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้นี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สมมาตร

Glass electrode ที่มีอายุการใช้งานนานขึ้นพบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไม่สมมาตรจะมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามผลของศักย์ไฟฟ้าสมมาตรที่เกิดขึ้นนี้ สามารถขจัดได้ด้วยการปรับเทียบ (calibrate) โดยใช้สารละลายมาตรฐานที่ทราบค่าพีเอชแน่นอน หรือใช้วิธีการไทเทรตกรด-เบส (Acid-Base titration) แทนก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ดีไฮเดรชัน (Dehydration) ขั้ว glass ที่ใช้วัดพีเอชของสารละลาย ไม่ควรปล่อยให้แห้ง ผิวของ glass membrane ควรให้ถูกไฮเดรตตลอดเวลาด้วยสารละลายเกลือที่เป็นชนิดเดียวกัน และมีความเข้มข้นเท่ากับสารละลายภายในเอง (ในกรณีนี้ใช้สารละลาย KCl 3 โมล) มิฉะนั้นจะทำให้การวัดค่าพีเอชของสารละลายผิดพลาดได้

3. แวเรียชัน อิน จังก์ชัน โปเทนเชียล (Variation in junction potential) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยต่อของสารละลายอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้ค่าพีเอชที่วัดได้ไม่แน่นอน โดยอาจเปลี่ยนแปลงได้ถึง 0.01 หน่วยของพีเอช

4. ข้อผิดพลาดจากค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์ ในการวัดค่าพีเอชของสารละลายทุกครั้ง ต้องมีการทำ อิเล็กโทรด คาลิเบรชัน (electrode calibration) ทุกครั้งด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐาน ถ้าสารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้ในการทำ calibration มีค่าผิดไป เนื่องจากการเก็บรักษาไว้ไม่ดีทำให้ส่วนประกอบภายในเกิดการเปลี่ยนแปลง จะเป็นเหตุทำให้ค่าพีเอชที่วัดจากสารละลายผิดพลาดด้วย ดังนั้นในการกำจัดข้อบกพร่องชนิดนี้ และในกรณีที่ปรับค่า ionic strength ของการทำ electrode calibration และค่า ionic strength ของสารละลายให้ใกล้เคียงกัน ( ionic strength ที่แตกต่างกันมีผลต่อค่าพีเอช และ อิเล็กโทรด พารามิเตอร์ ที่ได้ออกมาแตกต่างกันด้วย ) จึงทำ electrode calibration ด้วยวิธีการไทเทรตกรด-ด่างซึ่งเป็นการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า (mv) โดยตรงและใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์คำนวณค่า  $E^{\circ}$ , electrode slope และ ความเข้มข้น ค่าใดค่าหนึ่ง ซึ่งค่าทั้งหมดเหล่านี้สามารถนำมาคำนวณย้อนกลับเป็นค่าพีเอชได้

#### ศักย์ไฟฟ้าของขั้ว (Electrode Potential)

ศักย์ไฟฟ้าของขั้วหมายถึง พลังงานทางไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการทำให้ประจุลบเคลื่อนที่ มีระยะทางเท่ากับบอแนนต์ หรือ หมายถึงพลังงานไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการดึงประจุบวกจากบอแนนต์ให้เคลื่อนที่เข้าหาขั้วนั้น ปกติจะไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรง แต่สามารถหาความแตกต่างระหว่างขั้ว 2 ขั้วได้ โดยนำขั้วทั้ง 2 ชนิดประกอบกันเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีแล้ววัดค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้ววัดที่ 25 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 1 หน่วยแอกติวิตีเรียกว่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วมาตรฐาน ( Standard electrode potential,  $E^{\circ}$  ) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น และ อุณหภูมิ ศักย์ไฟฟ้าของขั้วจะเปลี่ยนไปตามสมการของเนิสต์ (nernst equation) ดังนี้

พิจารณาปฏิกิริยาคือ



$$E = E^{\circ} - 2.303 [RT/nF] \cdot \log[a_{red}/a_{ox}] \quad (2-14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$$a_{\text{red}} = \gamma_{\text{red}}[A_{\text{red}}] \quad (2-15)$$

$$a_{\text{ox}} = \gamma_{\text{ox}}[A_{\text{ox}}] \quad (2-16)$$

แทนค่า a ลงในสมการ จะได้

$$E = E^{\circ} - 2.303 [RT/nF] \cdot \log[\gamma_{\text{red}}A_{\text{red}}/\gamma_{\text{ox}}A_{\text{ox}}] \quad (2-17)$$

ปกติในกรณีของไอออนชนิดเดียวกันค่า  $\gamma$  จะไม่แตกต่างกันมากนักถือว่า  $\gamma_{\text{red}} = \gamma_{\text{ox}}$  จะได้

$$E = E^{\circ} - 2.303 [RT/nF] \cdot \log[A_{\text{red}}/A_{\text{ox}}] \quad (2-18)$$

เมื่อ	$E$	=	ศักย์ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์
	$E^{\circ}$	=	ศักย์ไฟฟ้าของขั้วมาตรฐาน มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์
	$R$	=	ค่าคงที่ของแก๊ส มีค่าเท่ากับ 8.314
	$T$	=	อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นเคลวิน (K)
	$F$	=	ค่าคงที่ของฟาราเดย์ มีค่าเท่ากับ 96,500 คูลอมบ์
	$n$	=	จำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายเทในปฏิกิริยา
	$[A_{\text{red}}]$	=	ค่าความเข้มข้นของตัวรีดิวซ์ มีหน่วยเป็นโมลาร์
	$[A_{\text{ox}}]$	=	ค่าความเข้มข้นของตัวออกซิไดซ์ มีหน่วยเป็นโมลาร์

จากสมการของเนิสท์ ทำให้สามารถคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วที่จุ่มในสารละลายที่มี ความเข้มข้น และ อุณหภูมิต่างๆ กัน เมื่อต้องการหาค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ก็จะสามารถคำนวณหาได้จากสมการ

$$E = E_{\text{cathode}} - E_{\text{anode}} \quad (2-19)$$

สำหรับ combination electrode ที่รวมเอา indicator electrode และ reference electrode เข้าด้วยกัน โดยให้ขั้วที่มี glass membrane เป็นขั้วเอโนด และ ขั้ว Ag/AgCl เป็นขั้วแคโทด ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จะมีค่าดังนี้คือ

$$E = E_{\text{ref}} - E_{\text{Ag/AgCl}} + E_{\text{I}} + (V_2 - V_1) \quad (2-20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โดย

- $E_j$  = ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อของสารละลายระหว่างขั้ว  $E_{ref}$  กับสารละลายที่ต้องการจะวิเคราะห์
- $V_1$  = ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่าง glass membrane กับสารละลาย  $H^+$  ที่ต้องการจะวิเคราะห์
- $V_2$  = ศักย์ไฟฟ้าที่รอยต่อระหว่าง glass membrane กับสารละลาย  $H^+$  ที่อยู่ในขั้ว Glass membrane

เนื่องจาก  $E_{ref}$ ,  $E_{Ag/AgCl}$  และ  $E_j$  เป็นค่าคงที่ ดังนั้น ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จะมีค่าเท่าไรนั้น ขึ้นกับค่าความต่างศักย์ ระหว่าง  $V_2$  กับ  $V_1$  และค่า  $V_2$  กับ  $V_1$  จะมีค่าเท่าไรขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย เพราะเกิดการแลกเปลี่ยน  $H^+$  ที่ผิวของ glass membrane ถ้าความต่างศักย์ของผิว glass membrane ทั้งสองข้างมีค่าน้อย จะได้ว่า

$$V_2 - V_1 = \text{constant} + 2.303 [RT/F] \cdot \log[1/H^+] \quad (2-21)$$

แทนค่าสมการ (2-21) ลงในสมการ (2-20) จะได้

$$E = E_{ref} - E_{Ag/AgCl} + E_j + \text{constant} + 2.303 [RT/F] \cdot \log[1/H^+] \quad (2-22)$$

จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$E = k + 2.303 [RT/F] \cdot \text{pH} \quad (2-23)$$

$k$  คือค่าคงที่ ที่สามารถคำนวณได้จากการวัดศักย์ไฟฟ้าของสารละลายมาตรฐานที่ทราบค่าพีเอชแน่นอน ในกรณีที่ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 1 หน่วยแอกติวิตี ค่าพีเอชจะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ที่ได้ก็คือ ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานนั่นเอง ( $E^\circ$ ) (จะเห็นว่าค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานที่อุณหภูมิใดๆ ก็ตาม ในทางปฏิบัติจะอนุโลมว่าค่า  $k$  ก็คือค่า  $E^\circ$  ด้วย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. โปเทนชิอเมตริกไทเทรชัน (Potentiometric Titration)

คือวิธีการวิเคราะห์ที่ใช้เทคนิคการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าควบคู่ไปกับเทคนิคการไทเทรต โดยการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายทุกครั้งที่มีการเติมไทเทรนต์ (Titrant) ลงไป แล้วนำข้อมูลที่วัดได้อันประกอบด้วยค่าศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ ปริมาณไทเทรนต์ที่เติมลงไป ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่ใช้ทั้งหมด และ ชุดแบบจำลองค่าคงตัวของสารประกอบเชิงซ้อน จากนั้นนำมาคำนวณโดยวิธี Numerical methode ก็สามารถหาสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นพร้อมทั้งค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยมีหลักการกว้างๆ ซึ่งจะอธิบายพร้อมโปรแกรม SUPERQUAD ดังต่อไปนี้

### หลักการของโปรแกรม SUPERQUAD (SUPER)

โปรแกรม SUPERQUAD เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาฟอร์แทนที่ได้รับการพัฒนามาเพื่อใช้ในการคำนวณค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของสารเชิงซ้อน โดยโปรแกรมนี้สามารถใช้คำนวณความเข้มข้นของสารตั้งต้น หรือค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของอิเล็กโทรดได้ด้วย โดยโปรแกรมเปิดทางเลือกให้กำหนดค่าเหล่านี้ให้เป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จากนั้นให้โปรแกรมคำนวณค่าออกมา หลักการของโปรแกรม SUPERQUAD มีดังนี้

สำหรับสปีชีส์ทางเคมี  $A_a B_b \dots$  ที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีในสารละลายจะมีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

$$\beta = [A_a B_b \dots] / [A]^a [B]^b \dots \quad (2-24)$$

เมื่อ  $A, B =$  สารตั้งต้น (สำหรับโปรแกรมนี้ไม่เกิน 4 ตัว)

$[A], [B] =$  ความเข้มข้นทั้งหมดของสารตั้งต้นที่เป็นอิสระแต่ละตัว

สมการสมดุลของมวล (mass-balance equation) ที่จะสอดคล้องกับสปีชีส์ทางเคมี และค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาจากสมการที่ 2-24 จะเป็น

$$T_A = [A] + \dots \sum_k a_k \beta_{ab} \dots [A]^a [B]^b \dots \quad (2-25)$$

$$T_B = [B] + \dots \sum_k b_k \beta_{ab} \dots [A]^a [B]^b \dots \quad (2-26)$$

... = ...

$T_A, T_B =$  ความเข้มข้นทั้งหมดของสาร  $A, B, \dots$  ที่เกี่ยวข้อง ในปฏิกิริยาโดยสมมุติจำนวนสปีชีส์ที่มีทั้งหมดเท่ากับ  $k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เป็นอิสระ [A] , [B]... อย่างน้อยตัวหนึ่งจะถูกวัดปริมาณโดยตรง โดยใช้ อิเล็กโทรดที่ไวต่อสารนั้นๆ (ในการทดลองนี้ใช้ พิเอชอิเล็กโทรด ทำการวัด  $H^+$  เพียงตัวเดียว) ทำ การวัดศักย์ไฟฟ้าทุกจุดของสมการ (2-26) ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ  $T_A, T_B \dots$  อันเนื่อง มาจากการไทเทรต

การแก้สมการที่ (2-26) โดยวิธี numerical method จะทำให้สามารถหาค่าตัวแปรที่ต้องการ เช่น ค่าคงที่การเกิดปฏิกิริยา ( $\beta$ ) หรือ ความเข้มข้น  $T_A, T_B \dots$  ได้

เนื่องจากสมการ (2-26) จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อมีแบบจำลองที่สมมูลที่สมเหตุผล การคาดคะเน ว่าในระบบปฏิกิริยาที่ศึกษาอยู่จะมีสปีชีส์ใดในระบบสมมูลบ้าง สามารถทำได้โดยการศึกษาปฏิกิริยา นั้นอย่างลึกซึ้งเท่านั้น ในทางปฏิบัติอาศัยการศึกษาที่ใกล้เคียง และ อาศัยหลักการทางสถิติเข้าช่วย

### หลักการของโปรแกรม ELECTRODE CALIBRATION (ELE)

โปรแกรม ELE เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการทำ electrode calibration สมการหลักที่ใช้สำหรับ โปรแกรมนี้คือสมการ extended Nernst equation มีดังนี้คือ

$$E = E^0 + S_L \log[H^+] + A[H^+] + B/[H^+] \quad (2-27)$$

เมื่อ

$E$  = ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์

$E^0$  = ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานของขั้วอิเล็กโทรด มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์

$S_L$  = ค่าความเข้มข้น มีค่าเท่ากับ  $RT/nF$

$A$  = ค่า Acid correction factor

$B$  = ค่า Base correction factor

สำหรับการไทเทรตที่ยังอยู่ในช่วงที่เป็นกรด (acidic range) และก่อนถึงจุดยุติ (end point) ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน  $[H^+]$  คำนวณจากสมการ

$$[H^+] = [(C_B V_B - C_A V_A)/(V_A + V_B)] \quad (2-28)$$

เมื่อผ่านจุดยุติ (end point) ไปแล้ว และอยู่ในช่วงเป็นด่าง (basic range) สามารถคำนวณ  $[H^+]$  จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$[H^+] = 10^{Kw} / [(C_A V_A - C_B V_B) / (V_A + V_B)] \quad (2-29)$$

เมื่อ

- $V_A, V_B$  = ปริมาตรของกรด และ เบสที่ใช้  
 $C_A, C_B$  = ความเข้มข้นของกรด และ เบสที่ใช้  
 $Kw$  = ค่าคงที่การแตกตัวของน้ำตามสมการ  $H_2O = H^+ + OH^-$   
 จะมีค่าเท่ากับ  $\log(Kw) = 14$  ที่ standard state หรือ  
 $Kw = 13.50$  ที่สาร  $KNO_3$  0.15 โมลาร์ อุณหภูมิ  $37^\circ C$   
 $A, B$  = acid, base correction ในกรณีทีอิลคโทรดไม่เป็นลิเนียร์  
 ตามสมการ nernst equation

จากสมการ (2-26) ถึง (2-28) สามารถเขียนออกมาในรูปฟังก์ชันได้ดังนี้

$$E = f(E^0, S_L, C_A, C_B, V_A, V_B, Kw) \quad (2-30)$$

ตัวแปรทั้งหมด 8 ตัวจากสมการ ( 2-30 ) มี  $E$  และ  $V_B$  เราสามารถวัดได้ในขณะทำการไทเทรต  $C_A, C_B$  และ  $V_A$  เป็นค่าที่หาได้จากการเตรียมสารละลาย ดังนั้นทำให้เราสามารถคำนวณหาค่าของ  $E^0$  และ  $Kw$  ได้ ในกรณีที่มีข้อมูลจากการไทเทรตมากพอ เราเพียงแต่วัดค่า  $E^0$  และ  $Kw$  ให้มากพอเท่านั้น ก็สามารถคำนวณตัวแปรที่เหลือคือ  $E^0, S_L, C_A, C_B$  และ  $Kw$  ออกมาได้ ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้า ( $E$ ) เราจะใช้ glass electrode เป็นตัววัดเมื่อทำการไทเทรตด้วยสารละลายต่าง (เติม  $V_B$ ) ค่าความเข้มข้นของโปรตรอน  $[H^+]$  จะเปลี่ยนไป ทำให้ค่า  $E$  ที่อ่านได้เปลี่ยนแปลง

ข้อดีของการใช้โปรแกรม ELB คือ ทำให้ได้ค่า  $E^0$  และ  $S_L$  อยู่ในเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกับสภาวะการทดลองมากขึ้น (เช่นค่าความแรงไอออน และ อุณหภูมิ) และสามารถตรวจสอบความเข้มข้นของกรด หรือ ค่าคงตัวใดตัวหนึ่งได้ด้วย

## บทที่ 3

### การทดลอง

#### 1. สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารละลายโพแทสเซียมไนเตรท ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์  
 สารละลาย 0.25 โมลาร์กรดไนตริก ใน 0.50 โมลาร์โพแทสเซียมไนเตรท  
 สารละลาย 0.25 โมลาร์โซเดียมไฮดรอกไซด์ ใน 0.50 โมลาร์โพแทสเซียมไนเตรท  
 สารละลายมาตรฐานซิงค์(II)คลอไรด์ ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์  
 สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้น 0.01, 0.05 และ 0.10 โมลาร์  
 สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ ความเข้มข้น 0.01, 0.05 และ 0.10 โมลาร์  
 สารละลายซิงค์(II)ไนเตรท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์  
 สารละลายคอปเปอร์(II)ไนเตรท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์  
 สารละลายนิเกิล(II)ไนเตรท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์  
 สารละลายโคบอลต์(II)ไนเตรท ความเข้มข้น 0.05 และ 0.10 โมลาร์  
 สารละลายแคดเมียม(II)ไนเตรท ความเข้มข้น 0.05 และ 0.10 โมลาร์  
 สารละลายเหล็ก(II)ซัลเฟต ความเข้มข้น 0.05 และ 0.10 โมลาร์  
 สารละลายเฟอร์ริก(III)ไนเตรท ความเข้มข้น 0.05 และ 0.10 โมลาร์  
 สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น  
 สารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง  
 สารละลายฟีนอล์ฟทาเลอิน ความเข้มข้น 0.001 โมลาร์  
 สารละลายบัฟเฟอร์ทีเอช = 5 เฮกซามีน 30 % คอปรีมาตร  
 สารละลายบัฟเฟอร์ทีเอช = 10 แอมโมเนีย/แอมโมเนียมคลอไรด์  
 สารละลายอินดิเคเตอร์ฟีนอล์ฟทาเลอิน  
 สารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคที  
 สารละลายอินดิเคเตอร์ไซตีนอลอเรนจ์  
 สารละลายอินดิเคเตอร์แวนิเลินบลูปี  
 เมอเรกซ์อินดิเคเตอร์ในรูปของผสมของแข็ง (solid indicator mixture)  
 สารละลายไพริคอกซัลไฮโดรไมโคตินอิลไฮดราโซน  
 น้ำกลั่น 3 ครั้ง และ ก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องชั่งละเอียด

เครื่องพีเอชมิเตอร์

เครื่องกวนสารละลายโดยใช้แรงทางแม่เหล็กพร้อมแท่งแม่เหล็ก

อุปกรณ์เครื่องแก้วต่างๆ

ขวดสามคอขนาด 50 มิลลิลิตร

ไมโครปิเปตขนาด 0-50 ไมโครลิตร

เทอร์โมมิเตอร์

อ่างน้ำร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้พร้อมปั๊มน้ำขนาดเล็ก

เครื่องมือวัดการดูดกลืนแสง รุ่น UV- 160 บริษัท Shimadzu

เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ พร้อมพีเอชมิเตอร์และอิเล็กโทรดของ Schott รุ่น TR-600

คอมพิวเตอรฺรุ่น 496 DX-33 พร้อมเครื่องพิมพ์

ถังแก๊สไนโตรเจน พร้อมมาตรวัดความดันและวาล์วควบคุมความดัน

## 3. การเตรียมสารละลายที่ใช้ในการทดลอง

### 1. สารละลายโพแทสเซียมไนเตรท ความเข้มข้น 0.50 โมลาร์

ชั่งผงโพแทสเซียมไนเตรท เกรดงานวิเคราะห์ที่ผ่านการอบที่ 120 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชั่งละเอียดได้น้ำหนัก 101.1122 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งปรับปริมาตรให้ได้ 2 ลิตร

จากการทดลองสารละลายโพแทสเซียมไนเตรทที่เตรียมได้มีความเข้มข้น 0.50 โมลาร์

### 2. สารละลาย 0.25 โมลาร์กรดไนตริกใน 0.50 โมลาร์โพแทสเซียมไนเตรท

ทำการปิเปตสารละลายกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 70 % น้ำหนักโดยน้ำหนัก ความหนาแน่น 1.424 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มา 31.66 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร นำไปผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไนเตรทเข้มข้น 1.0 โมลาร์ปริมาตร 1 ลิตร

### 3. สารละลาย 0.25 โซเดียมไฮดรอกไซด์ใน 0.50 โมลาร์โพแทสเซียมไนเตรท

ทำการปิเปตสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.50 โมลาร์มา 1 ลิตร ผสมกับสารละลายโพแทสเซียมไนเตรทที่มีความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ปริมาตร 1 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. สารละลายมาตรฐานซิงค์(II)คลอไรด์

ซิงค์ซิงค์(II)คลอไรด์ เกรดงานวิเคราะห์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้น้ำหนัก 3.4081 กรัมละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งแล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งจนมีปริมาตร 250 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร

จากการทดลองสารละลายมาตรฐานซิงค์(II)คลอไรด์ที่เตรียมได้มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

#### 5. สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.01, 0.05 และ 0.10 โมลาร์<sup>(4)</sup>

ซิงค์แคลเซียมคาร์บอเนต เกรดงานวิเคราะห์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้น้ำหนัก 0.10009 กรัม 0.50045 กรัม และ 1.0009 กรัม ตามลำดับ นำไปละลายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ให้ผงแคลเซียมคาร์บอเนตละลายหมด โดยใช้ปริมาณกรดน้อยที่สุด แล้วทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง จนมีปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตร

#### 6. สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอความเข้มข้น 0.01, 0.05 และ 0.10 โมลาร์<sup>(4,6)</sup>

ซิงค์อีดีทีเอ เกรดงานวิเคราะห์ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องซังละเอียดให้น้ำหนัก 0.9307 กรัม, 4.6532 กรัม และ 9.306 กรัม ตามลำดับละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง แล้วเติมผงแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปริมาณ 0.03 กรัม, 0.15 กรัมและ 0.30 กรัม ตามลำดับ ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งให้มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร (การเติมแมกนีเซียมซัลเฟต หรือ แมกนีเซียมคลอไรด์ ลงไปในสารละลายนี้ เพื่อให้อินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคที่ทำงานได้ดีขึ้น เห็นการเปลี่ยนแปลงสีที่ชัดเจนขึ้น)

หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ<sup>(4,6)</sup> ความเข้มข้น 0.01, 0.05 และ 0.10 โมลาร์ตามลำดับ โดยนำมาไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตความเข้มข้น 0.01, 0.05 และ 0.10 โมลาร์ที่เตรียมได้จากข้อ (5) ตามลำดับ โดยการเปิดสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปกรวย ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 10 ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 แอมโมเนีย/แอมโมเนียมคลอไรด์ เติมสารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคที่ 2-3 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ แต่ละความเข้มข้นตามลำดับ ที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีอู๋นแดง (wine red) เป็นสีน้ำเงินที่ไม่มีสีแดงปน ทำการทดลองซ้ำอีกครั้งแล้วคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ

อัตราส่วนจำนวนโมลของการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต และ สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอมีค่าเท่ากับ 1:1

จากการทดลองสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่เตรียมได้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.01 โมลาร์ 0.05 โมลาร์ และ 0.099 โมลาร์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 7. สารละลายซิงค์(II) ในเตรทความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ซังผงซิงค์ในเตรท เกรคงานวิเคราะห์ที่ผ่านการอบที่ 110 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องซังละเอียดได้น้ำหนัก 7.4367 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งให้มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายซิงค์(II) ในเตรท<sup>(6,7)</sup> โดยปิเปตสารละลายซิงค์(II) ในเตรท (0.10 โมลาร์) มา 25 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 10 ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 แอมโมเนีย/แอมโมเนียมคลอไรด์ เติมสารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคที่

2-3 หยด แล้วนำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน (0.10 โมลาร์) จากข้อ (6) ที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีแดงเหือดงุ่น (wine red) เป็นสีน้ำเงิน (blue)

อัตราส่วนจำนวนโมลของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายซิงค์(II) ในเตรทเท่ากับ 1 : 1

จากการทดลองสารละลายซิงค์(II) ในเตรทที่เตรียมได้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.103 โมลาร์

### 8. สารละลายคอปเปอร์(II) ในเตรท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ซังผงคอปเปอร์(II) ในเตรทโครไฮเตรท เกรคงานวิเคราะห์ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องซังละเอียด ได้น้ำหนัก 6.0415 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งให้มีปริมาตรครบ 250 มิลลิลิตร

การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายคอปเปอร์(II) ในเตรท<sup>(6,7)</sup> โดยปิเปตสารละลายคอปเปอร์(II) ในเตรท (0.10 โมลาร์) มา 25 มิลลิลิตร ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 10 ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 แอมโมเนีย/แอมโมเนียมคลอไรด์ เติมสารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคที่ 3 หยด และเติมสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (0.10 โมลาร์) จากข้อ (6) ให้มากเกินไปและทราบปริมาตรที่แน่นอน ทำการไทเทรตย้อนกลับด้วยสารละลายมาตรฐานซิงค์(II) คลอไรด์ (0.10 โมลาร์) เพื่อหาปริมาณอิตีทีเอที่เหลือ ที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีม่วงน้ำเงิน

อัตราส่วนจำนวนโมลของการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายมาตรฐานซิงค์(II) คลอไรด์ และสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอที่เหลือเท่ากับ 1:1 จำนวนโมลของสารละลายมาตรฐานอิตีทีเอที่ใช้ไปสมมูลกับจำนวนโมลของสารละลายคอปเปอร์(II) ในเตรทที่ใช้ในการไทเทรต ดังนั้นจึงคำนวณหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายคอปเปอร์(II) ในเตรทได้

จากการทดลอง สารละลายคอปเปอร์(II) ในเตรทที่เตรียมได้มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.096 โมลาร์

### 9. สารละลายโคบอลต์(II) ในเครท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ชั่งผงโคบอลต์(II)ในเครท เฮกซะไฮเดรท เกรคงานวิเคราะห์ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชั่งละเอียด ให้น้ำหนัก 7.2768 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตรจนครบปริมาตร

หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโคบอลต์(II)ในเครท<sup>(6,7)</sup>ได้ โดยเปิดสารละลายโคบอลต์(II)ในเครท (0.05 โมลาร์) มา 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง เติมสารละลายอินดิเคเตอร์ไซลีนอลอเรนจ์ 3 หยด และเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจางจนสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเหลือง ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 5 ด้วยบัฟเฟอร์พีเอช 5 เฮกซามีน จะได้สารละลายสีแดง อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และเติมสารละลายฟีนานโทรีนที่มีความเข้มข้น 0.001 โมลาร์ ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร เพื่อปรับปรุงจุดยุติ จากนั้นนำไปไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอจากข้อ (6) ที่จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีส้มเหลือง

อัตราส่วนจำนวนโมลที่สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายโคบอลต์(II) ในเครทเท่ากับ 1 : 1 หรือ  $1\text{Ml } 0.05\text{M-EDTA} \equiv 2.9467 \text{ mg. Co}^{(6)}$  จากค่าที่คำนวณได้สามารถเทียบกลับเป็นเมื่อใช้สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ได้ ดังนั้นจึงสามารถหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโคบอลต์(II)ในเครท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ได้

จากการทดลองสารละลายโคบอลต์(II)ในเครทที่เตรียมได้มีความเข้มข้น เท่ากับ 0.100 โมลาร์

### 10. สารละลายนิเกิล(II) ในเครท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ชั่งผงนิเกิล(II)ในเครทเฮกซะไฮเดรท เกรคงานวิเคราะห์ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชั่งละเอียด ให้น้ำหนัก 7.2709 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตรจนครบปริมาตร

หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายนิเกิล(II)ในเครท<sup>(5,6,7)</sup> โดยเปิดสารละลายนิเกิล(II)ในเครท (0.10 โมลาร์) มา 25 มิลลิลิตร เติมอินดิเคเตอร์ของผสมของแฉิ่งเมอเรกไซด์ (solid indicator mixture) 50 มิลลิกรัม (เตรียมเป็นของผสมของแฉิ่งเนื่องจากอินดิเคเตอร์ตัวนี้ไม่เสถียรในรูปสารละลาย)<sup>(3,4)</sup> ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 10 ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 แอมโมเนีย/แอมโมเนียมคลอไรด์ ประมาณ 10-20 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีเหลือง นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (0.10 โมลาร์)จากข้อ (6) ที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีม่วง (พีเอชของสารละลายสุดท้ายต้องมีค่า 10)<sup>(7)</sup>

อัตราส่วนจำนวนโมลของสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับสารละลายนิเกิล(II)ในเครทเท่ากับ 1 : 1

จากการทดลองสารละลายนิเกิล(II)ในเครทที่เตรียมได้มีความเข้มข้น เท่ากับ 0.102 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 11. สารละลายแคดเมียม(II) ในเตรท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ซึ่งผงแคดเมียม(II) ในเตรท เทตระไฮเครท เกรคงานวิเคราะห์ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชั่งละเอียด ได้น้ำหนัก 7.7120 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตรจนครบปริมาตร

หากความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแคดเมียม(II) ในเตรท<sup>(6,7)</sup> ได้ โดยการปิเปตสารละลายแคดเมียม(II) ในเตรท (0.05 โมลาร์) มา 25 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 3 ครั้ง 50 มิลลิลิตร และเติมสารละลายอินดิเคเตอร์ไซลิโนลลอเรนจ์ 3 หยด จากนั้นเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกเจือจาง 1 หยด จะได้สารละลายสีเหลือง ปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 5 ด้วยสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 5 เฮกซามีน จะได้สารละลายสีแดงเข้ม นำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (0.05 โมลาร์) จากข้อ (6) ที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นสีเหลือง

อัตราส่วนจำนวน โมลของการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายแคดเมียม(II) ในเตรทและสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอ เท่ากับ 1:1 หรือ  $1 \text{ Ml } 0.05\text{-EDTA} \equiv 5.621 \text{ mg. Cd}^{(6)}$  ค่าที่คำนวณได้สามารถเทียบกลับเป็นเมื่อใช้สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ได้ ดังนั้นจึงสามารถหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแคดเมียม(II) ในเตรทความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ได้

จากการทดลองสารละลายแคดเมียม(II) ในเตรทที่ได้มีความเข้มข้น เท่ากับ 0.099 โมลาร์

### 12. สารละลายเฟอร์ริก (III) ในเตรท ความเข้มข้น 0.10 โมลาร์

ซึ่งผงเฟอร์ริก(III) ในเตรท โนนะไฮเครท เกรคงานวิเคราะห์ ที่อบแห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ด้วยเครื่องชั่งละเอียด ได้น้ำหนัก 10.1069 กรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ทำการปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งในขวดวัดปริมาตรขนาด 250 มิลลิลิตรจนครบปริมาตร

หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์ริก(III) ในเตรท<sup>(6,7)</sup> โดยปิเปตสารละลายเฟอร์ริก(III) ในเตรท (0.05 โมลาร์) มา 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร และปรับพีเอชของสารละลายให้เท่ากับ 2-3 โดยใช้เครื่องมือวัดพีเอช เติมสารละลายอินดิเคเตอร์แวนเนอิมินบลูปี 5 หยด จากนั้นนำไปไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (0.05 โมลาร์) จากข้อ (6) ทำการไทเทรตจนกระทั่งสีม่วงน้ำเงินของสารละลายเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเทา แสดงว่าใกล้ถึงจุดยุติ ให้หยดสารละลายอีดีทีเอลงไปอีก 1 หยด สีของสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง แสดงว่าถึงจุดยุติ (ที่จุดยุติสีของสารละลายเฟอร์ริก(III) ในเตรท จะเปลี่ยนจากสีม่วงน้ำเงินเป็นสีเหลือง)

อัตราส่วนจำนวน โมลของการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเฟอร์ริก(III) ในเตรทและสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอเท่ากับ 1:1 หรือ  $1 \text{ Ml } 0.05\text{-EDTA} = 2.793 \text{ mg. Fe}$  ค่าที่คำนวณได้สามารถเทียบกลับเป็นเมื่อใช้สารละลายมาตรฐานอีดีทีเอที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ได้

จากการทดลองสารละลายเฟอร์ริก(III) ในเตรทที่เตรียมได้มีความเข้มข้น เท่ากับ 0.100 โมลาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. สารละลายบัฟเฟอร์ที่เอช 5 เสกซามีน 30 เปอร์เซนต์น้ำหนักต่อปริมาตร

นำผงเสกซามีนเกรดงานวิเคราะห์ มาอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง นำมาชั่งโดยใช้เครื่องชั่งละเอียดให้ได้ 30 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งจนมีปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร

14. สารละลายบัฟเฟอร์ที่เอช 10 แอมโมเนีย/แอมโมเนียมคลอไรด์

เตรียมโดยปีปेटสารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 142 มิลลิลิตร เติมนลงในเกลียวแอมโมเนียมคลอไรด์เกรดงานวิเคราะห์ 17.5 กรัม ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้งจนมีปริมาตรครบ 250 มิลลิลิตรในขวดวัดปริมาตร

15. สารละลายอินดิเคเตอร์ฟีนอล์ฟทาลีน

ชั่งผงฟีนอล์ฟทาลีน 0.5 กรัม ละลายในเอทานอล 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 3 ครั้ง 50 มิลลิลิตร พร้อมทั้งคนสารละลายอย่างสม่ำเสมอกรองเอาส่วนที่ใส

16. สารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคที

ละลายเอริโอโครมแบลคที 0.4 กรัม ด้วยเมทานอลบริสุทธิ์ 100 มิลลิลิตร

17. สารละลายอินดิเคเตอร์ไซลิโนลลอเรนซ์

ละลายผงไซลิโนลลอเรนซ์ 0.5 กรัม ในน้ำกลั่น 3 ครั้ง 100 มิลลิลิตร

18. สารละลายอินดิเคเตอร์แวลูเอมีนบลูปี

ละลายผงแวลูเอมีนบลูปี 1 กรัม ในน้ำกลั่น 3 ครั้ง 100 มิลลิลิตร

19. อินดิเคเตอร์ของผสมของแจ็งเมอเรกไซด์ (solid indicator mixture)

บดผงเมอเรกไซด์ 0.1 กรัม ผสมกับ ผงโพแทสเซียมไนเตรท 10 กรัม ให้เข้ากัน โดยในการไทเทรตแต่ละครั้งใช้อินดิเคเตอร์นี้ประมาณ 50 มิลลิกรัม<sup>(7)</sup>

20. สารละลายไพรคอกซัลไอโซนิโคตินอิลไฮคราโซน<sup>(2)</sup> (PIH)

นำผงไพรคอกซัลไอโซนิโคตินอิลไฮคราโซนมาเจือจางด้วยสารละลายโพแทสเซียมไนเตรท 0.5 โมลาร์ โดยชั่งผงไพรคอกซัลไอโซนิโคตินอิลไฮคราโซนมา 0.0527 กรัม ในสารละลายโพแทสเซียมไนเตรท 0.5 โมลาร์ 250 มิลลิลิตร

สารละลายไพรคอกซัลไอโซนิโคตินอิลไฮคราโซนที่เตรียมได้มีความเข้มข้น 0.7371 mM.

#### 4. วิธีการทดลอง

เลือกเงื่อนไขการทดลอง โดยให้การทดลองนี้กระทำภายใต้อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ด้วยค่าความแรงไอออนมีค่าเท่ากับ 0.5 โมลาร์  $\text{KNO}_3$  และทำการผ่านก๊าซไนโตรเจนเข้าไปในขวด ก้นกลมตลอดการทดลอง

##### 1. การทำอิเล็กโทรด ควบเทียบ (electrode calibration)

###### 1.1 เตรียมสารละลาย

1.2 ใช้เครื่องออโตเมตริก ไทเทรชัน (autometric titration) โดยผ่านโปรแกรม tr600 มีคำสั่งตามลำดับดังนี้

C:\>tr600 <enter>

โปรแกรมเข้าสู่ LOGO menu ของ tr600 ให้ <enter> อีกครั้ง

username : chem1

password : chem1

โปรแกรมเข้าสู่ main menu

กด **F2** (method list)

เลือก ecal <enter>

โปรแกรมเข้าสู่ menu ของ method ecal

กด **F1** (start)

โปรแกรมจะแสดง samplename documentation และ comments documentation

ให้พิมพ์ข้อความต่อไปนี้โดยไม่ให้ผิดพลาด

e15k9501 <enter>

ves[wat=20.0,aco1=0.25,acv=2.0], <enter>

bur[bco0=-0.25],ele[eze1=450.0] <enter>

Calibration E

กด **F1**

โปรแกรมจะทำการเติมสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์จำนวน 2 มิลลิลิตร และทำการไทเทรตสารละลายกรดนี้ด้วยสารละลายเบส โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ โดยอัตโนมัติ และจะหยุดเมื่อถึงพีเอชประมาณ 12 จากนั้นเครื่องจะทำการพิมพ์ข้อมูลออกมาทางเครื่องพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทเทรตข้อมูลชุดอื่นต่อโดยเริ่มคั้นใหม่ที่ main menu หรือ ออกจากโปรแกรม

โดย กด **F4** (return to main menu)

กด **F5** (quit)

รายละเอียดของคำสั่งใน sample name documentatuon และ comments documentation ข้างบนจำนวน 4 บรรทัดแสดงอยู่ใน ภาคผนวก ข

## 2.การทำโปรโทเนชัน คอนสแตนต์ (Protonation Constants)

2.1 เตรียมสารละลาย PIH ความเข้มข้น 0.7371 มิลลิโมล และมีค่า Ionic Strength เท่ากับ 0.5 โมลาร์ของสารละลายโพแทสเซียมไนเตรท จำนวน 20 มิลลิลิตรลงใน vessel

2.2 จาก Main menu

กด **F2** (method list)

เลือก filla

เป็นโปรแกรมการเติมสารละลายกรดไนตริกจำนวน 2.00 มิลลิลิตรลงใน vessel

2.3 จาก Main menu

กด **F2** (method list)

เลือก atob <enter>

เป็นการไทเทรตจากกรดไปเบส โปรแกรมจะเข้าสู่ menu ของ method atob

กด **F1** (start)

โปรแกรมจะแสดง sample name documentation และ comments documentation

ให้พิมพ์ข้อความต่อไปนี้โดยไม่ให้ผิดพลาด

```
d15k9501 <enter>
```

```
ves[wat=20.0,aco0=0.25,acv=2.0,ilc1=0.75], <enter>
```

```
bur[bco0=-0.25],ele[eze1=450.0] <enter>
```

```
Protonation PIH
```

กด **F1** (start)

โปรแกรมจะทำการไทเทรตสารละลายนี้ โดยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์โดยอัตโนมัติ จนถึงที่เอชประมาณ 12.0 เครื่องจะหยุดและพิมพ์ทุกอย่างออกมาทางเครื่องพิมพ์

ความหมายของคำสั่งจะเหมือนกับการทำอิเล็กทรอนิกส์ทรานสดิวเซอร์ที่เพิ่มขึ้นมาคือ  $11c1=0.75$  จะหมายถึงลิแกนด์ความเข้มข้น 0.75 โมล

#### 2.4 การไทเทรตย้อนกลับจากข้อมูลชุด d15k9501 โดยสารละลายที่ใช้ยังเหมือนเดิม

จาก Main menu

กด **F2** (method list)

เลือก btoa <enter>

เป็นการไทเทรตจากเบสไปกรด โปรแกรมจะเข้าสู่ menu ของ method btoa

กด **F1** (start)

โปรแกรมจะแสดง sample name documentation และ comments documentation

ให้พิมพ์ข้อความต่อไปนี้โดยไม่ให้ผิดพลาด

d15k9502, from=d15k9501 <enter>

<enter>

<enter>

<enter>

กด **F1** (start)

โปรแกรมจะทำการไทเทรตสารละลายใน vessel โดยกรดในตริก ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ โดยอัตโนมัติจนกระทั่งถึงพีเอชประมาณ 2.00 เครื่องจะหยุดและพิมพ์ข้อมูลออกมาทางเครื่องพิมพ์ ใน sample name documentation และ comment documentation จะพิมพ์แค่บรรทัดแรก ให้บรรทัดที่เหลือว่างไว้ เมื่อนำไปคำนวณโปรแกรมจะใช้ข้อมูลต่อเนื่องจากชุดแรก

#### 2.5 เดิมโลหะแคดเมียม(II) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ลงไปใน vessel

จาก Main menu

กด **F2** (method list)

เลือก atob <enter>

เป็นการไทเทรตจากกรดไปเบส โปรแกรมจะเข้าสู่ menu ของ method atob

กด **F1** (start)

โปรแกรมจะแสดง sample name documentation และ comments documentation

ให้พิมพ์ข้อความต่อไปนี้โดยไม่ให้ผิดพลาด

```
d15k9503, from=d15k9502 <enter>
```

```
ves[m1c0=0.1,m1v=0.08] <enter>
```

```
<enter>
```

```
PIH + Cd(II) (0.1 , 80 µL)
```

กด **F1** (start)

โปรแกรมจะทำการไทเทรตสารละลายนี้ โดยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.25 โมลาร์โดยอัตโนมัติ จนถึงพีเอชประมาณ 12.0 เครื่องจะหยุดและพิมพ์ทุกอย่างออกมาทางเครื่องพิมพ์

ความหมายของคำสั่งจะเหมือนกับการทำอิลคโตรดแคลิเบรชัน ที่เพิ่มขึ้นมาคือ m1c0=0.1 จะหมายถึงโลหะแคดเมียม(II)ความเข้มข้น 0.1 โมล ส่วนบรรทัดสุดท้ายจะบอกรายละเอียดซึ่งโปรแกรมจะไม่นำไปคำนวณ

2.6 การไทเทรตย้อนกลับจากข้อมูลชุด d15k9503 และเพิ่มปริมาณโลหะ

จาก Main menu

กด **F2** (method list)

เลือก btoa <enter>

เป็นการไทเทรตจากเบสไปกรด โปรแกรมจะเข้าสู่ menu ของ method btoa

กด **F1** (start)

โปรแกรมจะแสดง sample name documentation และ comments documentation

ให้พิมพ์ข้อความต่อไปนี้อย่าให้ผิดพลาด

```
d15k9504, from=d15k9503 <enter>
```

```
ves[m1c0=0.1,m1v=0.16] <enter>
```

```
<enter>
```

```
PIH + Cd(II) (0.1 , 80+80 µL)
```

กด **F1** (start)

โปรแกรมจะทำการไทเทรตสารละลายใน vessel โดยกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์โดยอัตโนมัติจนกระทั่งถึงพีเอชประมาณ 2.00 เครื่องจะหยุดและพิมพ์ข้อมูลออกมาทางเครื่องพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. การคำนวณ

1. เปลี่ยนข้อมูลจากโปรแกรม TR600 ให้เป็นอินพุทของโปรแกรม ELE และ SUPERQUAD โดยใช้โปรแกรม DCO มีคำสั่งดังนี้

```
C:\>dco <enter>
```

โปรแกรมจะเปลี่ยนข้อมูลจาก TR600 เป็นข้อมูลอินพุทของโปรแกรม ELE ดังนี้

e15k9501      ไปเป็น      e01

โปรแกรมจะเปลี่ยนข้อมูลจาก TR600 เป็นข้อมูลอินพุทของโปรแกรม SUPERQUAD ดังนี้

d15k9501      ไปเป็น      d01

d15k9502      ไปเป็น      d02

d15k9503      ไปเป็น      d03

d15k9504      ไปเป็น      d04

2. การคำนวณหา อิเล็กโทรด พารามิเตอร์ (electrode parameter) โดยคำสั่ง ELE คือ

```
C:\>ele<e01>e01.a <enter>
```

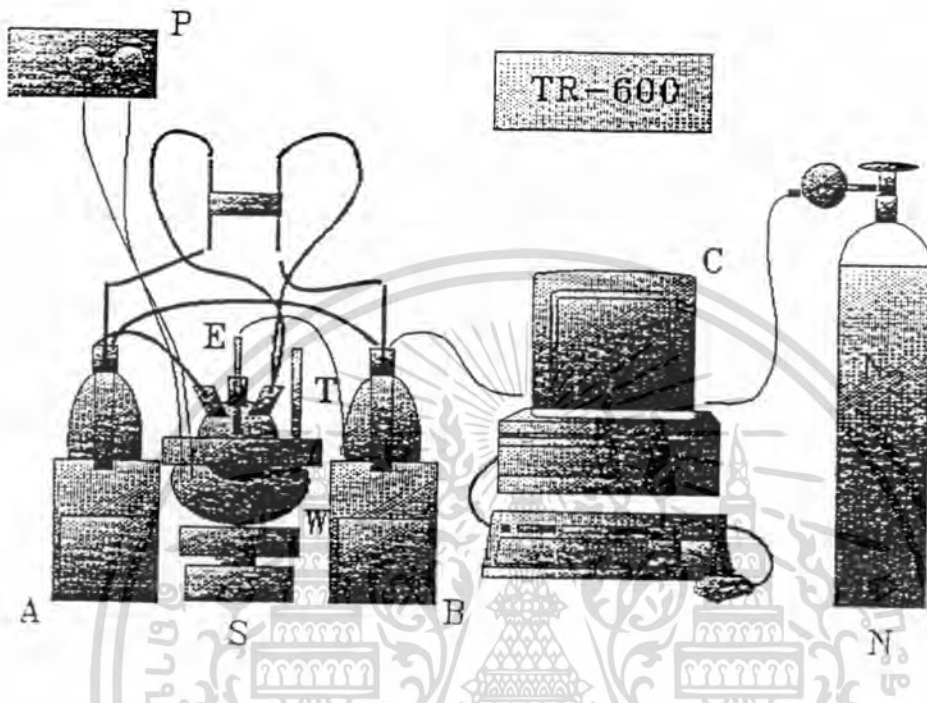
จะได้ไฟล์ e01.a ออกมาสามารถเปิดไฟล์เพื่อดูค่า  $E^0$  ความเข้มข้นกรด หรือ เบส ได้โดยใช้โปรแกรม CW และสามารถทำการแก้ไขเพื่อความถูกต้องได้

3. การคำนวณหาค่าโปรโทเนชัน คอนสแตนต์ (Protonation Constants)

```
C:\>sc<d01>d01.a <enter>
```

จะได้ไฟล์ d01.a ออกมา ทำการเปิดไฟล์ได้โดยโปรแกรม CW ในไฟล์ที่ได้จะมีรายละเอียดของข้อมูลต่าง ๆ คือ  $E^0$ ,  $C_A$ ,  $C_B$ ,  $S_L$  โดยรายละเอียดในไฟล์ข้อมูลสามารถดูได้ในภาคผนวก

จากนั้นทำการทดลองโดยเปลี่ยนโลหะเป็นอีก 6 ตัวที่เหลือโดยทำซ้ำตั้งแต่รายการที่ 1-3 แต่จะเปลี่ยนชื่อไฟล์ตั้งแต่รายการที่ 2 เพื่อความสะดวกในการดำเนินงาน



รูปที่ 3-1 แสดงการจัดวางเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- หมายเหตุ :
- P = ป้อนน้ำและอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ
  - E = อีเลคโตรด
  - A = ชุดไทเทรตอติโนมิตีที่บรรจุกรดเป็นไทแทนต์
  - B = ชุดไทเทรตอติโนมิตีที่บรรจุเบสเป็นไทแทนต์
  - T = เทอร์โมมิเตอร์
  - W = อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
  - S = เครื่องกวนสารละลายด้วยแท่งแม่เหล็ก
  - C = คอมพิวเตอร์
  - N<sub>2</sub> = แก๊สไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิจารณ์

#### ผลการทดลองที่ได้จากการไทเทรต

##### 1. การแคริเบรทอิลเลคโทรด

ในการทำการทดลองทำการแคริเบรทอิลเลคโทรด ข้อมูลที่ได้คือ ปริมาณไทเทรนต์ที่เติมลงไป ค่า pH และ ค่าศักย์ไฟฟ้าของสารละลายแต่ละจุดของการไทเทรต (ตารางที่ 4-2) และ กราฟที่ 4-1 นำข้อมูลที่ได้มาแปลงโดยใช้โปรแกรม DCO จะได้ข้อมูลสำหรับเป็นอินพุทของโปรแกรม ELE นำอินพุทที่ได้มาทำการคำนวณโดยโปรแกรม ELE จะได้เอาท์พุทออกมา (ภาคผนวก ก) ผลการคำนวณที่ได้มีดังนี้

1. ความเข้มข้นของกรดไนตริก = 0.2500 โมลาร์

2. ค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐาน = 422.2200

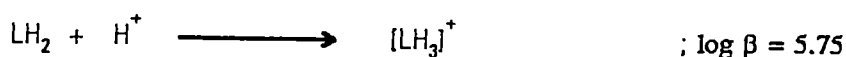
ทั้งนี้ต้องทราบความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.10 โมลาร์ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ = 0.2550 โมลาร์

ในการทดลองนี้ใช้ลิแกนด์ (PIH) ความเข้มข้น 0.01470 โมลาร์

##### 2. การศึกษาปฏิกิริยาโปรตอนเนชัน และ ดีโปรตอนเนชันของ PIH

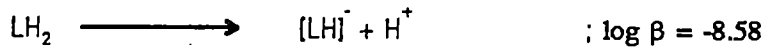
ในการศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยการไทเทรตสารละลาย PIH ในสารละลาย 0.5 M KNO<sub>3</sub> โดยทำการไทเทรตทั้งไป (กรด -> เบส) และ กลับ (เบส -> กรด) ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตแสดงในตารางที่ 4-3 และ กราฟที่ 4-2 , 4-3 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณโดยใช้โปรแกรม SUPERQUAD ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณประกอบไปด้วย ค่าคงที่ของการเกิดสปีชีส์ต่างๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน และ กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้น ดังกราฟที่ 4-25 เราสามารถอธิบายการเกิดสปีชีส์ได้ดังสมการต่อไปนี้

- การรับโปรตอน PIH สามารถรับโปรตอนได้ 1 ตัวตั้งแต่พีเอช 2 ถึง 7

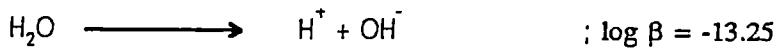


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

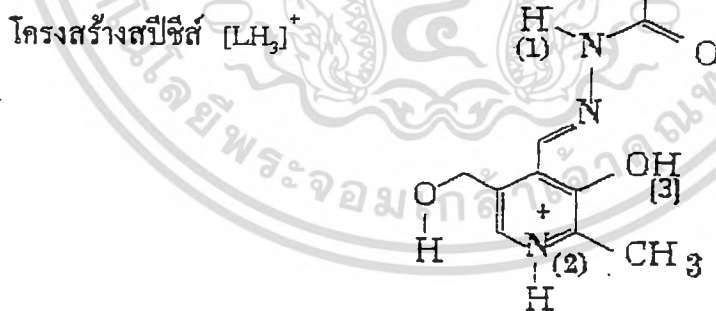
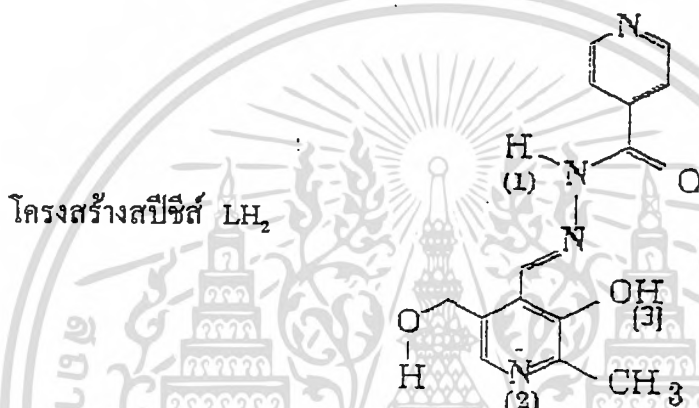
-การปล่อยโปรตอน pKa สามารถปล่อยโปรตอนได้ 1 ตัวที่พีเอชตั้งแต่ 4.2 ขึ้นไป



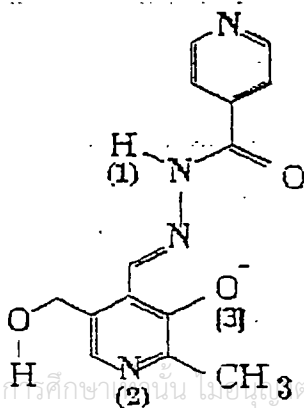
-นอกจากนี้ในการทดลองยังเกิดการปลดปล่อยโปรตอนของน้ำอีกด้วยสมการ



จากการวิเคราะห์พบว่า โครงสร้างของสปีชีส์ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



โครงสร้างสปีชีส์  $[\text{LH}]^-$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การยืนยันการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนโดยการวัดการดูดกลืนแสงช่วง ยูวี-วิสิเบิล โดยวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย PIH ที่พีเอช 2.00 5.00 7.00 11.00 และ 12.00 ได้ผลการทดลอง ดังกราฟที่ 4-66 ถึง 4-70 สามารถนำข้อมูลที่ได้มารวมกันดังกราฟที่ 4-107 พบว่าที่พีเอชน้อยกว่า 7 นั้นจุดสูงสุดของการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 330 นาโนเมตร เมื่อพีเอชสูงขึ้นพบว่าจุดสูงสุดของการดูดกลืนแสงเปลี่ยนไปที่ความยาวคลื่นประมาณ 390 นาโนเมตร ซึ่งสอดคล้องกับกราฟที่ 4-25 แสดงการเกิดสปีชีส์ของ PIH ที่พีเอชต่าง ๆ จึงนำเสนอได้ว่าในช่วงกรดจะเกิดสปีชีส์  $[LH_2]^+$  และในช่วงเบสจะเกิดสปีชีส์  $[LH]$

### 3.การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH + Cd(II)

จากการไทเทรตครั้งแรกที่มีปริมาณของ Cd(II) 0.00446 มิลลิโมล กับ PIH ได้ข้อมูลประกอบด้วย ปริมาตรของไทเทรนต์ที่ใช้ ค่าศักย์ไฟฟ้า และ ค่าพีเอชของสารละลายที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดของการไทเทรต ดังกราฟที่ 4-4 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณด้วยโปรแกรม SUPERQUAD จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังกราฟที่ 4-26 จากกราฟพบว่าที่ พีเอชตั้งแต่ 7 จะเริ่มเกิดสปีชีส์  $[MLH]^+$  และ  $[LH]$  ส่วนสปีชีส์  $[LH_3]^+$  จะเกิดในช่วงพีเอชต่ำๆ (ช่วงกรด) และจะหมดไปเมื่อเข้าสู่ช่วงเบส  $[LH_2]$  จะมีมากที่สุดที่พีเอช 7.5 เมื่อถึงพีเอช 10 จะหมดไป

ในการไทเทรตครั้งที่ 2 และ 3 โดยเพิ่มปริมาณของ Cd(II) เป็น 0.00842 และ 0.01634 มิลลิโมลตามลำดับจะได้ข้อมูลเช่นเดียวกับการไทเทรตครั้งแรก ดังกราฟรูปที่ 4-5 , 4-6 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการคำนวณโดยโปรแกรมSUPERQUAD เช่นเดียวกับตอนแรก จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่ความเข้มข้นของ Cd(II) เป็น 0.00842 และ 0.01634 มิลลิโมล ดังกราฟรูปที่ 4-27 และ 4-28

จากการเปรียบเทียบการไทเทรตทั้ง 3 ครั้งพบว่าเกิดการเกิดสปีชีส์ต่างๆ จะเกิดในช่วงพีเอชที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความเข้มข้นของโลหะเพิ่มมากขึ้น เพอร์เซนต์ของสปีชีส์  $[MLH]^+$  จะมากขึ้น และมีเพอร์เซนต์ของสปีชีส์  $[LH]$  ลดลง

การวัดการดูดกลืนแสงของ สารละลายแคดเมียม(II) และ สารละลาย Cd(II) + PIH ที่พีเอช 2.00 5.04 8.34 9.92 และ 11.90 ได้ข้อมูลดังกราฟที่ 4-57 , 4-58 , 4-76 ถึง 4-80 และกราฟที่ 4-108 พบว่าลักษณะของเส้นกราฟการดูดกลืนแสงที่ได้ของ PIH ที่พีเอช 12.00 เปรียบเทียบกับสารละลาย Cd(II)+PIH ที่พีเอช 11.90 นั้นจุดสูงสุดของการดูดกลืนแสงอยู่ที่จุดเดียวกันประมาณ 390 นาโนเมตร เหตุที่ไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงนี้อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของแคดเมียม(II) ที่มีคุณสมบัติเป็นสารโคออร์ดิเนชันที่ 4 ซึ่งไม่ดูดกลืนแสงที่ยูวี-วิสิเบิล ทำให้ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ การยืนยันการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสปีชีส์โดยการวัดการดูดกลืนแสงไม่อาจทำได้ อย่างไรก็ตาม ผลจากโปรแกรม SUPERQUAD บอกได้ว่าการเกิดสปีชีส์ต่าง ๆ จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH + Co(II)

จากการไทเทรตครั้งแรกที่มีปริมาณของ Co(II) 0.00350 มิลลิโมล กับ PIH ได้ข้อมูลประกอบด้วย ปริมาตรของไทเทรนต์ที่ใช้ ค่าศักย์ไฟฟ้า และ ค่าพีเอชของสารละลายที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดของการไทเทรต ดังกราฟที่ 4-7 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณด้วยโปรแกรม SUPERQUAD จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังกราฟที่ 4-29 จากกราฟพบว่าที่ พีเอชตั้งแต่ 3.5 จะเริ่มเกิดสปีชีส์  $[MLH]^+$  และ  $[LH]^-$  ส่วนสปีชีส์  $[LH_3]^+$  จะเกิดในช่วงพีเอชต่ำๆ (ช่วงกรด) และจะหมดไปเมื่อเข้าสู่ช่วงเบส  $[LH_2]$  จะมีมากที่สุดที่พีเอช 3.8 เมื่อถึงพีเอช 9 จะหมดไป

ในการไทเทรตครั้งที่ 2 และ 3 โดยเพิ่มปริมาณของ Co(II) เป็น 0.00680 และ 0.01330 มิลลิโมล ตามลำดับจะได้ข้อมูลเช่นเดียวกับการไทเทรตครั้งแรก ดังกราฟที่ 4-8 , 4-9 เมื่อนำข้อมูลที่ได้นำมาทำการคำนวณโดยโปรแกรม SUPERQUAD เช่นเดียวกับตอนแรก จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่ความเข้มข้นของ Cd(II) เป็น 0.00680 และ 0.01330 มิลลิโมล ดังกราฟรูปที่ 4-30 และ 4-31

จากการเปรียบเทียบการไทเทรตทั้ง 3 ครั้งพบว่าที่ความเข้มข้นของโลหะน้อยการเกิดสปีชีส์ต่างๆ จะเกิดในช่วงพีเอชที่ต่ำกว่า เมื่อความเข้มข้นของโลหะเป็น 0.00680 มิลลิโมล การเกิดสปีชีส์ต่างๆ จะเกิดในช่วงพีเอชที่สูงกว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะเป็น 0.01330 มิลลิโมล ช่วงพีเอชที่เกิดสปีชีส์จะลดลงมาที่พีเอชประมาณ 7 และจากการทดลองเปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[MLH]^+$  จะมากขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[LH]^-$  ลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะมากขึ้น

การวัดการดูดกลืนแสงของโคบอลต์ที่พีเอช 2.10 และ 11.85 ให้ข้อมูลดังกราฟที่ 4-53 และ 4-54 และการวัดการดูดกลืนแสงของ Co(II) + PIH ที่พีเอช 1.47 , 1.96 , 4.11 , 10.00 และ 11.69 ได้ข้อมูลดังกราฟที่ 4-87 ถึง 4-91 นำข้อมูลจากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH และ Co(II)+PIH มารวมกันดังกราฟที่ 4-109 พบว่ากราฟของ PIH มีลักษณะเหมือนเคมคือที่พีเอชต่ำจุดสูงสุดการดูดกลืนอยู่ที่ 330 นาโนเมตร และที่พีเอชสูงจุดสูงสุดการดูดกลืนอยู่ที่ 390 นาโนเมตร แต่ของสารละลาย Cd(II)+PIH ที่ทุกพีเอชจะพบว่าจะมีจุดการดูดกลืนอยู่อีกจุดที่ประมาณ 440 นาโนเมตร และกราฟการดูดกลืนมีลักษณะแตกต่างกันมากน่าจะเป็นการยืนยันได้ว่าเกิดสปีชีส์ขึ้นใหม่ซึ่งสอดคล้องกับกราฟแสดงการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่สปีชีส์ต่าง ๆ (กราฟที่ 4-29) ที่คำนวณได้จากโปรแกรม SUPERQUAD พบว่าสปีชีส์ใหม่ที่เกิดขึ้นสามารถเกิดขึ้นในช่วงกรดได้

#### 5.การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH + Cu(II)

จากการไทเทรตครั้งแรกที่มีปริมาณของ Cu(II) 0.00432 มิลลิโมล กับ PIH ได้ข้อมูลประกอบด้วย ปริมาตรของไทเทรนต์ที่ใช้ ค่าศักย์ไฟฟ้า และ ค่าพีเอชของสารละลายที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดของการไทเทรต ดังกราฟที่ 4-10 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณด้วยโปรแกรม SUPERQUAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นดังกราฟที่ 4-32 จากกราฟพบว่าที่ พีเอช ตั้งแต่ 7 จะเริ่มเกิดสปีชีส์  $[MLH]^+$  และ เริ่มเกิด  $[LH]$  ที่พีเอช 5 ส่วนสปีชีส์  $[LH_3]^+$  จะเกิด ในช่วงพีเอชต่ำๆ (ช่วงกรด) และจะหมดไปเมื่อเข้าสู่ช่วงเบส  $[LH_2]$  จะมีมากที่สุดที่พีเอช 6.8 เมื่อถึงพีเอช 10 จะหมดไป

ในการไทเทรตครั้งที่ 2 และ 3 โดยเพิ่มปริมาณของ  $Cu(II)$  เป็น 0.00816 และ 0.01584 มิลลิโมลตามลำดับจะได้ข้อมูลเช่นเดียวกับการไทเทรตครั้งแรก ดังกราฟที่ 4-11 , 4-12 เมื่อนำข้อมูลที่ ได้มาทำการคำนวณโดยโปรแกรม SUPERQUAD เช่นเดียวกับตอนแรก จะได้กราฟแสดง การกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่ความเข้มข้นของ  $Cd(II)$  เป็น 0.00816 และ 0.01584 มิลลิโมล ดังกราฟรูปที่ 4-33 และ 4-34

จากการเปรียบเทียบการไทเทรตทั้ง 3 ครั้งพบว่าเกิดการเกิดสปีชีส์ต่างๆ ของความเข้มข้นโลหะที่ 0.00432 และ 0.01584 มิลลิโมล จะเกิดในช่วงพีเอชที่ใกล้เคียง และมีลักษณะของเส้นโค้งการกระจาย ตัวของ  $[LH_2]$  ค่อนข้างกว้าง ต่างกับความเข้มข้นโลหะที่ 0.00816 มิลลิโมล มีลักษณะแคบ และมีเปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[LH_2]$  สูงสุดที่พีเอช 7.5 เปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[MLH]^+$  จะมากขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[LH]$  ลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะเพิ่มมากขึ้น

การวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย  $Cu(II)$  และ  $Cu(II)+PIH$  ที่พีเอชต่าง ๆ ผลที่ได้แสดง ออกมาในกราฟที่ 4-50 ถึง 4-52 , 4-87 ถึง 4-90 และกราฟที่ 4-110 แสดงการดูดกลืนแสงรวม จาก กราฟที่ 4-110 พบว่าเส้นกราฟการดูดกลืนแสงของสารละลาย  $Cu(II)$  และ  $Cu(II)+PIH$  มีลักษณะ แตกต่างกันคือสารละลายของ  $Cu(II)+PIH$  มีจุดสูงสุดการดูดกลืนที่ประมาณ 310 - 320 นาโน เมตรน่าจะเป็นการยืนยันได้ว่าเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสปีชีส์ใหม่ขึ้นแล้ว เนื่องจากจุดสูงสุดของการ ดูดกลืนแสงของ  $PIH$  นั้นอยู่ที่ 330 และ 390 ในช่วงกรด และ เบสตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูล จากการคำนวณโดยโปรแกรม SUPERQUAD ที่ได้ผลออกมาว่าสปีชีส์ใหม่ที่เกิดขึ้นนั้นคือ  $[MLH]^+$

#### 6.การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง $PIH + Fe(II)$

จากการไทเทรตครั้งแรกที่มีปริมาณของ  $Fe(II)$  0.00495 มิลลิโมล กับ  $PIH$  ได้ข้อมูล ประกอบด้วย ปริมาตรของไทเทรนต์ที่ใช้ ค่าศักย์ไฟฟ้า และ ค่าพีเอชของสารละลายที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดของการไทเทรต ดังกราฟที่ 4-13 จากนั้นนำข้อมูลที่ ได้มาคำนวณด้วยโปรแกรม SUPERQUAD จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังกราฟที่ 4-35 จากกราฟพบว่าที่ พีเอชตั้งแต่ 6 จะเริ่มเกิดสปีชีส์  $[MLH]^+$  และ  $[LH]$  ส่วนสปีชีส์  $[LH_3]^+$  จะเกิดในช่วงพีเอชต่ำๆ (ช่วงกรด) และจะหมดไปเมื่อเข้าสู่ช่วงเบส  $[LH_2]$  จะมีมากที่สุดที่พีเอช 6.5 เมื่อถึงพีเอช 10 จะหมดไป

ในการไทเทรตครั้งที่ 2 และ 3 โดยเพิ่มปริมาณของ  $Fe(II)$  เป็น 0.00798 และ 0.01473 มิลลิ โมล ตามลำดับจะได้ข้อมูลเช่นเดียวกับการไทเทรตครั้งแรก ดังกราฟที่ 4-14 , 4-15 เมื่อนำข้อมูลที่ ได้

มาทำการคำนวณโดยโปรแกรมSUPERQUAD เช่นเดียวกับตอนแรก จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่ความเข้มข้นของ Fe(II) เป็น 0.00798 และ 0.01473 มิลลิโมลดังกราฟรูปที่ 4-36 และ 4-37

จากการเปรียบเทียบการไทเทรตทั้ง 3 ครั้งพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโลหะการเกิดสปีชีส์  $[MLH]^+$  และ  $[LH]$  จะเกิดที่พีเอชสูงขึ้น และพบว่าเปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[MLH]^+$  จะมากขึ้น และเปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[LH]$  ลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะเพิ่มมากขึ้น

การวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย Fe(II) และ Fe(II)+PIH ที่พีเอชต่าง ๆ ผลที่ได้แสดงออกมาในกราฟที่ 4-61 ถึง 4-65 , 4-71 ถึง 4-75 และกราฟที่ 4-111 แสดงการดูดกลืนแสงรวม จากกราฟที่ 4-111 พบว่าเส้นกราฟการดูดกลืนแสงของ PIH นั้นอยู่ที่ 330 และ 390 ในช่วงกรด และ เบส ตามลำดับเหมือนเดิม แต่กราฟการดูดกลืนแสงของ Fe(II)+PIH ที่พีเอช 10.00 และ 11.00 นั้นจุดสูงสุดการดูดกลืนแสงเลื่อนมาที่ประมาณ 380 นาโนเมตร จากการที่จุดสูงสุดของการดูดกลืนเปลี่ยนแปลงไปสามารถยืนยันถึงการเกิดสปีชีส์ใหม่ขึ้นได้ในช่วงเบส ซึ่งผลที่ได้ตรงกับที่คำนวณโดยการ ใช้โปรแกรม SUPERQUAD ว่าเกิดสปีชีส์ใหม่จริงในช่วงเบสดังกราฟที่ 4-35 , 4-36 , 4-37

#### 7.การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH + Fe(III)

จากการไทเทรตครั้งแรกที่มีปริมาณของ Fe(III) 0.00555 มิลลิโมล กับ PIH ได้ข้อมูลประกอบด้วย ปริมาตรของไทเทรนต์ที่ใช้ ค่าศักย์ไฟฟ้า และ ค่าพีเอชของสารละลายที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดของการไทเทรต ดังกราฟที่ 4-16 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณด้วยโปรแกรม SUPERQUAD จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังกราฟที่ 4-38 จากกราฟพบว่าที่ พีเอชตั้งแต่ 4.5 จะเริ่มเกิดสปีชีส์  $[MLH]^+$  และ  $[LH]$  ส่วนสปีชีส์  $[LH_3]^+$  จะเกิดในช่วงพีเอชต่ำๆ (ช่วงกรด) และจะหมดไปเมื่อเข้าสู่ช่วงเบส  $[LH_2]$  จะมีมากที่สุดที่พีเอช 5.5 เมื่อถึงพีเอช 10 จะหมดไป

ในการไทเทรตครั้งที่ 2 และ 3 โดยเพิ่มปริมาณของ Fe(III) เป็น 0.01295 และ 0.02775 มิลลิโมลตามลำดับจะได้ข้อมูลเช่นเดียวกับการไทเทรตครั้งแรก ดังกราฟที่ 4-17 , 4-18 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการคำนวณโดยโปรแกรมSUPERQUAD เช่นเดียวกับตอนแรก จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่ความเข้มข้นของ Fe(III) เป็น 0.01295 และ 0.02775 มิลลิโมล ดังกราฟรูปที่ 4-39 และ 4-40

จากการเปรียบเทียบการไทเทรตทั้ง 3 ครั้งพบว่าเกิดการเกิดสปีชีส์ต่างๆ จะเกิดในช่วงพีเอชที่แตกต่างกันเมื่อความเข้มข้นของโลหะต่างกัน ที่ความเข้มข้นโลหะ 0.02775 มิลลิโมล การเกิดสปีชีส์ต่าง ๆ จะเกิดขึ้นในช่วงพีเอชต่ำกว่า และ  $[LH_2]$  หมดไปที่พีเอช 5 เท่านั้น ที่พีเอช 3.5 จะเกิด  $[MLH]^+$  และ  $[LH]$  ขึ้น และ  $[LH_3]^+$  จะหมดไป เมื่อความเข้มข้นของโลหะเท่ากับ 0.01295 มิลลิโมล จะมีเปอร์เซ็นต์ของ  $[LH_2]$  สูงสุดที่พีเอช 6.5 และที่พีเอชนี้จะเริ่มเกิด  $[MLH]^+$  และ  $[LH]$  และพบว่า

แนวโน้มนเปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[MLH]^+$  จะมากขึ้น และ เปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[LH]$  ลดลง เมื่อความเข้มข้นของโลหะเพิ่มมากขึ้น

การวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย  $Fe(III)$  และ  $Fe(III)+PIH$  ที่พีเอชต่าง ๆ ผลที่ได้แสดงออกมาในกราฟที่ 4-59 ถึง 4-60 , 4-102 ถึง 4-106 และกราฟที่ 4-112 แสดงการดูดกลืนแสงรวม จากกราฟที่ 4-112 พบว่าเส้นกราฟการดูดกลืนแสงของ  $PIH$  นั้นอยู่ที่ 330 และ 390 ในช่วงกรด และ เบสตามลำดับเหมือนเดิม แต่กราฟการดูดกลืนแสงของ  $Fe(III)+PIH$  นั้นจุดสูงสุดการดูดกลืนแสงเลื่อนมาที่ประมาณ 380 นาโนเมตร จากการที่จุดสูงสุดของการดูดกลืนเปลี่ยนแปลงไปสามารถยืนยันถึงการเกิดสปีชีส์ใหม่ขึ้นในระบบที่ประกอบไปด้วย  $Fe(III)+PIH$  ซึ่งผลที่ได้ตรงกับค่าคำนวณโดยใช้โปรแกรม SUPERQUAD ว่าเกิดสปีชีส์ใหม่จริงดังกราฟที่ 4-38, 4-39 , 4-40

#### 8.การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง $PIH + Ni(II)$

จากการไทเทรตครั้งแรกที่มีปริมาณของ  $Ni(II)$  0.00458 มิลลิโมลกับ  $PIH$  ได้ข้อมูลประกอบด้วย ปริมาตรของไทเทรนต์ที่ใช้ ค่าศักย์ไฟฟ้า และ ค่าพีเอชของสารละลายที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดของการไทเทรต ดังกราฟที่ 4-19 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณด้วยโปรแกรม SUPERQUAD จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังกราฟที่ 4-41 จากกราฟพบว่าที่ พีเอชตั้งแต่ 4.3 จะเริ่มเกิดสปีชีส์  $[MLH]^+$  และ  $[LH]$  ส่วนสปีชีส์  $[LH_3]^+$  จะเกิดในช่วงพีเอชต่ำๆ (ช่วงกรด) และ จะหมดไปเมื่อถึงพีเอช 5  $[LH_2]$  จะมีมากที่สุดที่พีเอช 4.5 เมื่อถึงพีเอช 10 จะหมดไป

ในการไทเทรตครั้งที่ 2 และ 3 โดยเพิ่มปริมาณของ  $Ni(II)$  เป็น 0.00865 และ 0.01679 มิลลิโมลตามลำดับจะได้ข้อมูลเช่นเดียวกับการไทเทรตครั้งแรก ดังกราฟที่ 4-20 , 4-21 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการคำนวณโดยโปรแกรมSUPERQUAD เช่นเดียวกับตอนแรก จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่ความเข้มข้นของ  $Cd(II)$  เป็น 0.00865 และ 0.01679 มิลลิโมลดังกราฟรูปที่ 4-42 และ 4-43

จากการเปรียบเทียบการไทเทรตทั้ง 3 ครั้งพบว่าที่ความเข้มข้น 0.00865 และ 0.01679 มิลลิโมล การเกิดสปีชีส์ต่างๆ จะเกิดในช่วงพีเอชที่ใกล้เคียงกันที่พีเอชประมาณ 7-7.5 ซึ่งต่างกับที่ความเข้มข้น 0.00458 มิลลิโมล นั้นการเกิดสปีชีส์จะเกิดตรงพีเอชต่ำ ๆ และพบว่าแนวโน้มนเปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[MLH]^+$  จะมากขึ้น และ เปอร์เซ็นต์ของสปีชีส์  $[LH]$  ลดลง เมื่อความเข้มข้นของโลหะเพิ่มมากขึ้น

สำหรับการวัดการดูดกลืนแสงของ  $Ni(II)$  และ  $Ni(II)+PIH$  นั้นผลการทดลองที่ได้ดังกราฟที่ 4-47 ถึง 4-49 และ 4-81 ถึง 4-86 และมีกราฟการดูดกลืนแสงรวมที่พีเอชต่าง ๆ ดังกราฟที่ 4-113 นั้นพบว่าในช่วงเบสจุดสูงสุดการดูดกลืนแสงของ  $Ni(II)+PIH$  นั้นตรงกับจุดสูงสุดการดูดกลืนแสงของ  $PIH$  ที่ประมาณ 390 นาโนเมตรจึงไม่สามารถบอกได้ อย่างไรก็ตามผลจากการคำนวณโดยโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SUPERQUAD บอกให้ทราบว่ามีสปีชีส์ใหม่เกิดขึ้นจริง และจากกราฟที่ 4-113 ที่พีเอช 1.99 และ 3.50 บริเวณช่วงความยาวคลื่นประมาณ 340-350 นาโนเมตรนั้นน่าจะมีสปีชีส์อื่น ๆ นอกเหนือจากการคำนวณเกิดขึ้นโดยที่โปรแกรม SUPERQUAD ไม่สามารถคำนวณได้เพราะจากการคำนวณแล้วไม่พบสปีชีส์อื่น ๆ อีก หรืออาจจะเกิดจากการรบกวนของเกลือของนิกเกิลบางชนิดที่เมื่อเติมนิกเกิลเพียงเล็กน้อยก็สามารถเกิดตะกอนได้ทำให้ลักษณะของกราฟที่ได้เปลี่ยนแปลงไป

#### 9. การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่าง PIH + Zn(II)

จากการไทเทรตครั้งแรกที่มีปริมาณของ  $Zn(II)$  0.00309 มิลลิโมล กับ PIH ได้ข้อมูลประกอบด้วย ปริมาตรของไทเทรนต์ที่ใช้ ค่าศักย์ไฟฟ้า และ ค่าพีเอชของสารละลายที่เกิดขึ้นในแต่ละจุดของการไทเทรต ดังกราฟที่ 4-22 จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณด้วยโปรแกรม SUPERQUAD จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นดังกราฟที่ 4-44 จากกราฟพบว่าที่ พีเอชตั้งแต่ 8.5 จะเริ่มเกิดสปีชีส์  $[MLH]^+$  และ  $[LH]$  ส่วนสปีชีส์  $[LH_3]^+$  จะเกิดในช่วงพีเอชต่ำๆ (ช่วงกรด) และจะหมดไปเมื่อเข้าสู่ช่วงเบส สปีชีส์  $[LH_2]$  จะมีมากที่สุดที่พีเอช 8.8 เมื่อถึงพีเอช 10 จะหมดไป

ในการไทเทรตครั้งที่ 2 และ 3 โดยเพิ่มปริมาณของ  $Zn(II)$  เป็น 0.00669 และ 0.01236 มิลลิโมลตามลำดับจะได้ข้อมูลเช่นเดียวกับการไทเทรตครั้งแรก ดังกราฟที่ 4-23 , 4-24 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาทำการคำนวณโดยโปรแกรม SUPERQUAD เช่นเดียวกับตอนแรก จะได้กราฟแสดงการกระจายตัวของสปีชีส์ต่างๆ ที่ความเข้มข้นของ  $Zn(II)$  เป็น 0.00669 และ 0.01236 มิลลิโมลดังกราฟรูปที่ 4-45 และ 4-46

จากการเปรียบเทียบการไทเทรตทั้ง 3 ครั้งพบว่าเกิดการเกิดสปีชีส์ต่างๆ จะเกิดในช่วงพีเอชที่ใกล้เคียงกัน (พีเอชประมาณ 8-9) เปอร์เซนต์ของสปีชีส์  $[LH_2]$  ของทั้ง 3 ความเข้มข้นอยู่ที่พีเอชประมาณ 8.5 - 8.8 แนวโน้มเปอร์เซนต์ของสปีชีส์  $[MLH]^+$  จะมากขึ้น และ เปอร์เซนต์ของสปีชีส์  $[LH]$  ลดลง เมื่อความเข้มข้นของโลหะเพิ่มมากขึ้น

การวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย  $Zn(II)$  และ  $Zn(II)+PIH$  ที่พีเอชต่าง ๆ ผลที่ได้แสดงออกมาในกราฟที่ 4-55 ถึง 4-56 , 4-96 ถึง 4-101 และกราฟที่ 4-114 แสดงการดูดกลืนแสงรวม จากกราฟที่ 4-114 พบว่าเส้นกราฟการดูดกลืนแสงของสารละลาย  $Zn(II)$  และ  $Zn(II)+PIH$  มีลักษณะแตกต่างกันคือสารละลายของ  $Zn(II)+PIH$  ตั้งแต่พีเอช 7.00 มีจุดสูงสุดการดูดกลืนแสงที่ประมาณ 400 นาโนเมตรน่าจะเป็นการยืนยันได้ว่าเกิดสารประกอบเชิงซ้อนสปีชีส์ใหม่ขึ้นแล้ว และในช่วงกรดยอดกราฟของสารละลาย  $Zn(II)+PIH$  ไม่ตรงกับยอดกราฟของ PIH อาจมีสาเหตุมาจากโปรแกรมไม่สามารถคำนวณออกมาได้ หรือเกิดการรบกวนของเกลือของสังกะสีที่มีปริมาณเพียงเล็กน้อยก็สามารถเกิดตะกอนได้ อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม SUPERQUAD สามารถบอกได้ว่าเกิดสปีชีส์ใหม่ของ  $Zn(II)+PIH$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-1 แสดงค่าคงตัวของสปีชีส์ต่างๆของ PIH และ ตารางประกอบเชิงซ้อนและช่วงพีเอชที่เกิด

สปีชีส์	ช่วง pH	ค่าคงตัวในการเกิด
$[\text{LH}_2]^+$	< 7.00	5.75
$[\text{LH}]^-$	> 4.00	- 8.58
$[\text{CdLH}]^+$	> 6.30	- 3.7569
$[\text{CoLH}]^+$	> 3.40	- 3.4629
$[\text{CuLH}]^+$	> 4.20	- 3.1888
$[\text{Fe(II)LH}]^+$	> 6.00	- 4.5904
$[\text{Fe(III)LH}]^+$	> 3.40	- 3.5812
$[\text{NiLH}]^+$	> 4.00	- 3.4744
$[\text{ZnLH}]^+$	> 8.50	- 4.3677
$\text{H}_2\text{O}$	< 6.60	- 13.25

**หมายเหตุ** เนื่องจากการทดลองนี้ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตระหว่าง PIH และ โลหะทั้ง 7 ตัว (ตัวละ 3 ความเข้มข้น) จะเยอะมาก จึงขอแสดงข้อมูลตัวอย่างที่ได้จากการทำโปรโตเนชัน และการทำคีโปรโตเนชัน ของ PIH เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-2 แสดงข้อมูลที่ได้อากการหาค่าแอมเพอริเมทรีอิเล็กโตรด

ml	pH	mV			
0.0000	1.7650	315.9824	2.0451	9.3743	-141.6289
0.0010	1.7589	319.1508	2.0461	9.4345	-144.1157
0.0142	1.7910	316.9219	2.0471	9.4809	-147.7077
0.0670	1.7714	319.0403	2.0481	9.5344	-148.8683
0.2670	1.8899	312.1140	2.0491	9.5322	-150.8393
0.4670	1.9061	310.0325	2.1131	10.0921	-184.3100
0.6670	1.9739	307.8588	2.1208	10.2011	-192.8020
0.8670	2.0601	302.4431	2.1246	10.2891	-195.5652
1.0670	2.1618	294.7800	2.1264	10.3037	-195.2152
1.2670	2.2742	289.2722	2.1350	10.3358	-199.8020
1.4670	2.4644	278.0723	2.1628	10.5579	-210.1913
1.6670	2.7522	260.0566	2.1717	10.5347	-209.9519
1.7829	2.8615	253.3699	2.2192	10.6828	-219.6228
1.9829	4.5335	141.8499	2.2555	10.7985	-226.3833
1.9912	4.9647	117.3870	2.2906	10.9409	-233.1438
1.9922	5.3099	101.2135	2.3151	10.9531	-234.8016
1.9932	5.5555	87.8952	2.5151	11.2992	-255.5435
1.9942	5.7546	75.8664	2.6030	11.3804	-259.8724
1.9952	5.9638	63.5060	2.8030	11.4934	-268.1618
1.9962	6.1541	52.3061	3.0030	11.6693	-278.4591
1.9972	6.3151	41.4377	3.2030	11.7060	-280.7617
1.9982	6.4757	31.8036	3.4030	11.8297	-287.6143
1.9992	6.6098	23.9748			
2.0002	8.5325	-89.5531			
2.0012	8.5823	-90.9346			
2.0022	8.5597	-91.8557			
2.0041	8.6324	-96.1846			
2.0051	8.6135	-93.1083			
2.0075	8.6214	-96.3504			
2.0407	9.1263	-129.4527			
2.0441	9.2778	-135.6421			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-3 แสดงข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตไป-กลับของ PIH

ml (Base)	pH	mV	ml (Acid)	pH	mV
0.0000	1.7882	318.3403	0.0000	11.8557	-289.2906
0.0010	1.7839	318.4140	0.0010	11.8584	-289.3090
0.0236	1.7876	318.3403	0.0449	11.8609	-289.2353
0.2236	1.8188	316.1298	0.2449	11.8389	-287.8906
0.4236	1.8664	313.4956	0.4449	11.7741	-283.8196
0.6236	1.9373	309.1667	0.6449	11.6910	-279.1407
0.8236	2.0142	304.4141	0.8449	11.6067	-273.5223
1.0236	2.1370	297.2668	1.0449	11.4748	-266.1724
1.2236	2.2170	290.7827	1.2449	11.3978	-261.3461
1.4236	2.3053	285.6985	1.4449	11.2191	-250.3304
1.6236	2.5613	270.9434	1.6449	10.9363	-232.6648
1.7617	2.7491	260.4619	1.7638	10.5924	-209.2150
1.8878	3.0707	235.8148	1.8045	10.2973	-193.7231
1.9369	3.2952	224.5228	1.8147	10.2185	-189.4126
1.9574	3.4205	218.5544	1.8240	10.1645	-186.0232
1.9706	3.5600	208.8098	1.8383	10.0869	-180.5153
1.9764	3.6556	202.0677	1.8541	9.9782	-174.8785
1.9794	3.8450	191.4573	1.8652	9.9244	-171.7101
1.9804	3.9944	181.6390	1.8840	9.8526	-167.0865
1.9814	4.1636	171.6917	1.9108	9.7570	-161.9287
1.9824	4.3142	163.6418	1.9405	9.6544	-154.7814
1.9834	4.4198	157.5077	1.9716	9.3538	-135.8816
1.9844	4.5075	152.4603	1.9783	9.2054	-126.7816
1.9854	4.5964	146.8788	1.9802	9.0719	-118.7317
1.9864	4.6914	141.3710	1.9812	8.9430	-110.5160
1.9874	4.7656	137.2447	1.9822	8.7918	-101.7293
1.9884	4.8230	133.9842	1.9832	8.6712	-95.0425
1.9894	4.8743	130.9816	1.9842	8.5628	-88.4662
1.9904	4.9259	127.9053	1.9852	8.4641	-82.7558
1.9914	4.9751	124.8843	1.9862	8.3710	-77.0821
1.9924	5.0246	122.0106	1.9872	8.2784	-71.5006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.9934	5.0732	118.9528	1.9882	8.1907	-66.3612
1.9944	5.1288	115.6186	1.9892	8.1077	-61.6270
1.9954	5.1807	112.5423	1.9902	8.0399	-57.7034
1.9964	5.2308	109.6687	1.9912	7.9754	-53.8718
1.9974	5.2738	107.1266	1.9922	7.9155	-50.2613
1.9984	5.3148	104.8055	1.9932	7.8511	-46.3193
1.9994	5.3511	102.7056	1.9942	7.7903	-42.8930
2.0004	6.3395	43.6114	1.9952	7.7408	-39.9457
2.0014	6.3459	42.9851	1.9962	7.6825	-36.3720
2.0137	6.3587	42.1746	1.9972	7.6309	-33.2589
2.2015	8.1620	-70.4875	1.9982	7.5490	-27.4379
2.2082	8.4180	-84.7636	1.9992	7.4611	-22.5564
2.2092	8.6379	-100.7714	2.0002	5.9919	64.7954
2.2102	8.8893	-113.0213	2.0012	5.9711	66.0665
2.2112	9.0518	-125.1790	2.0033	5.9592	66.8217
2.2122	9.3264	-142.1078	2.0181	5.9504	67.2085
2.2132	9.5939	-157.4340	2.2181	4.9098	134.2053
2.2142	9.8108	-168.6154	2.2350	4.2772	176.3154
2.2152	9.9216	-173.8838	2.2360	3.8325	202.4914
2.2162	10.0111	-179.6864	2.2370	3.5148	216.7492
2.2172	10.1132	-185.9863	2.2380	3.4018	222.3675
2.2182	10.2188	-192.1573	2.2390	3.3197	227.3228
2.2192	10.3044	-196.5783	2.2400	3.2619	229.9201
2.2202	10.3465	-198.6230	2.2410	3.2216	232.1674
2.2212	10.3893	-201.2388	2.2420	3.2057	233.2543
2.2222	10.4119	-202.5651	2.2452	3.1691	235.2253
2.2241	10.4418	-204.2046	2.2504	3.1590	235.7779
2.2273	10.4626	-205.4756	2.3245	3.1049	239.0569
2.2394	10.4833	-206.4703	2.5245	2.7329	261.8250
2.3283	10.6504	-217.8360	2.6033	2.6364	267.3882
2.4059	10.8257	-227.1201	2.7508	2.4797	276.7091
2.4648	10.9442	-235.0043	2.9335	2.3728	283.3959
2.5349	11.0667	-241.5253	3.1335	2.2097	293.5826
2.6215	11.2014	-250.3857	3.3335	2.1529	296.4563

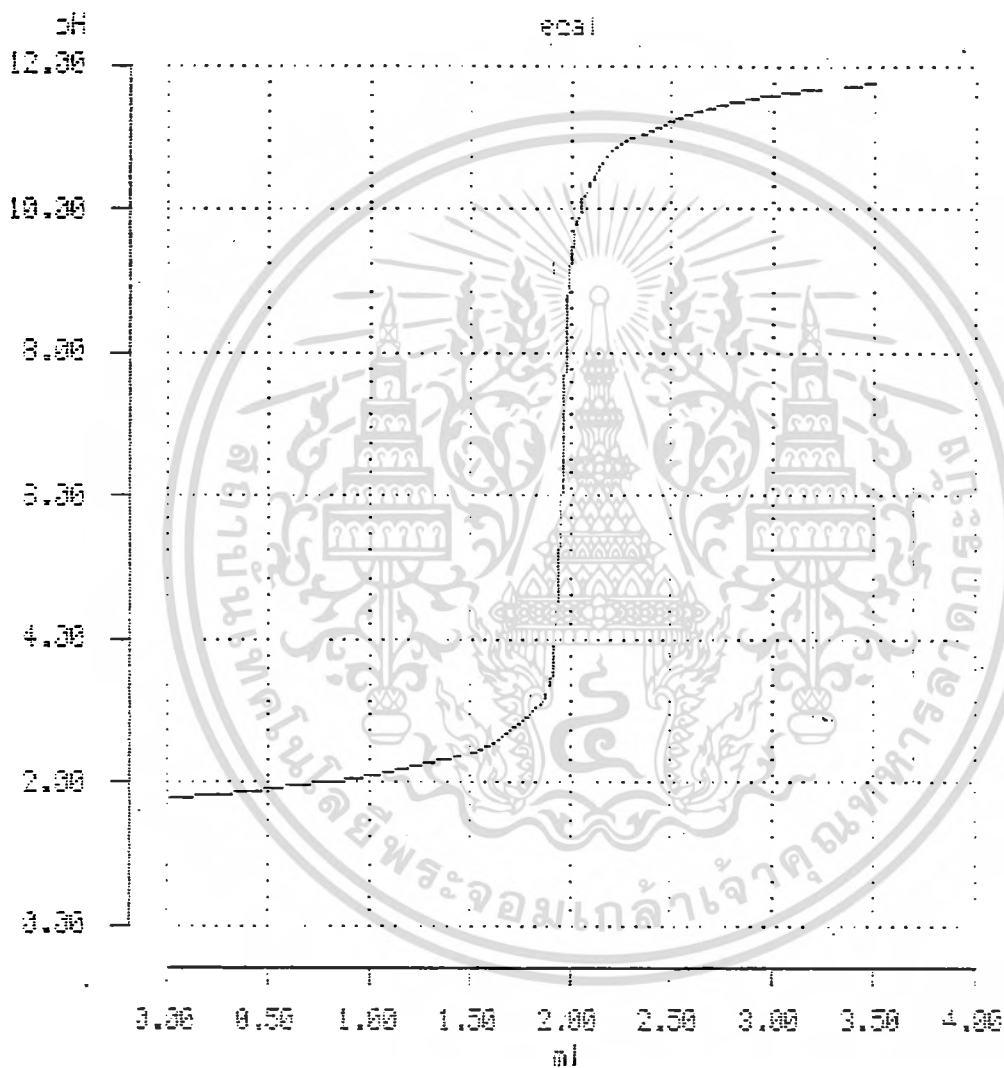
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7246	11.2866	-255.0646	
2.9246	11.4000	-261.7698	
3.1246	11.5765	-272.5644	
3.3246	11.6336	-275.7144	
3.5246	11.7048	-280.1722	
3.7246	11.7723	-284.3906	
3.9246	11.8465	-288.5906	



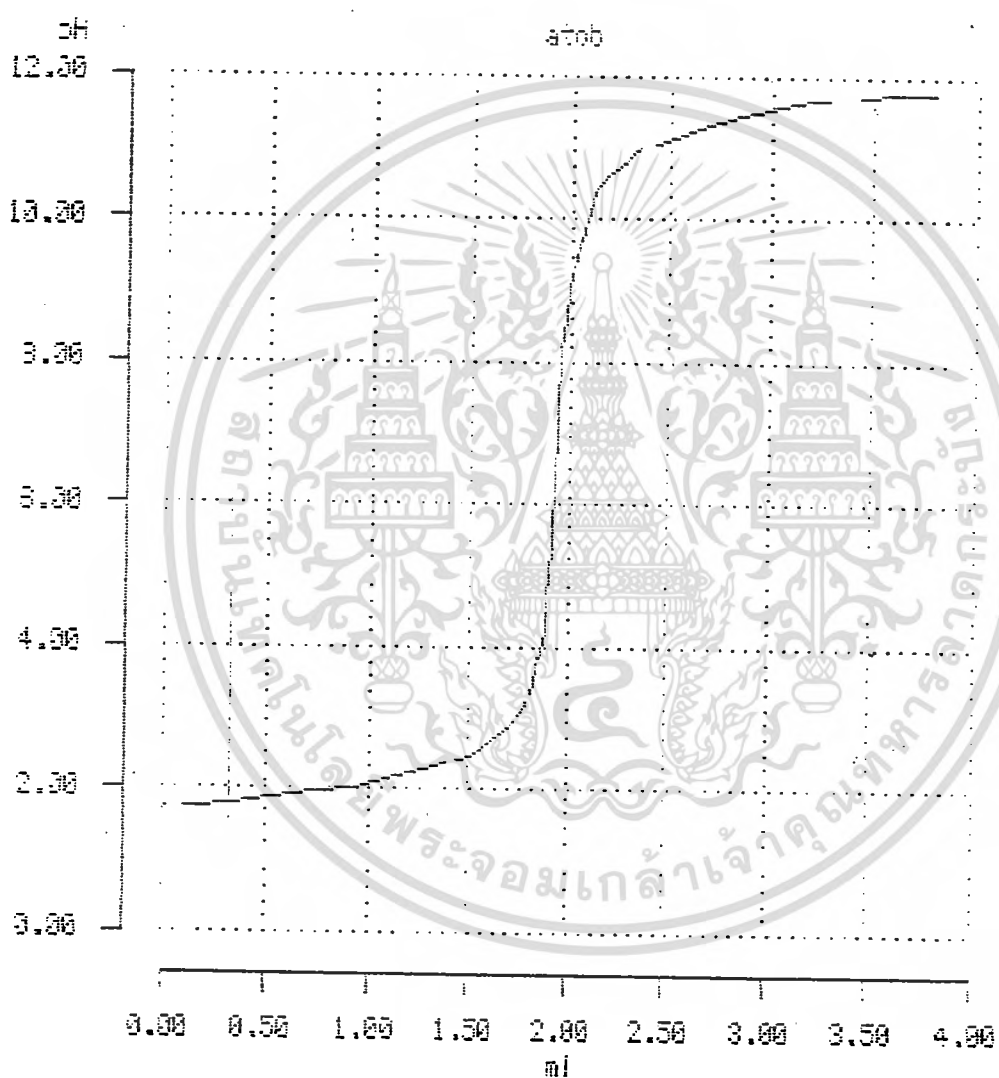
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-1 ข้อมูลที่ได้จากการทำอิเล็กโทรคาร์ดิเมรชัน



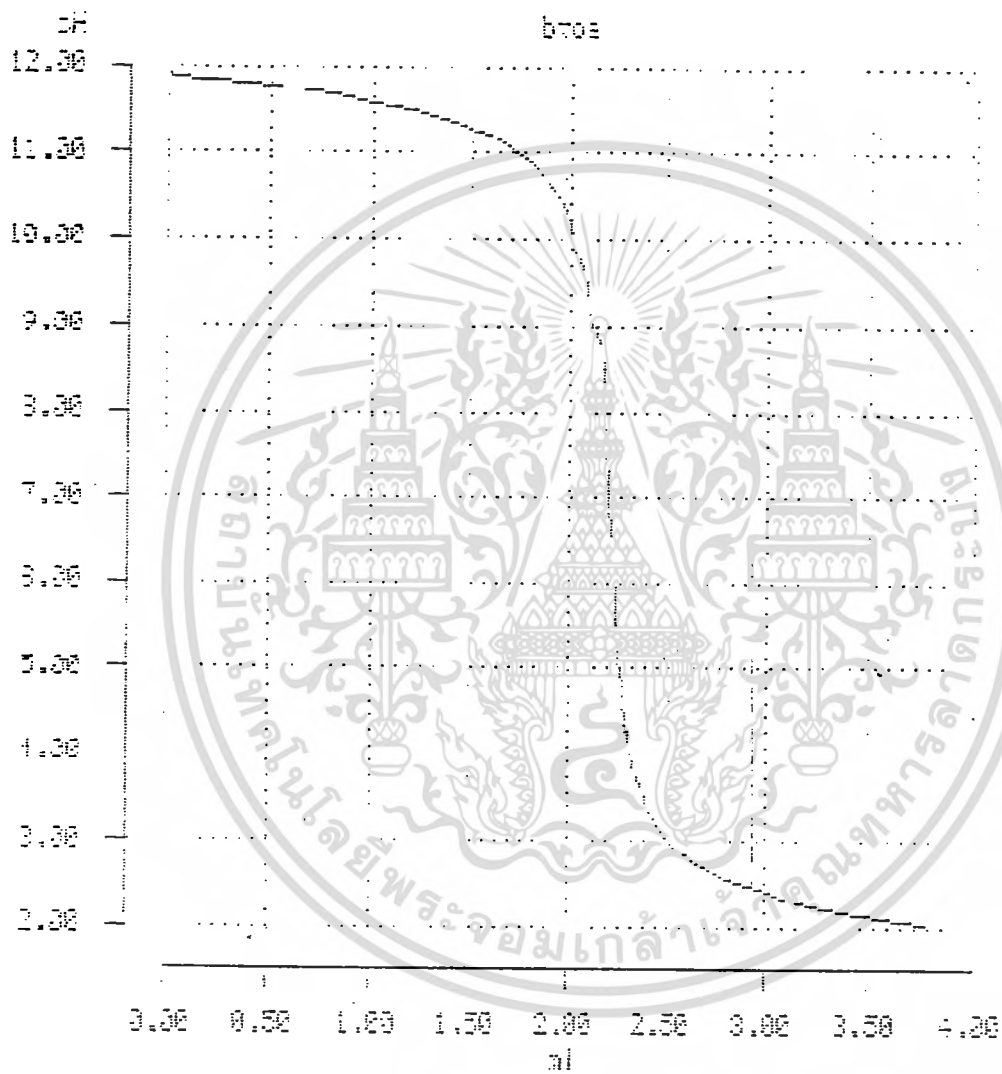
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4-2 ผลจากการศึกษาปฏิกิริยาโปรโตเนชัน และ ดีโปรโตเนชัน (กรดไปเบต)



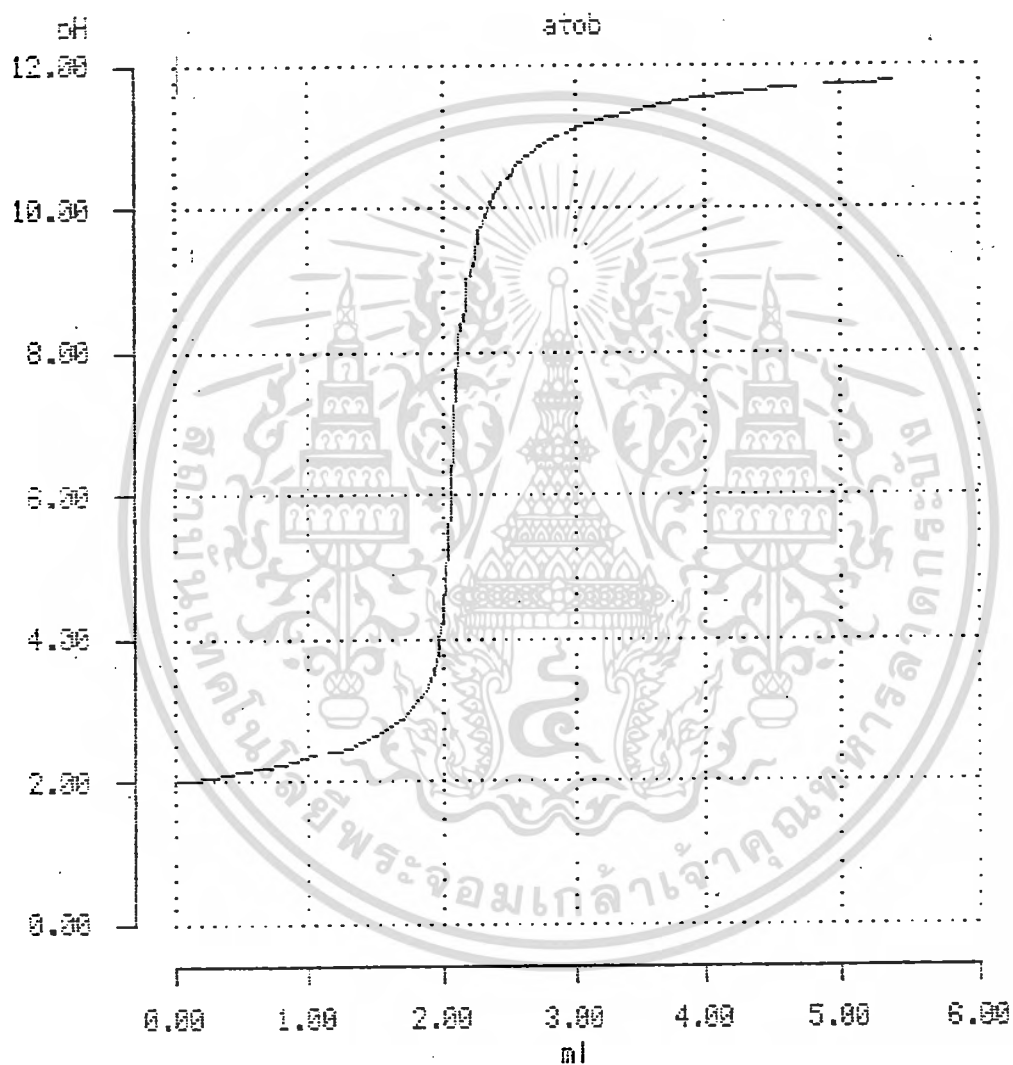
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-3 ผลจากการศึกษาปฏิกิริยาโปรโตเนชัน และ ดีโปรโตเนชัน (เบสไปกรด)



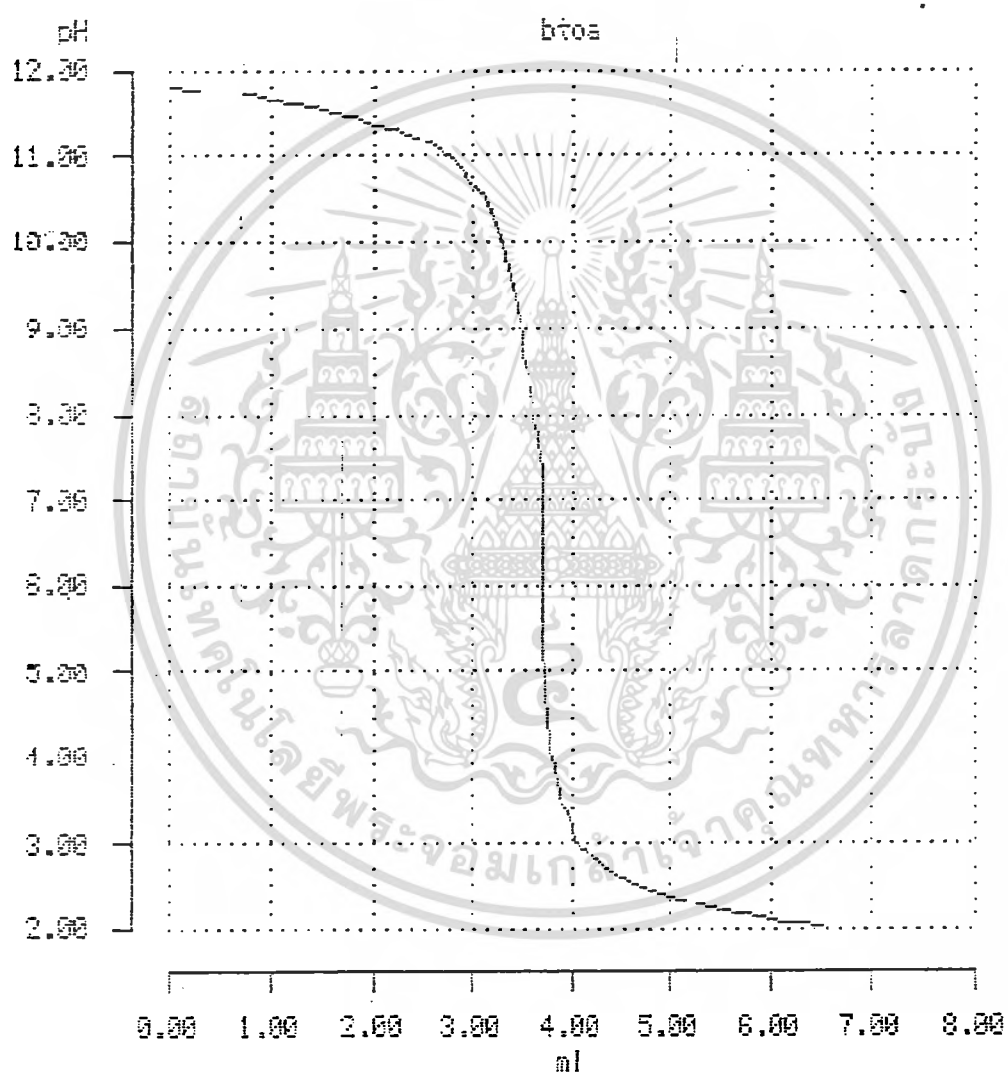
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.4 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cd(II)$   $0.00446 \text{ mM}$



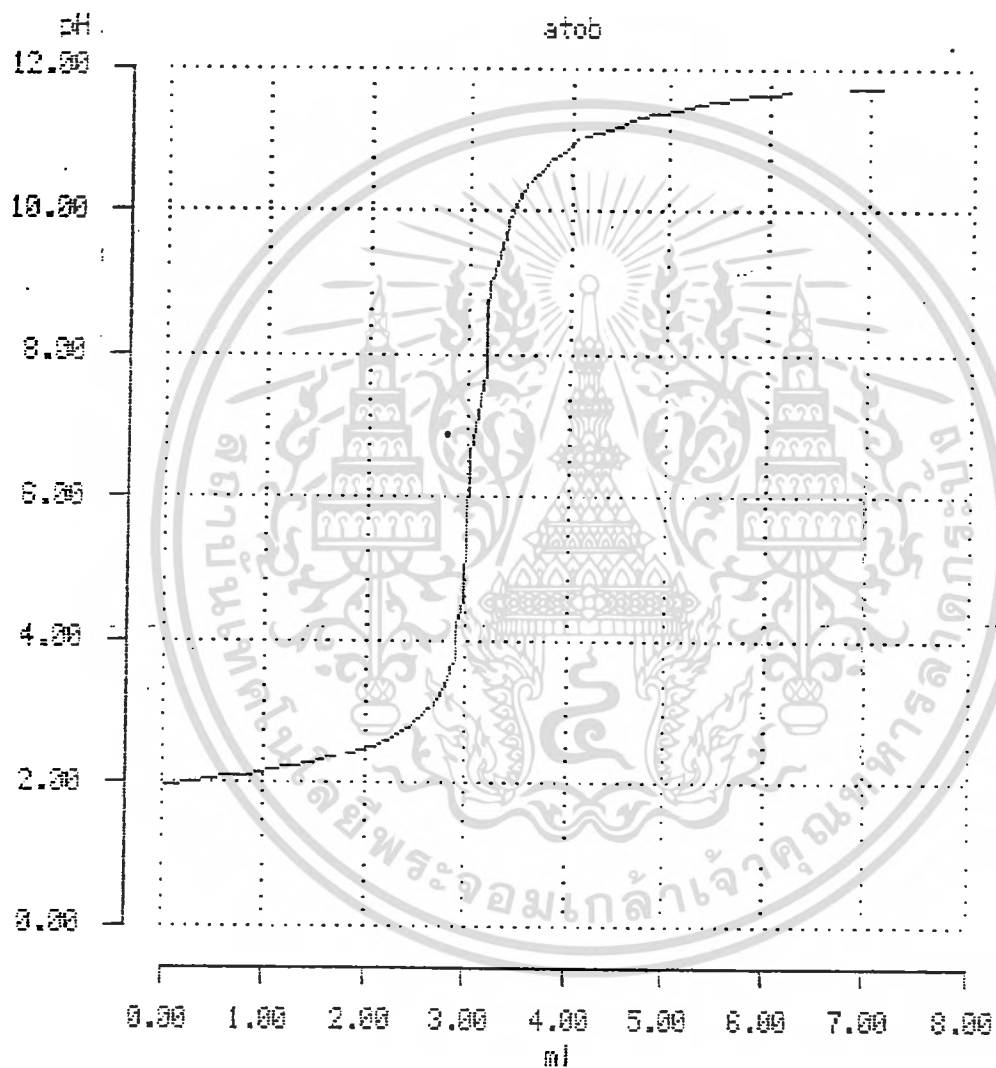
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-5 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cd(II)$   $0.00842 \text{ mM}$



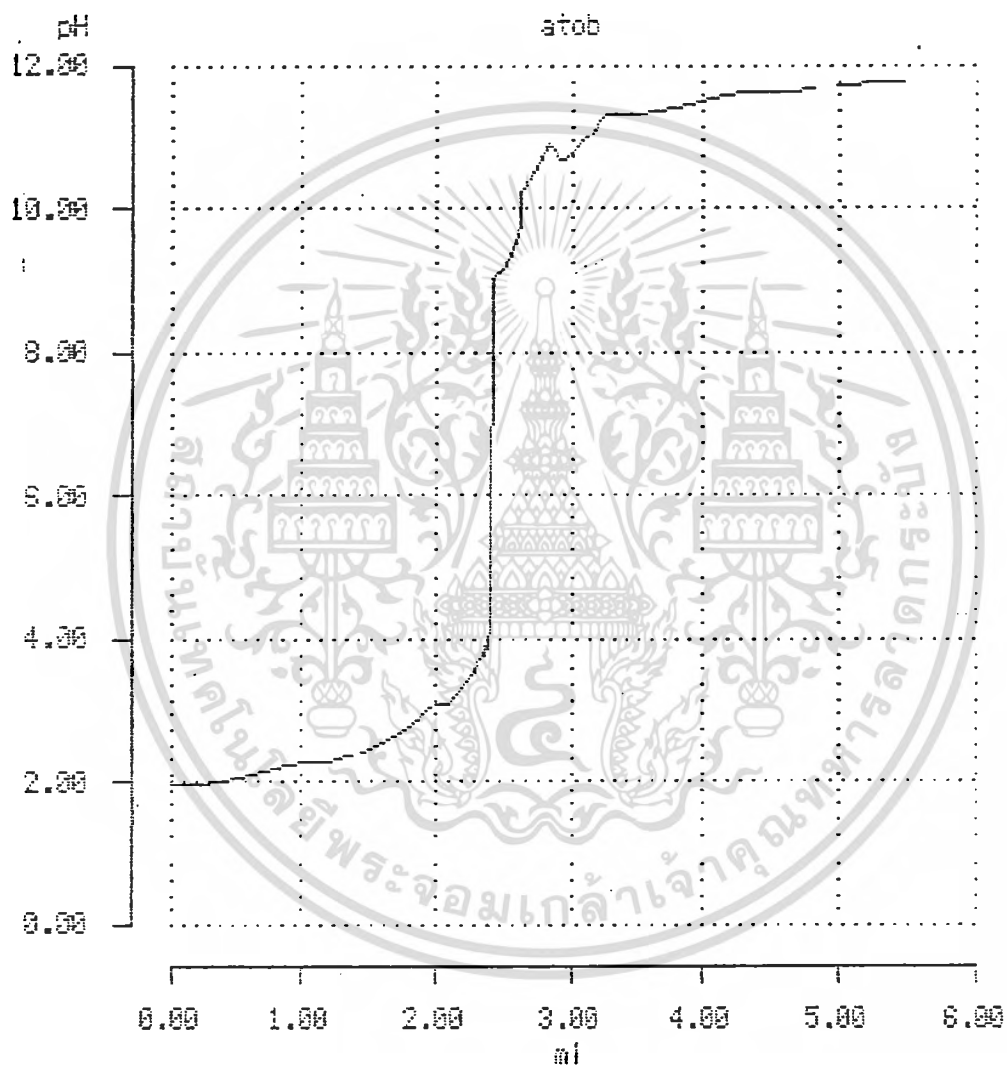
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-6 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cd(II)$   $0.01634 \text{ mM}$



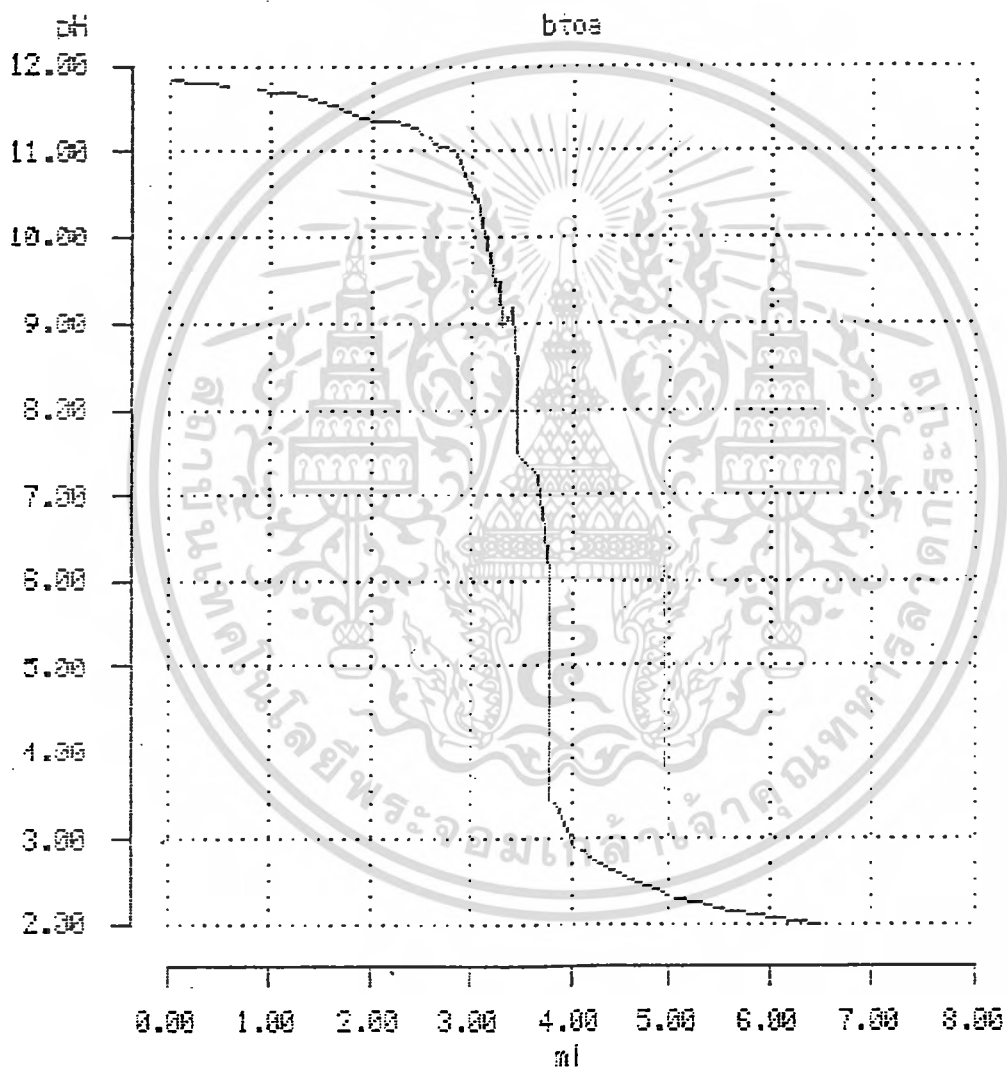
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-7 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Co(II)$   $0.00350 \text{ mM}$



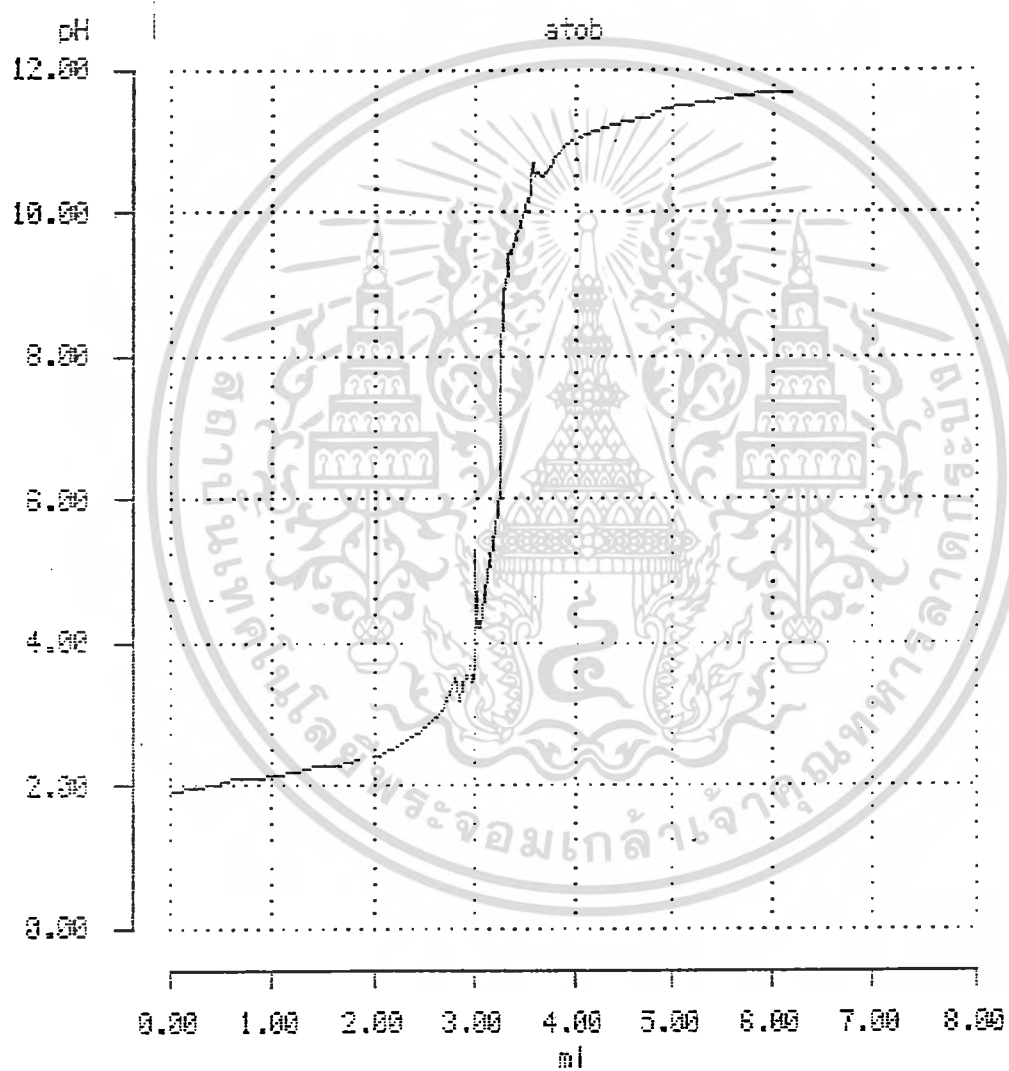
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-8 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Co(II)$   $0.00680 \text{ mM}$



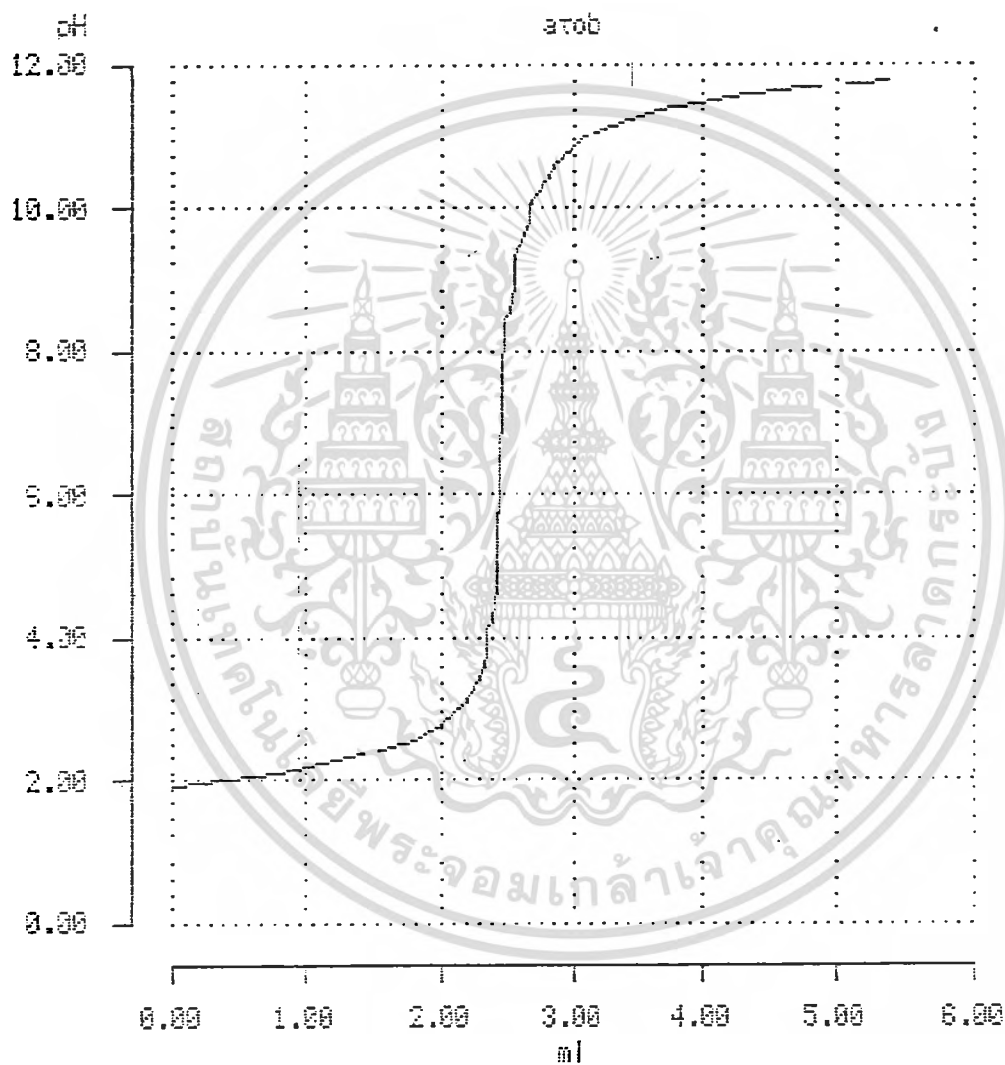
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-9 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Co(II)$   $0.01330 \text{ mM}$



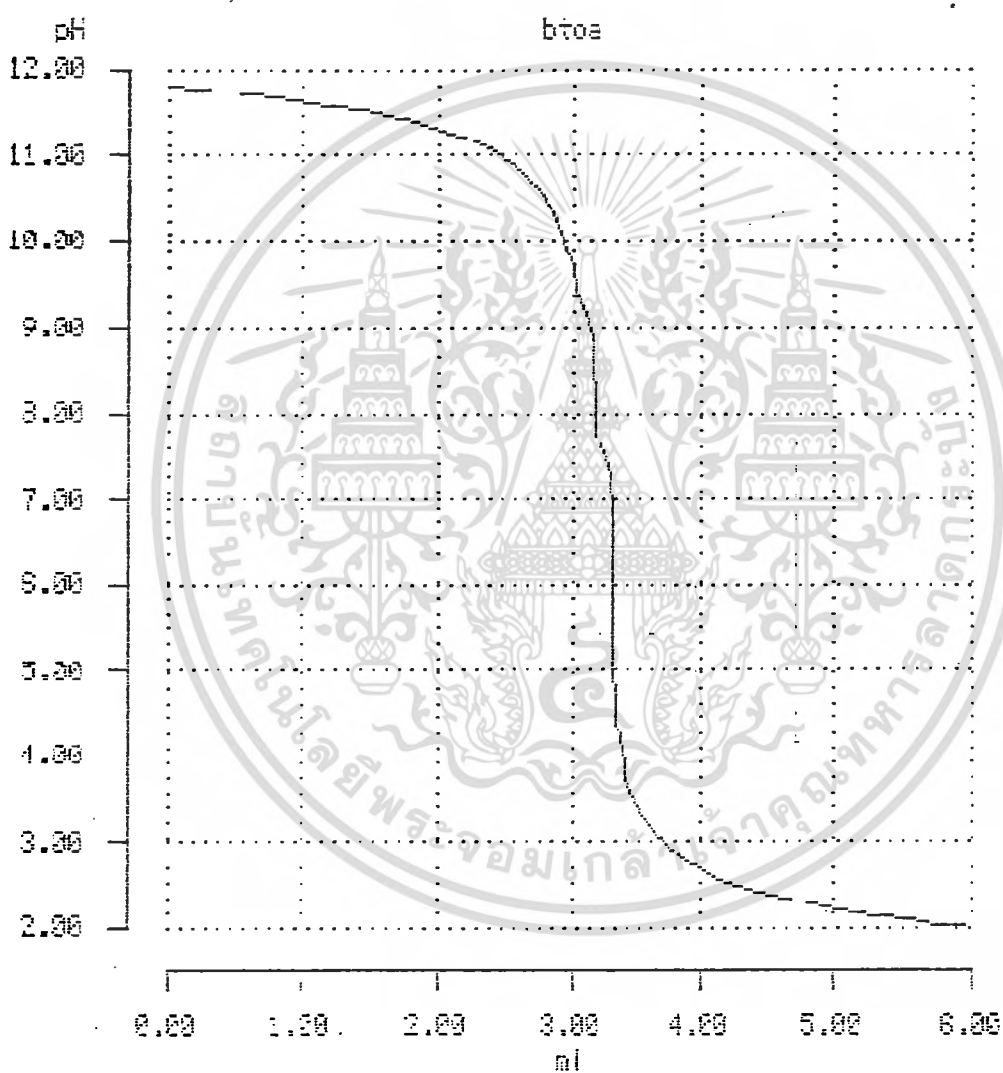
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-10 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cu(II)$   $0.00432 \text{ mM}$



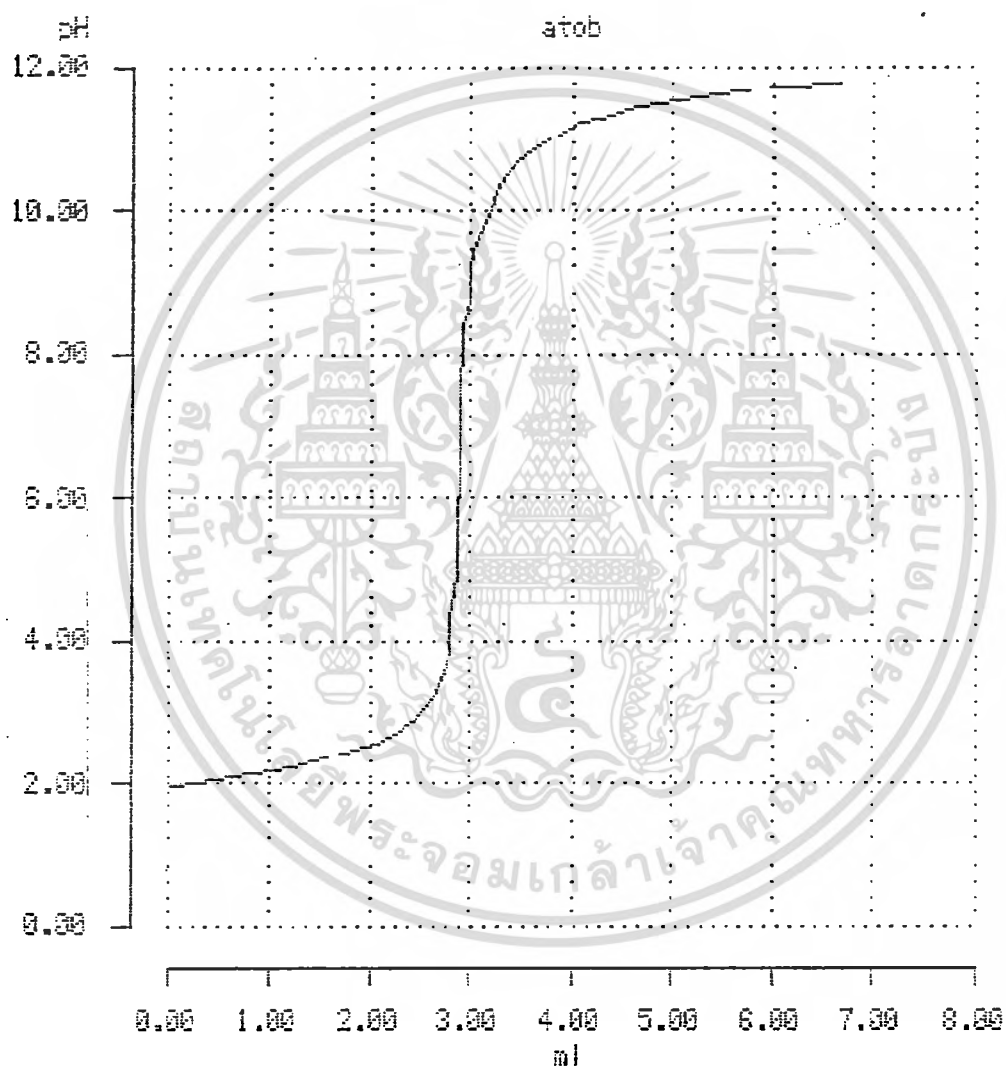
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-11 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cu(II)$   $0.00816 \text{ mM}$



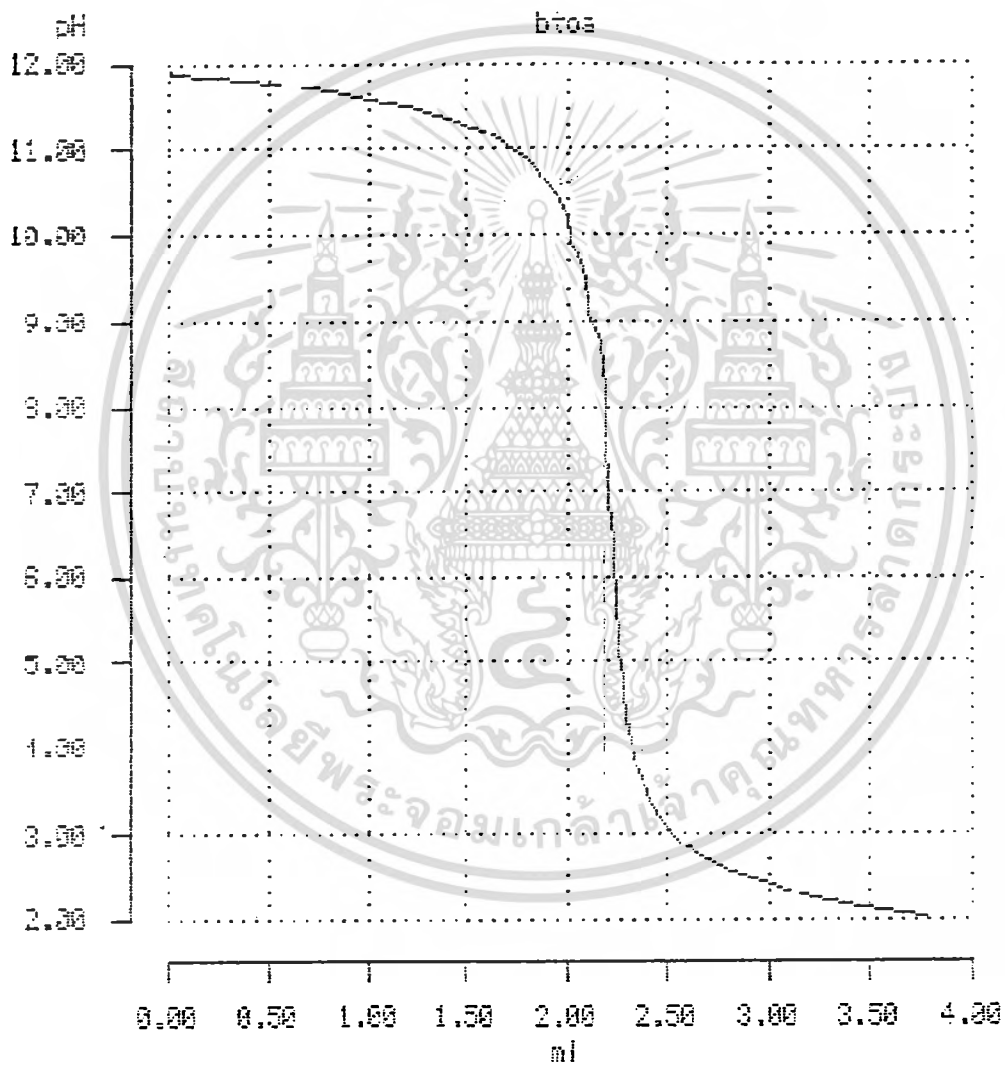
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-12 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cu(II)$   $0.01584 \text{ mM}$



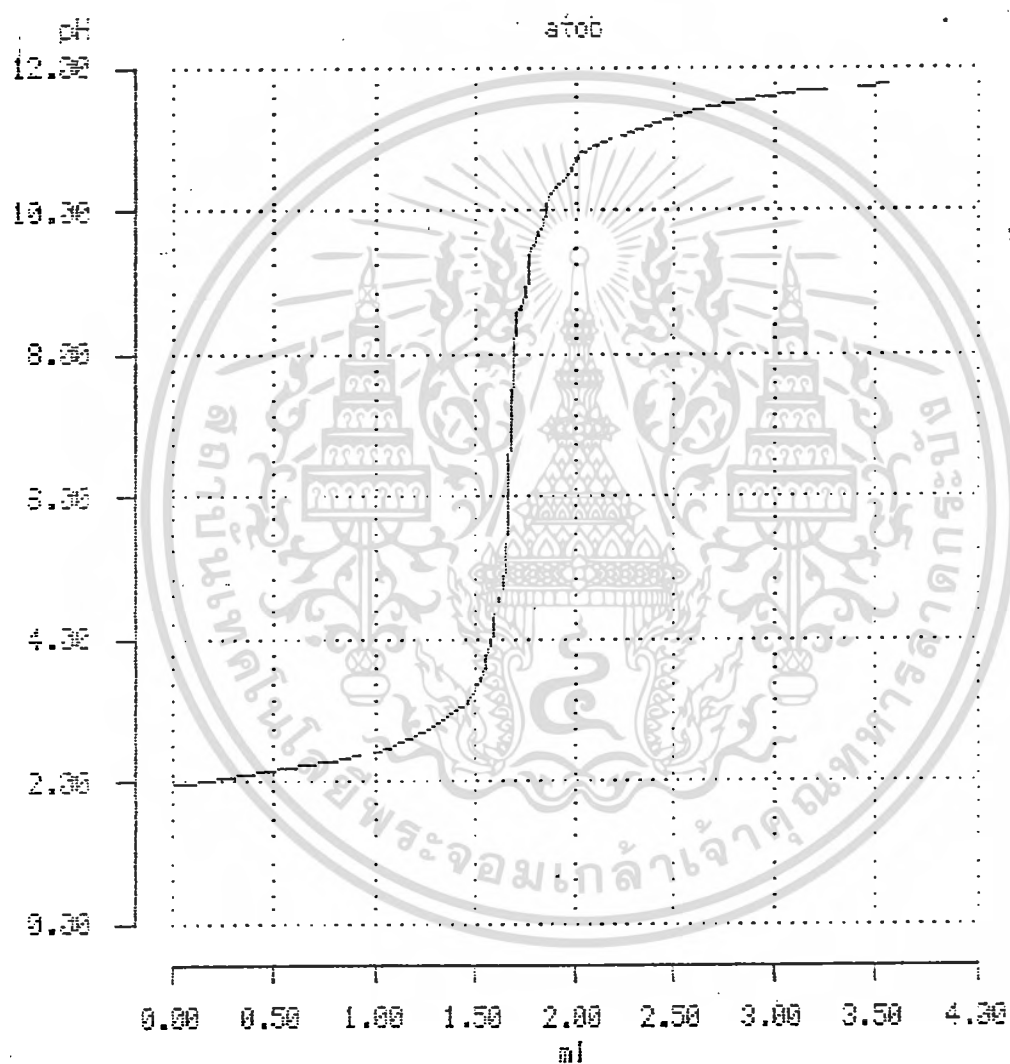
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-13 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(II)$   $0.00495 \text{ mM}$



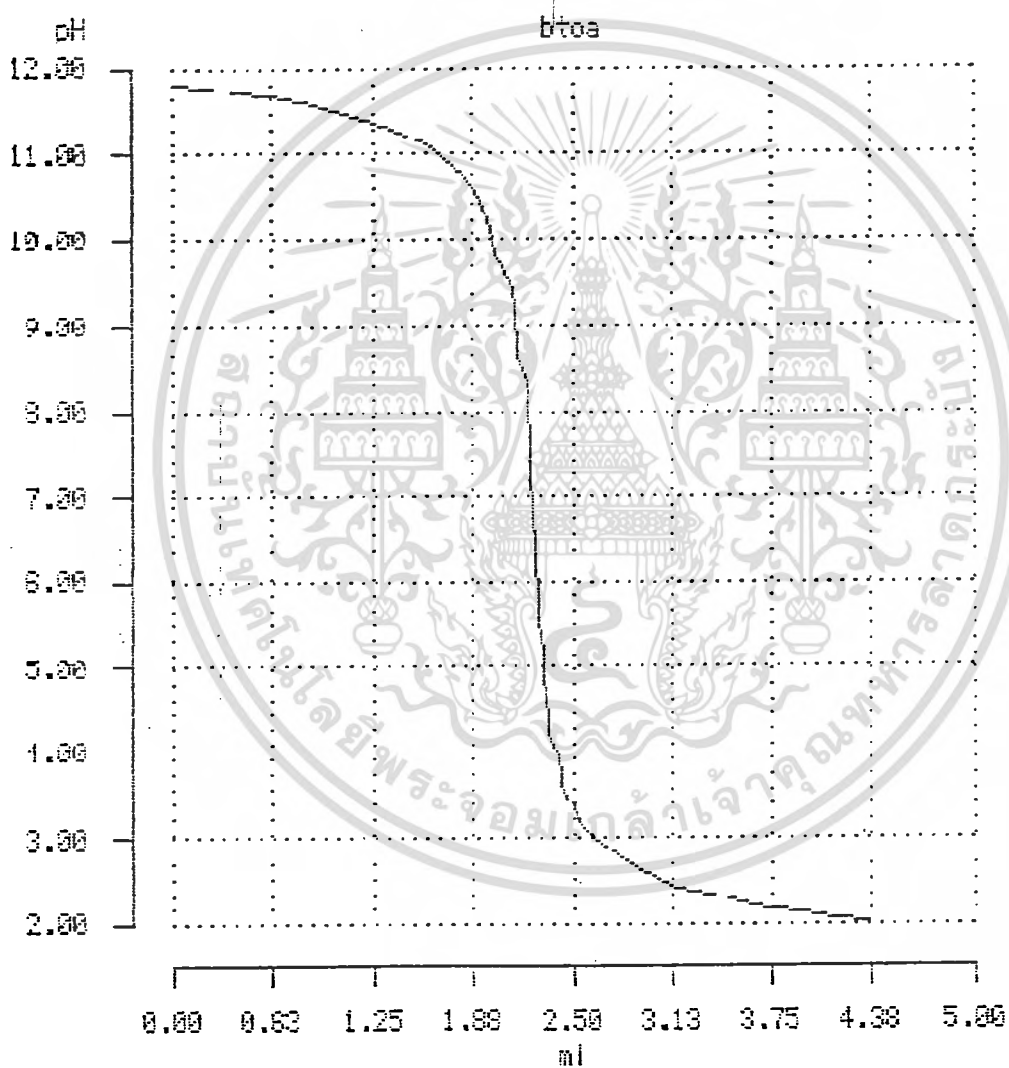
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-14 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(II)$   $0.00798 \text{ mM}$



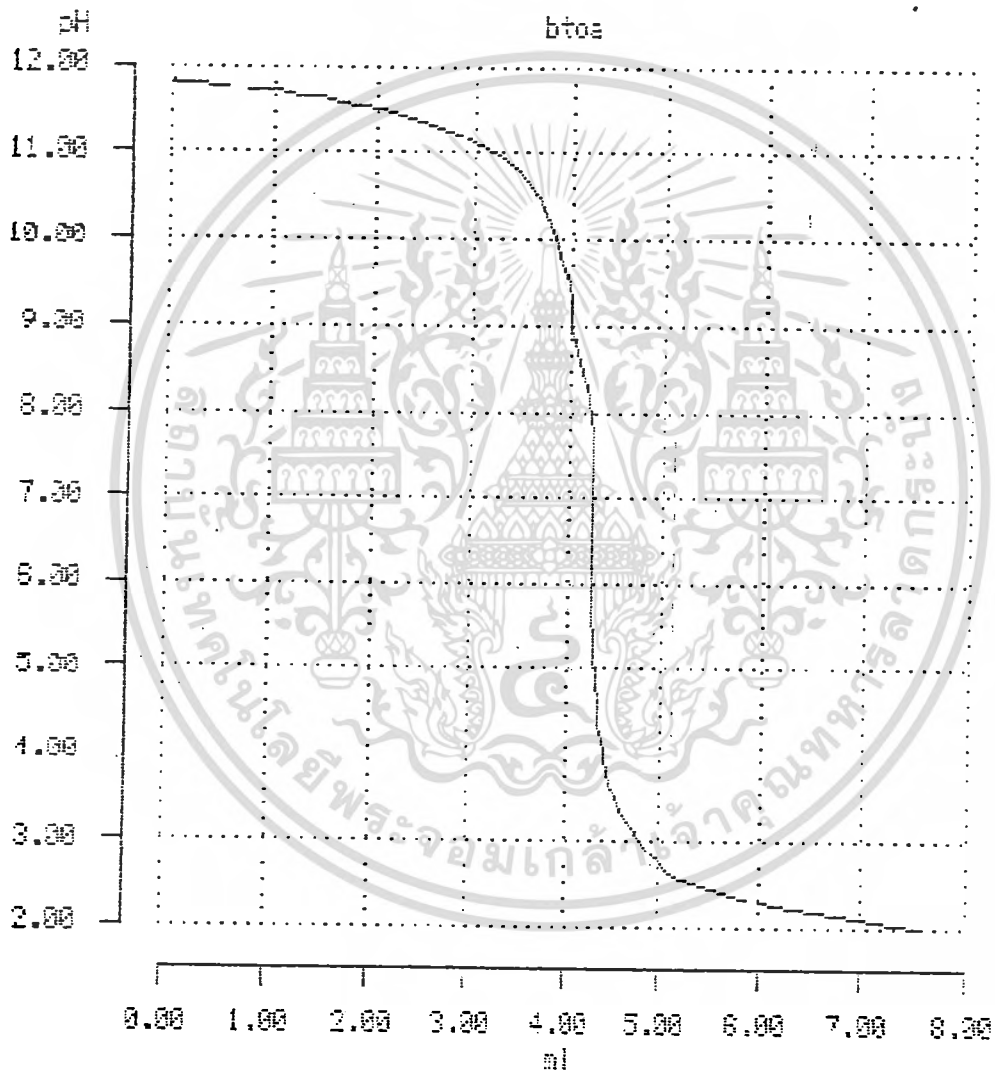
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-15 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(II)$   $0.01473 \text{ mM}$



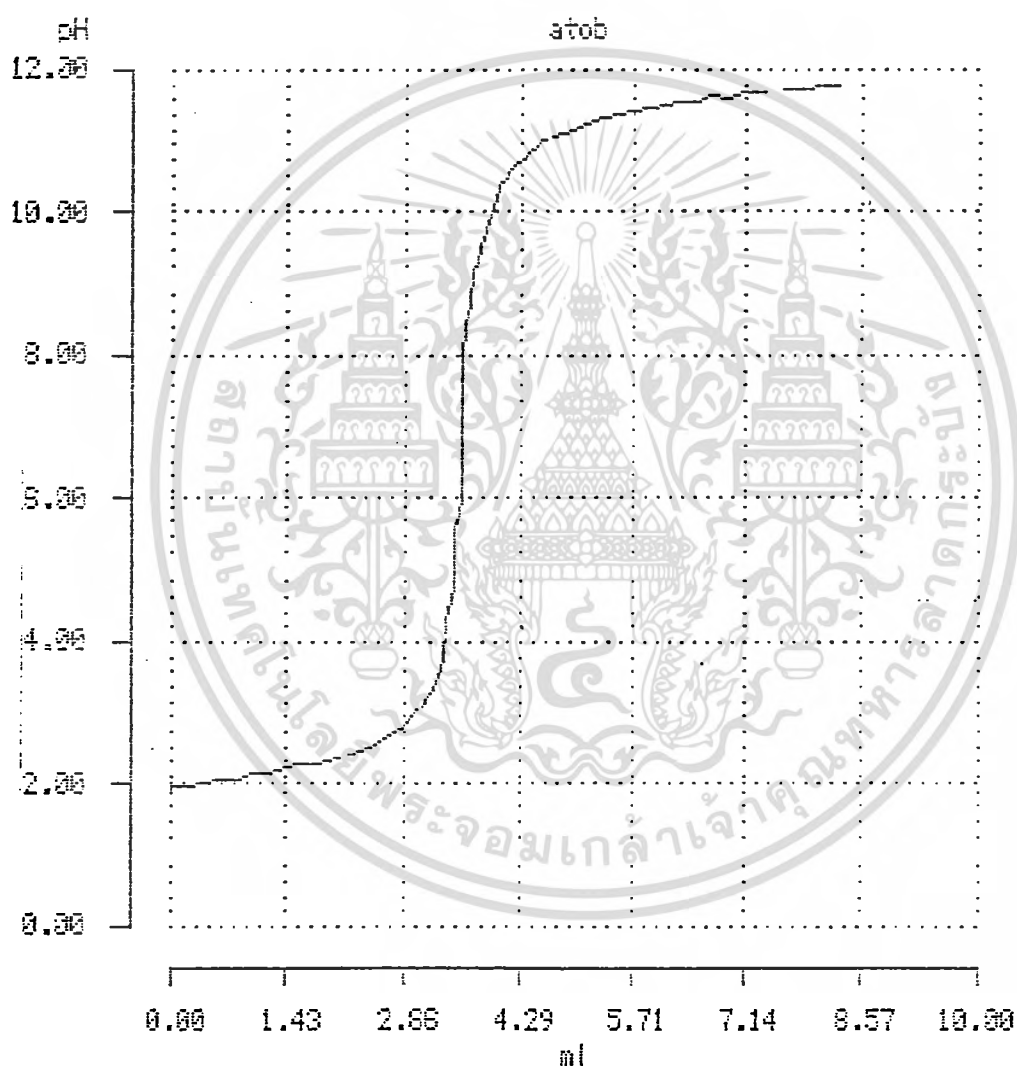
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-16 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(III)$   $0.00555 \text{ mM}$



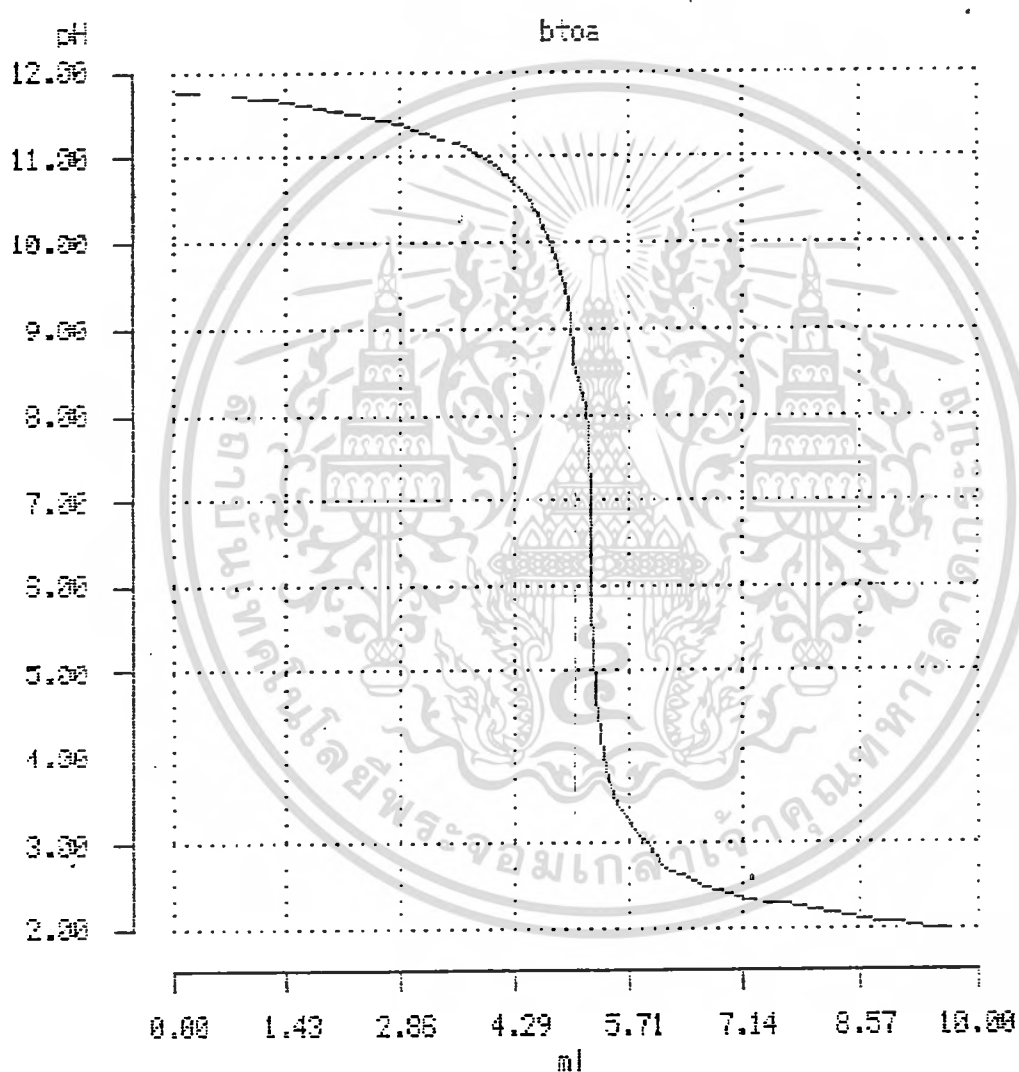
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-17 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(III)$   $0.01295 \text{ mM}$



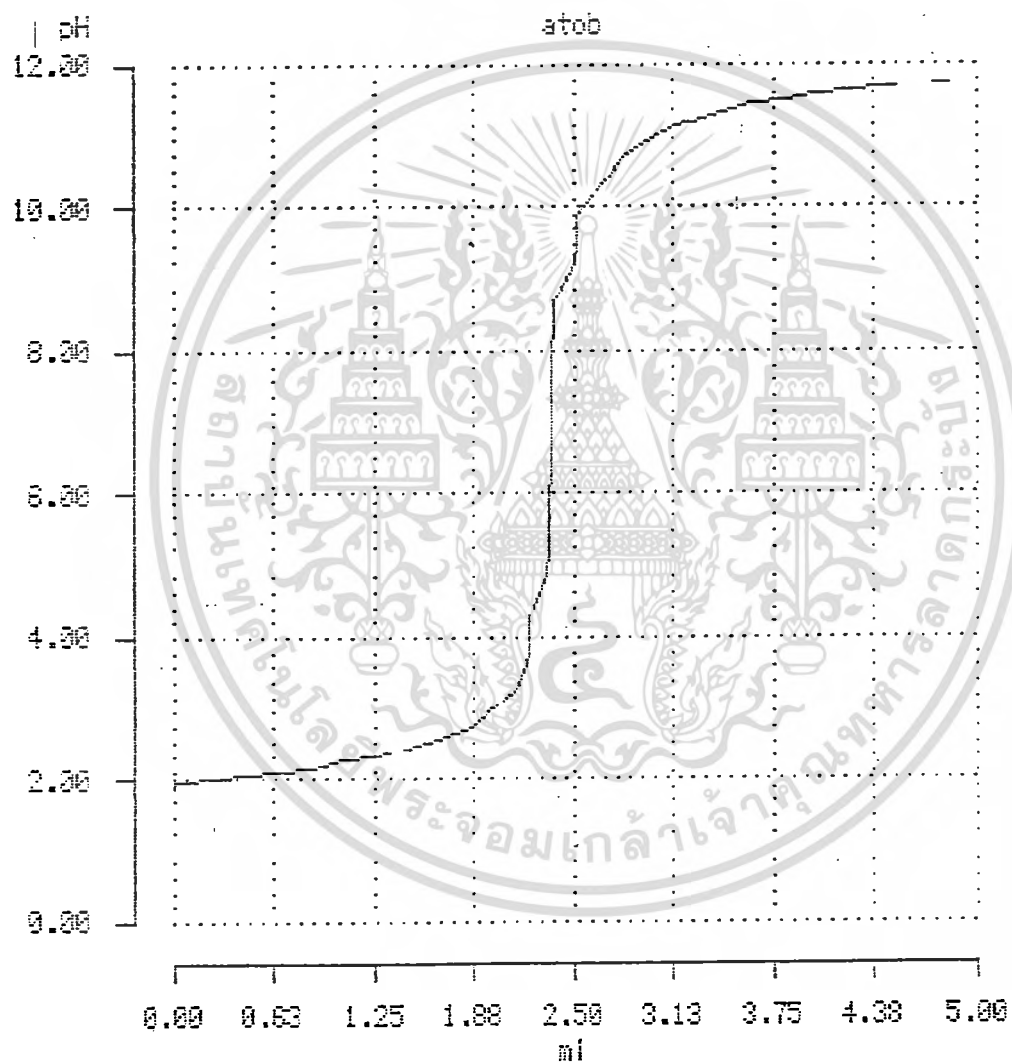
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-18 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(III)$   $0.02775 \text{ mM}$



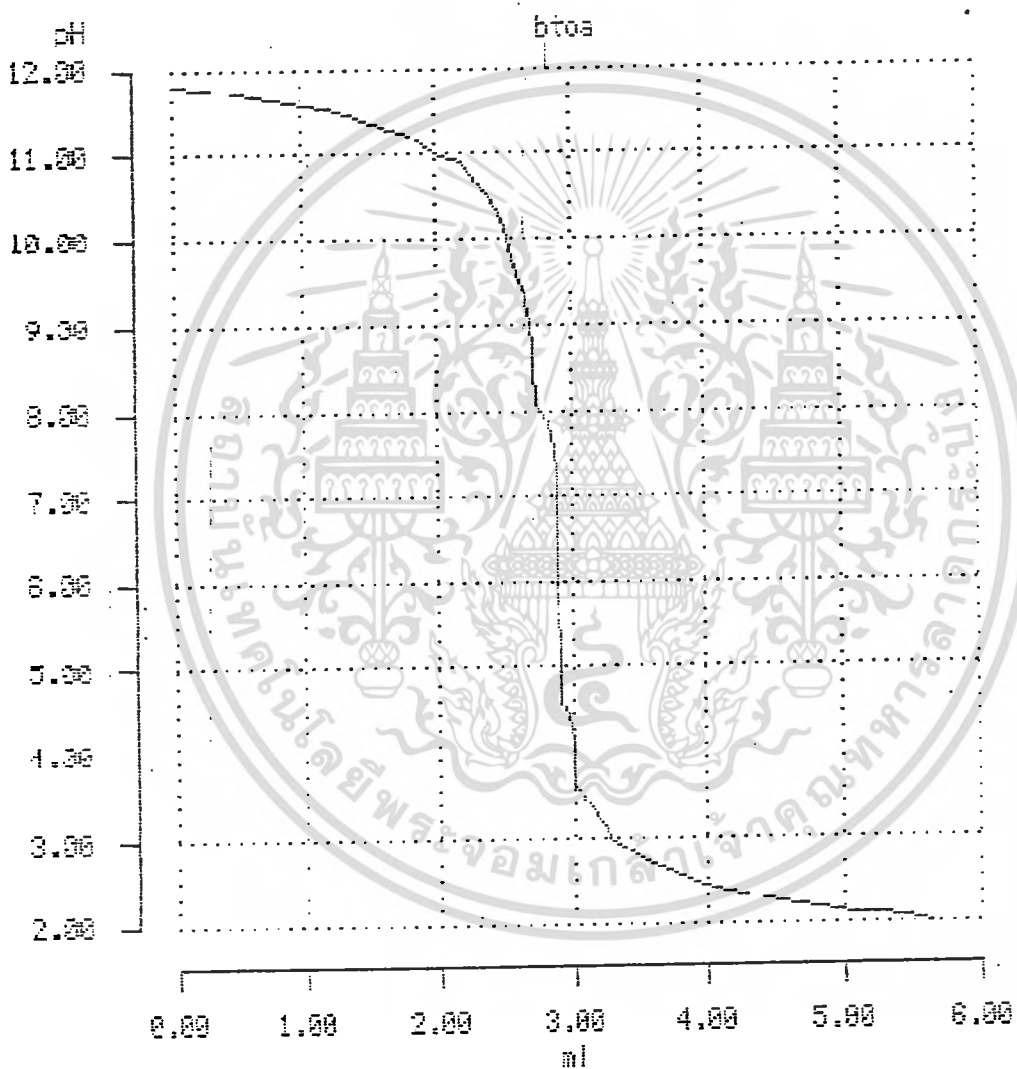
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-19 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Ni(II)$   $0.00458 \text{ mM}$



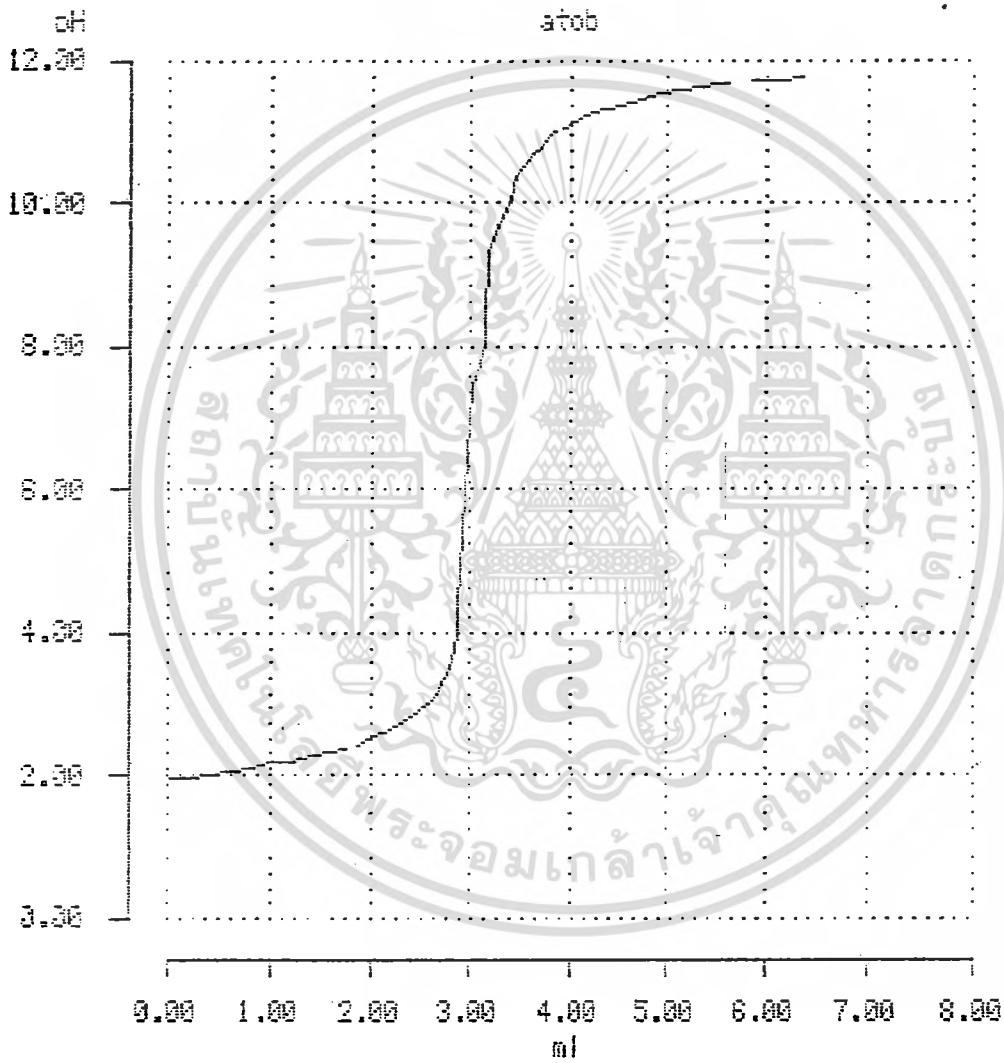
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-20 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Ni(II)$   $0.00865 \text{ mM}$



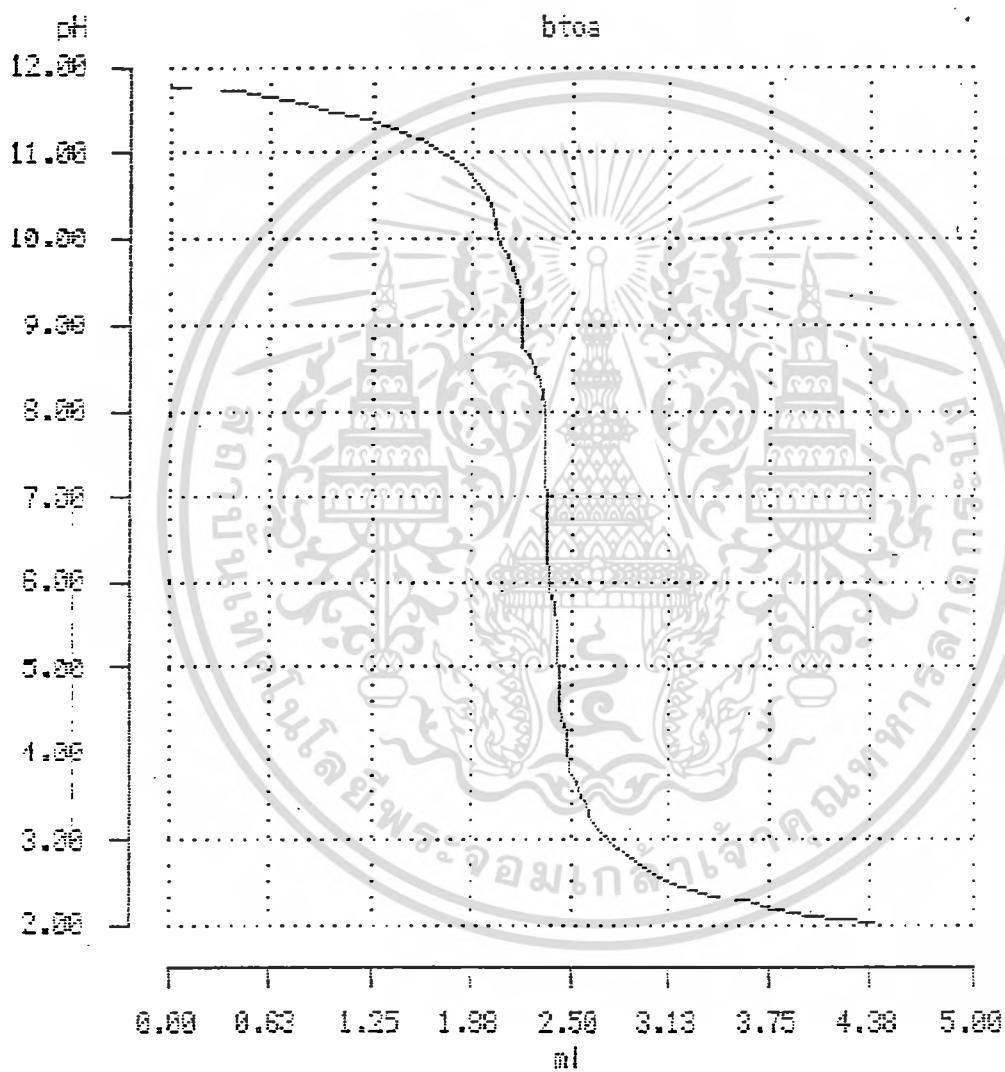
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-21 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Ni(II)$   $0.01679 \text{ mM}$



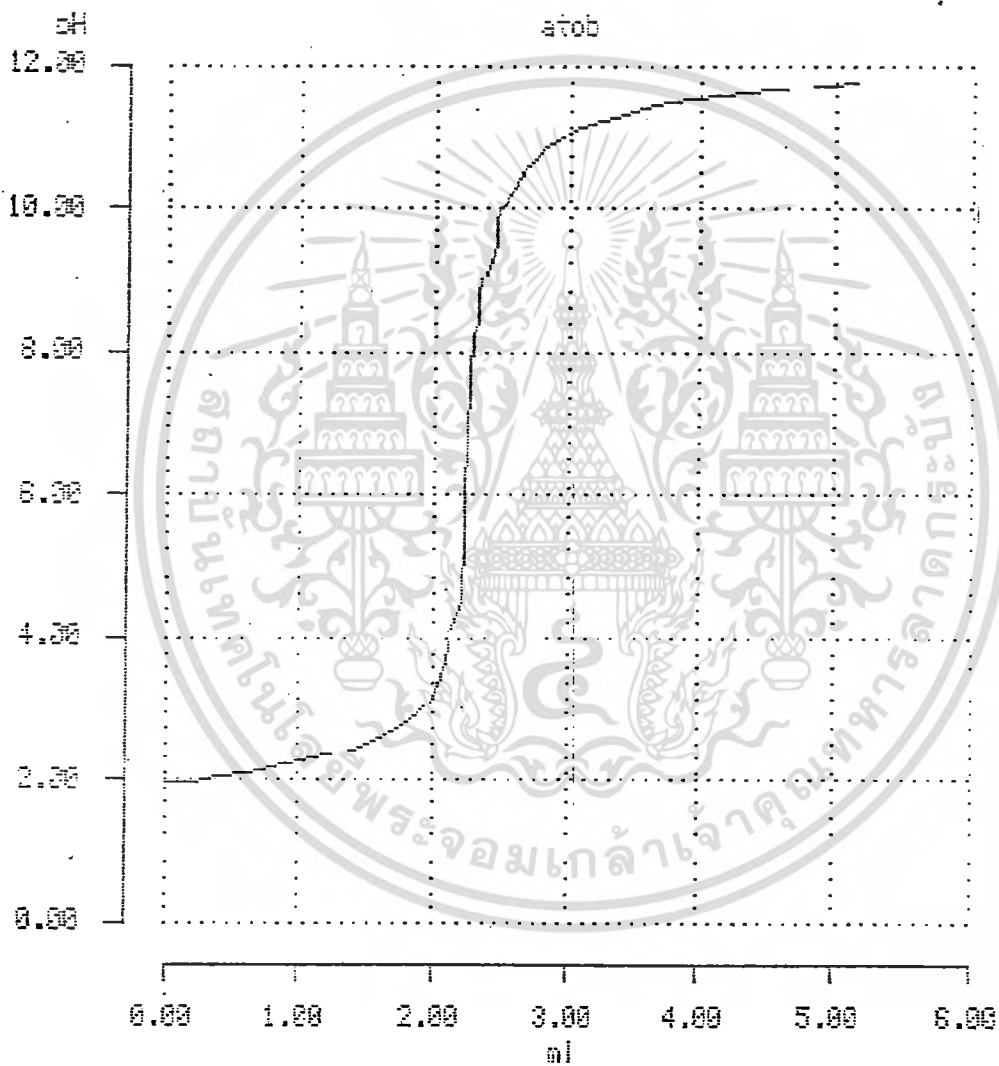
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-22 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Zn(II)$   $0.00309 \text{ mM}$



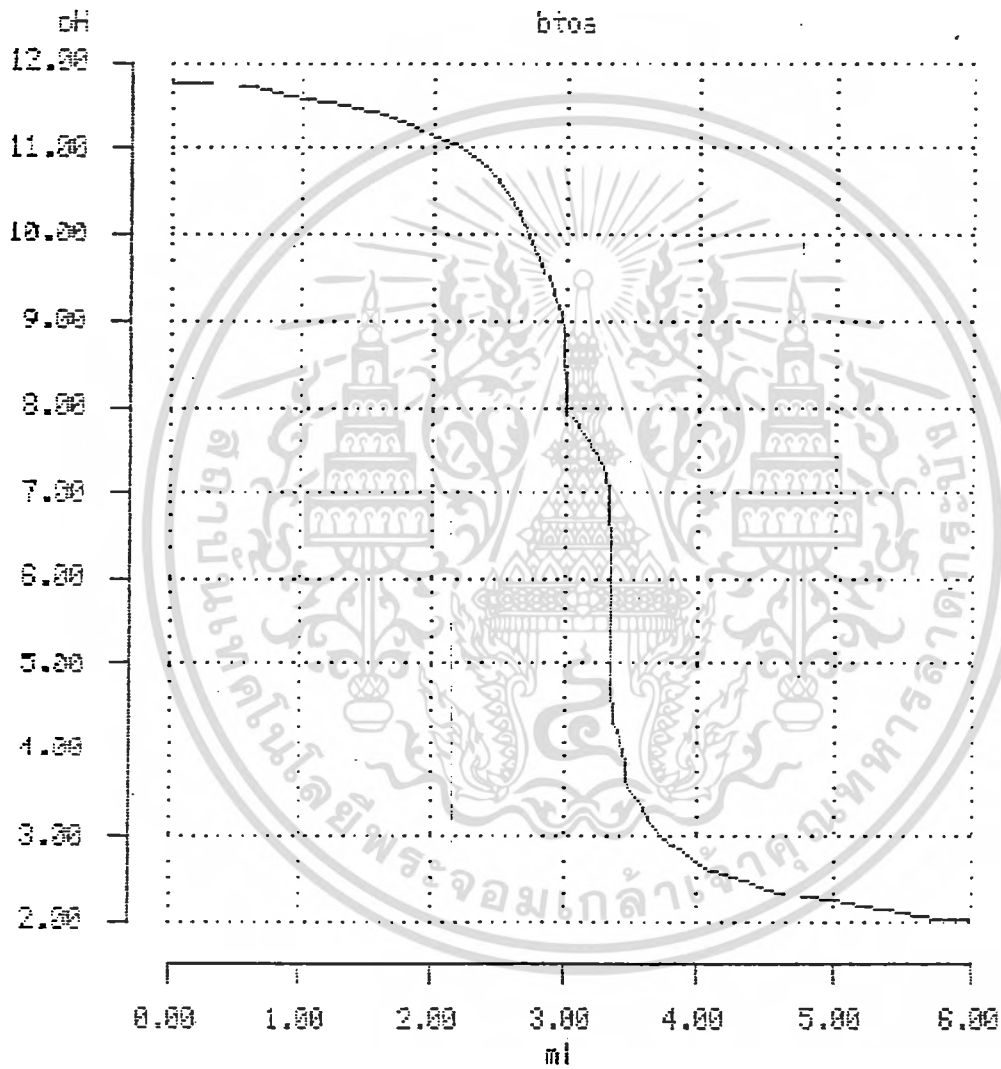
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-23 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Zn(II)$   $0.00669 \text{ mM}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

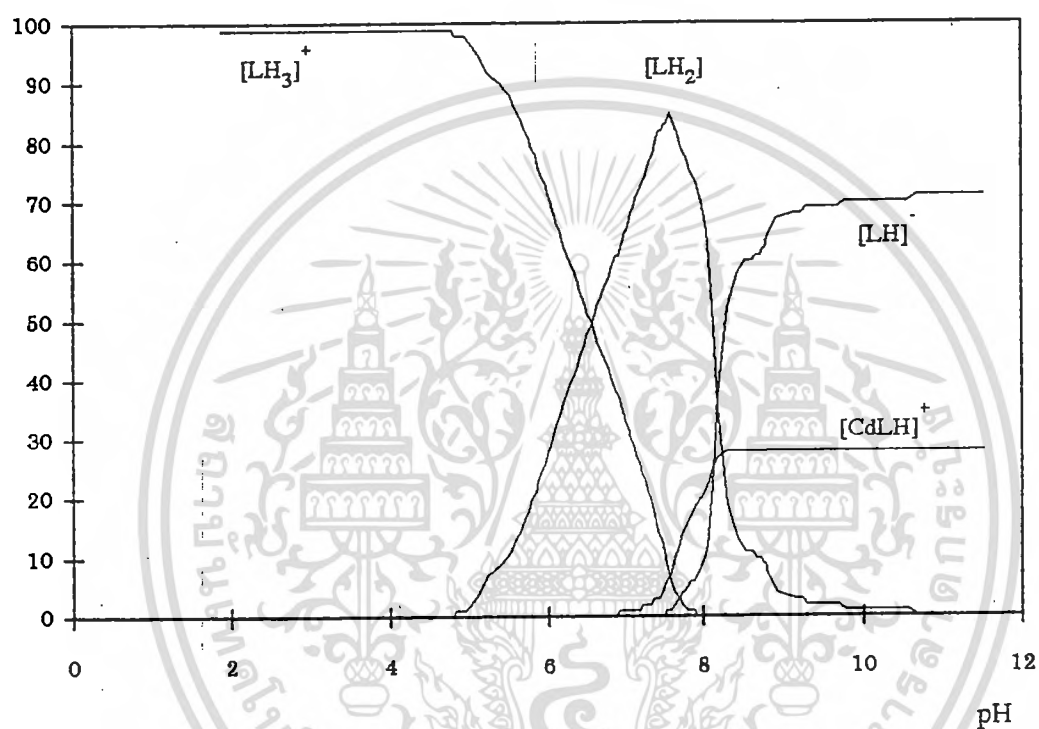
กราฟที่ 4-24 ข้อมูลที่ได้จากการไทเทรตสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Zn(II)$   $0.01236 \text{ mM}$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-26 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cd(II)$   $0.00446 \text{ mM}$

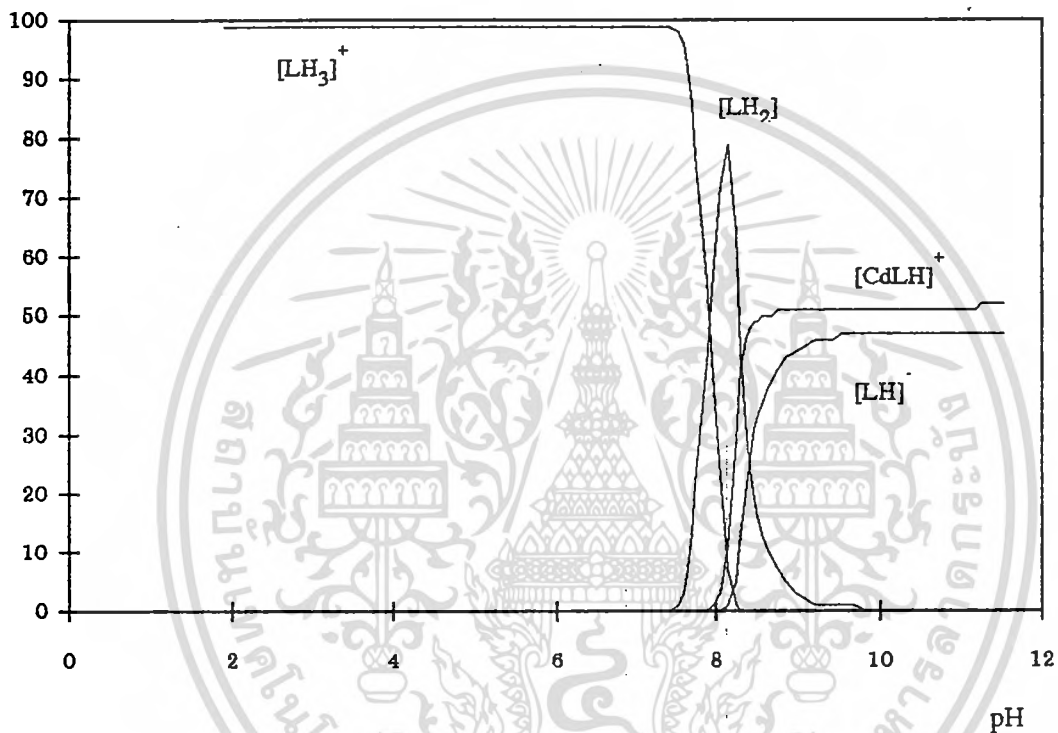
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-27 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cd(II)$   $0.00842 \text{ mM}$

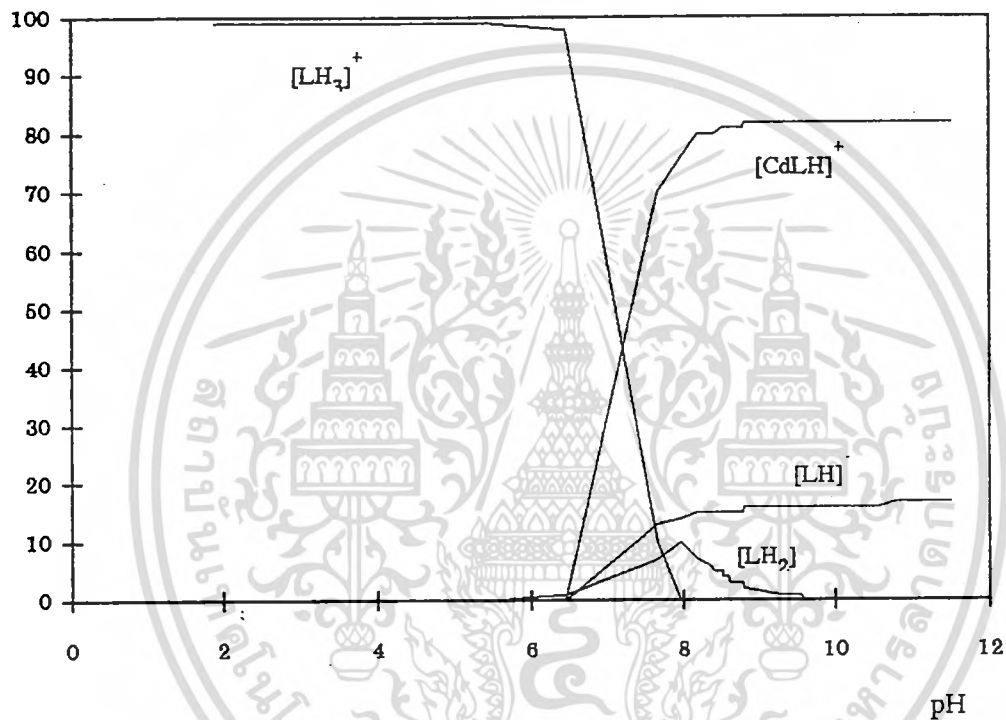
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-28 เส้นโค้งการกระจายตัวของพีซีทีต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cd(II)$   $0.01634 \text{ mM}$

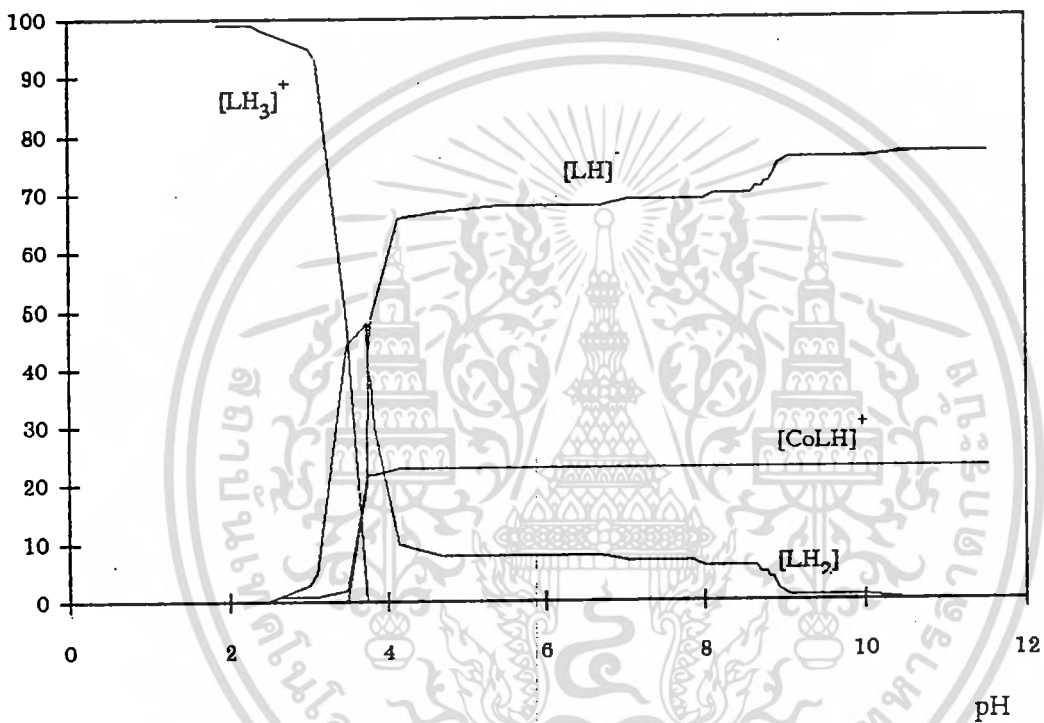
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-29 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Co(II)$   $0.00350 \text{ mM}$

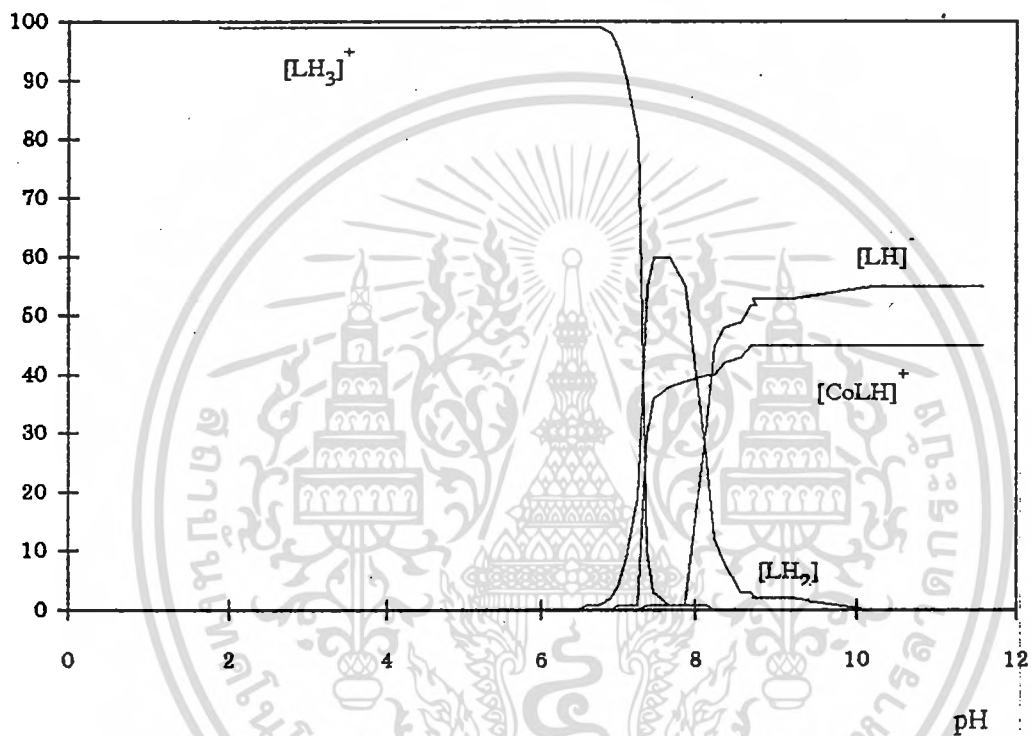
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-30 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Co(II)$   $0.00680 \text{ mM}$

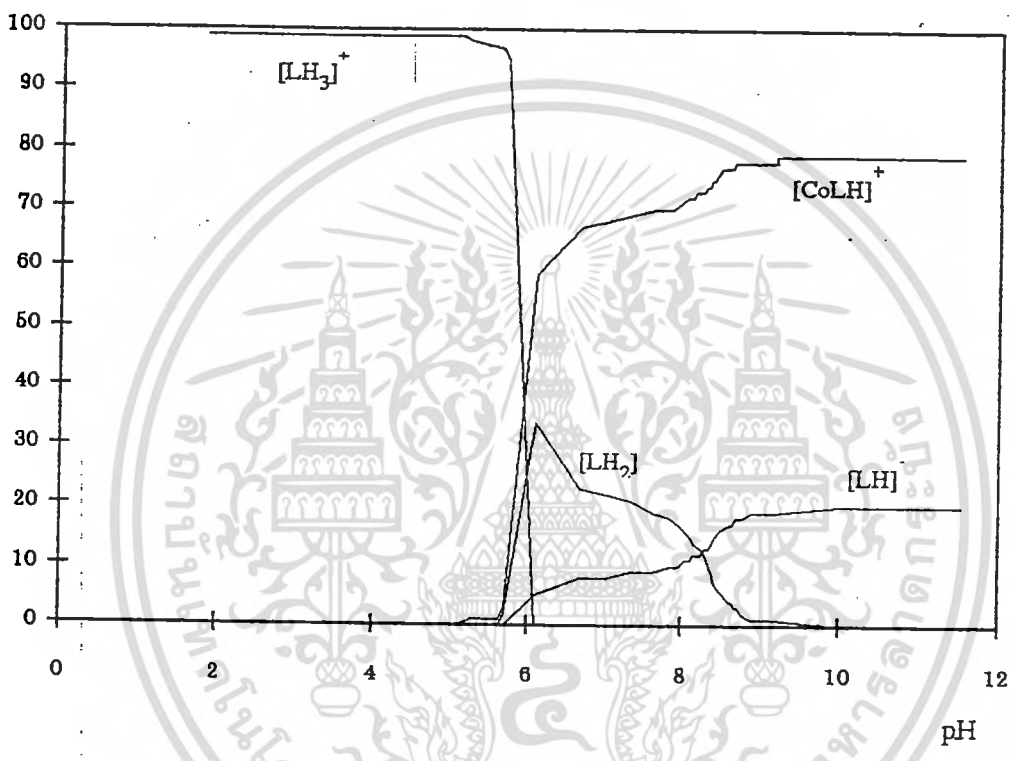
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-31 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Co(II)$   $0.01330 \text{ mM}$

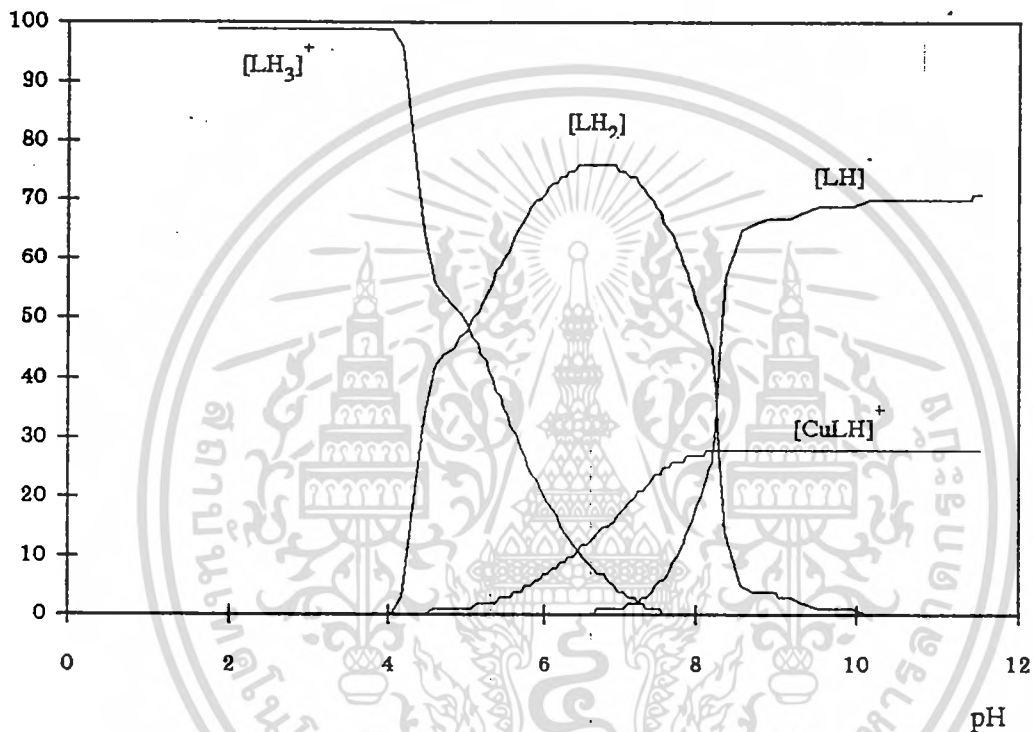
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-32 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cu(II)$   $0.00432 \text{ mM}$

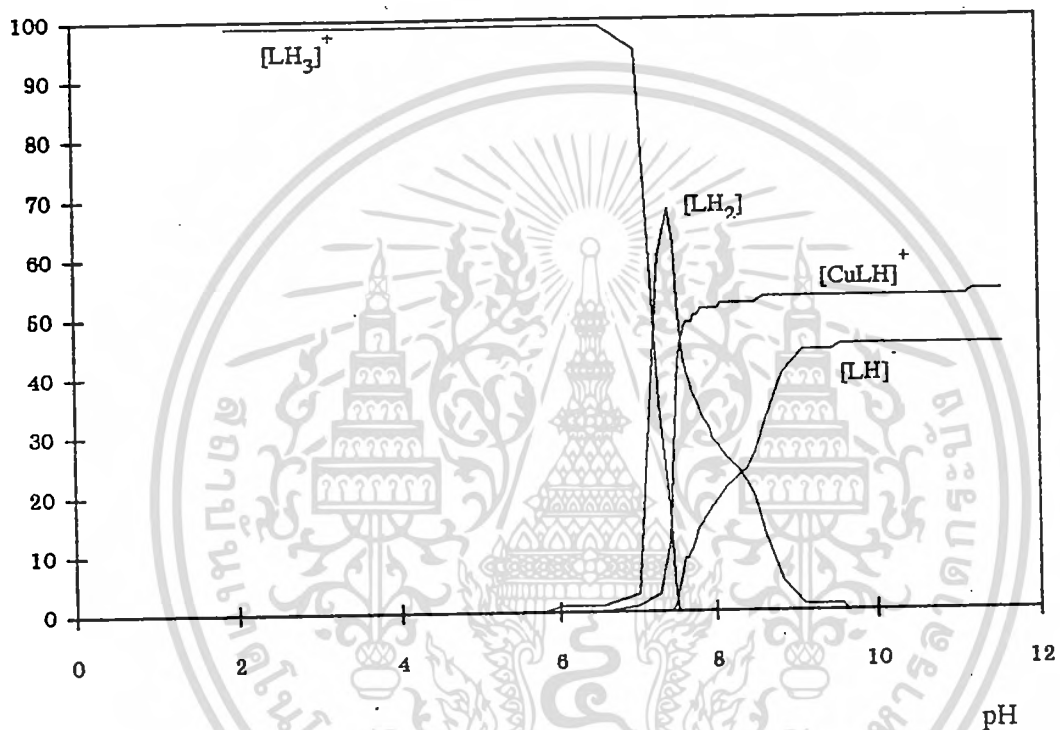
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-33 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Cu(II)$   $0.00816 \text{ mM}$

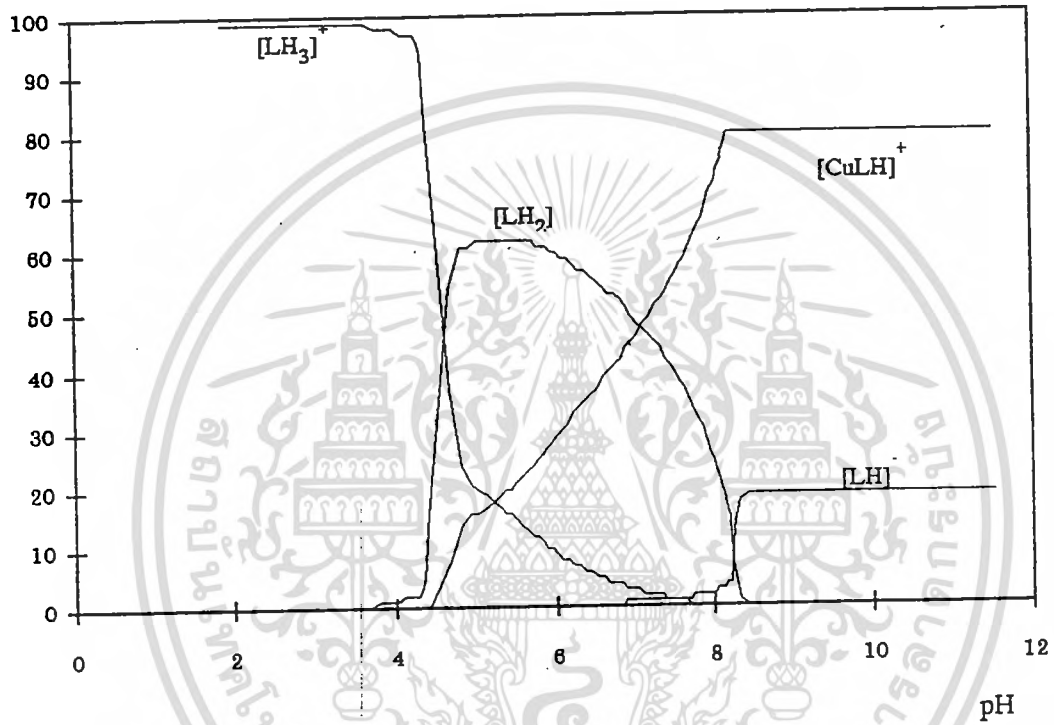
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-34 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน PIH + Cu(II) 0.01584 mM

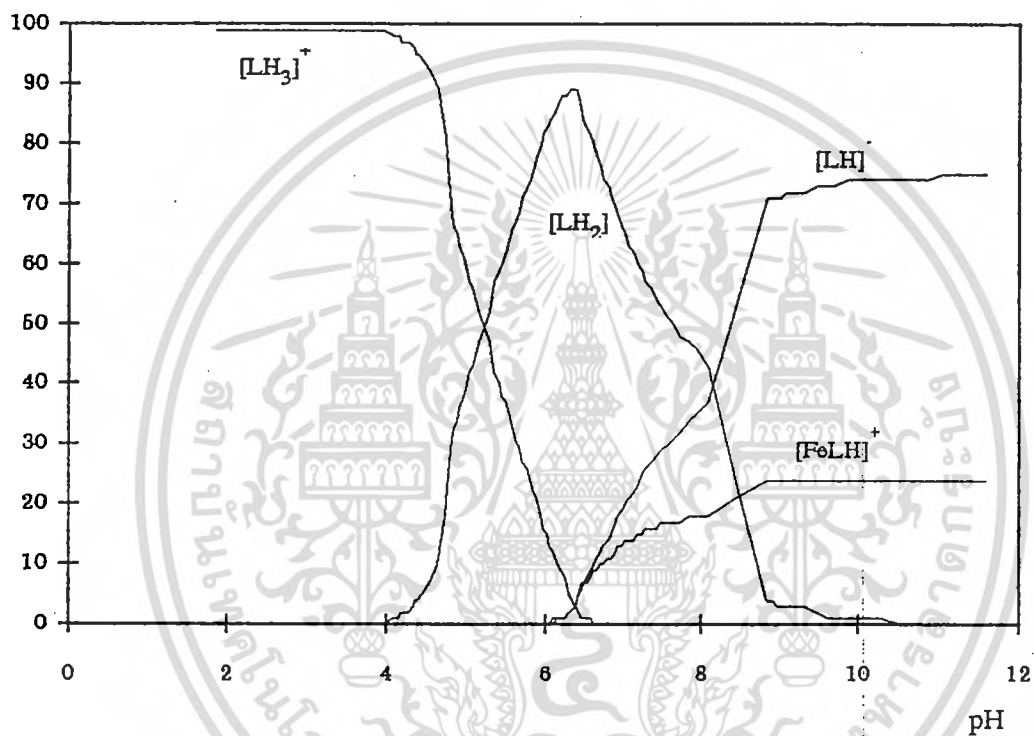
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-35 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(II)$   $0.00495 \text{ mM}$

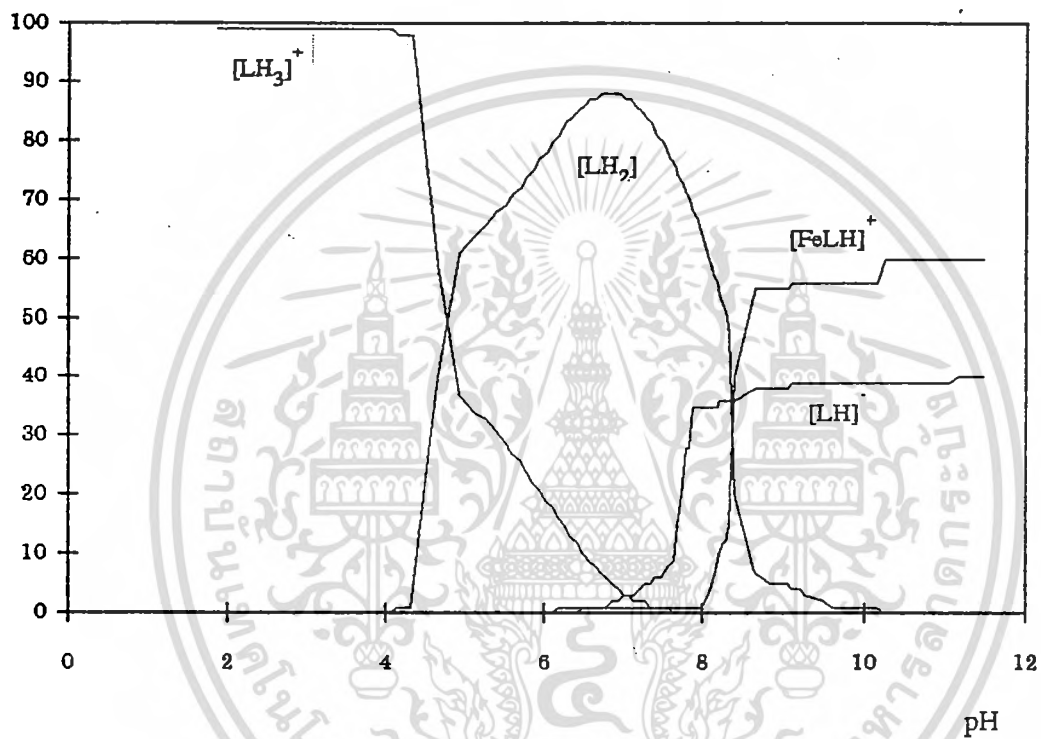
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-36 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(II)$   $0.00798 \text{ mM}$

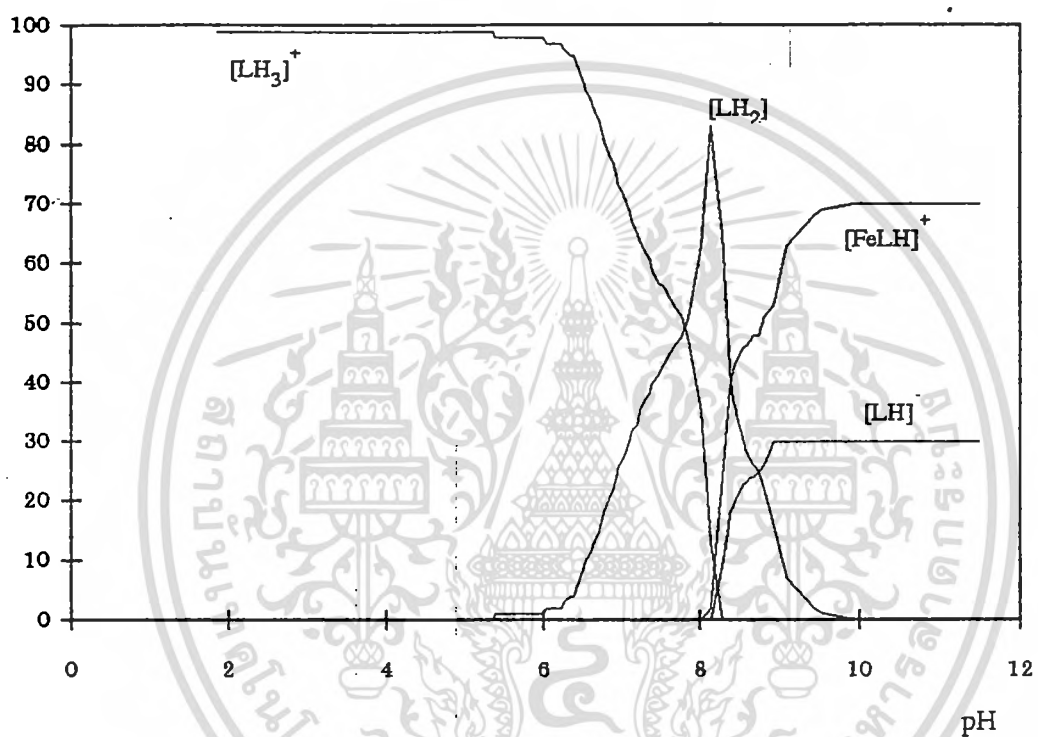
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-37 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีรียส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(II)$   $0.01473 \text{ mM}$

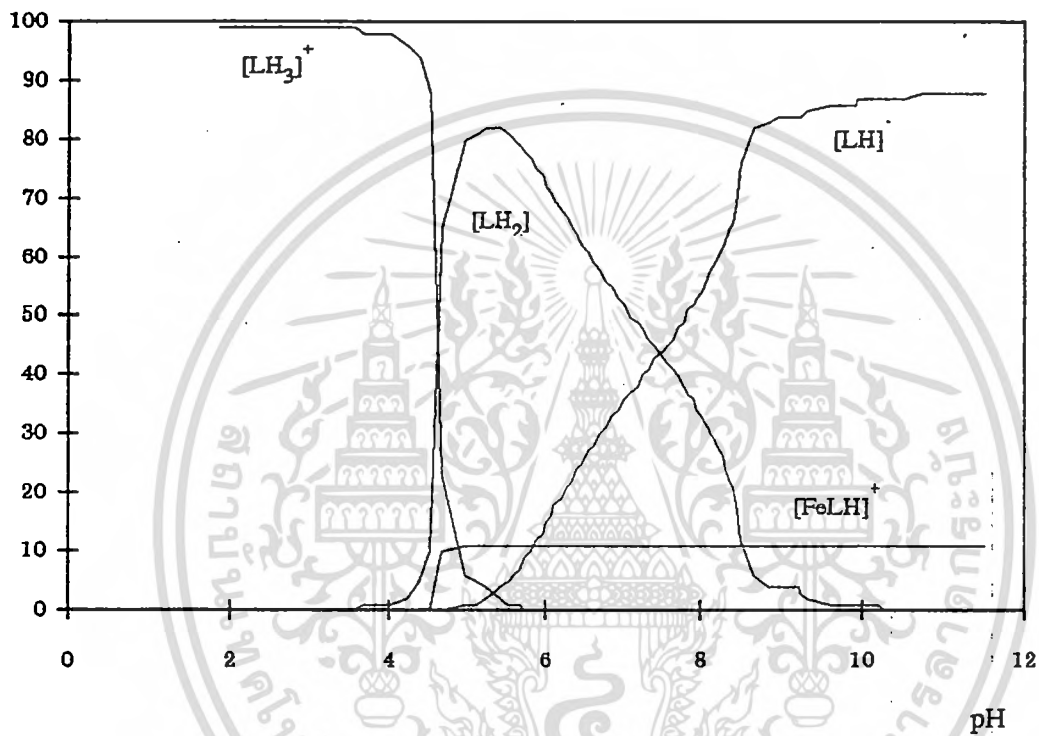
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4-38 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(III)$   $0.00555 \text{ mM}$

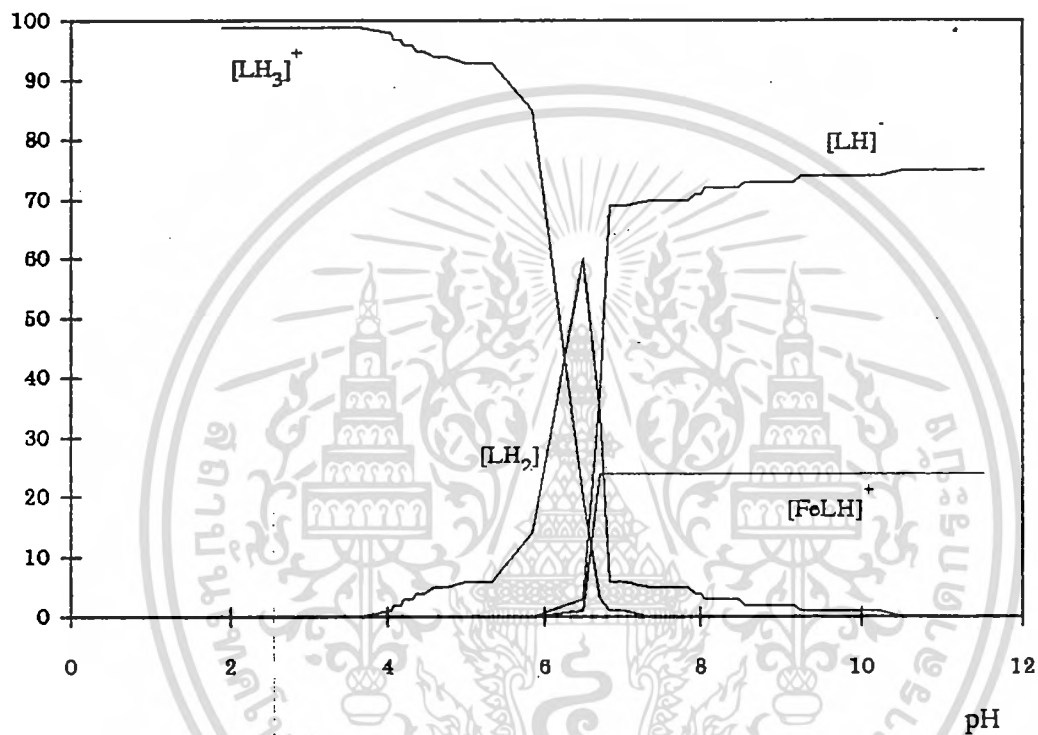
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-39 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(III)$   $0.01295 \text{ mM}$

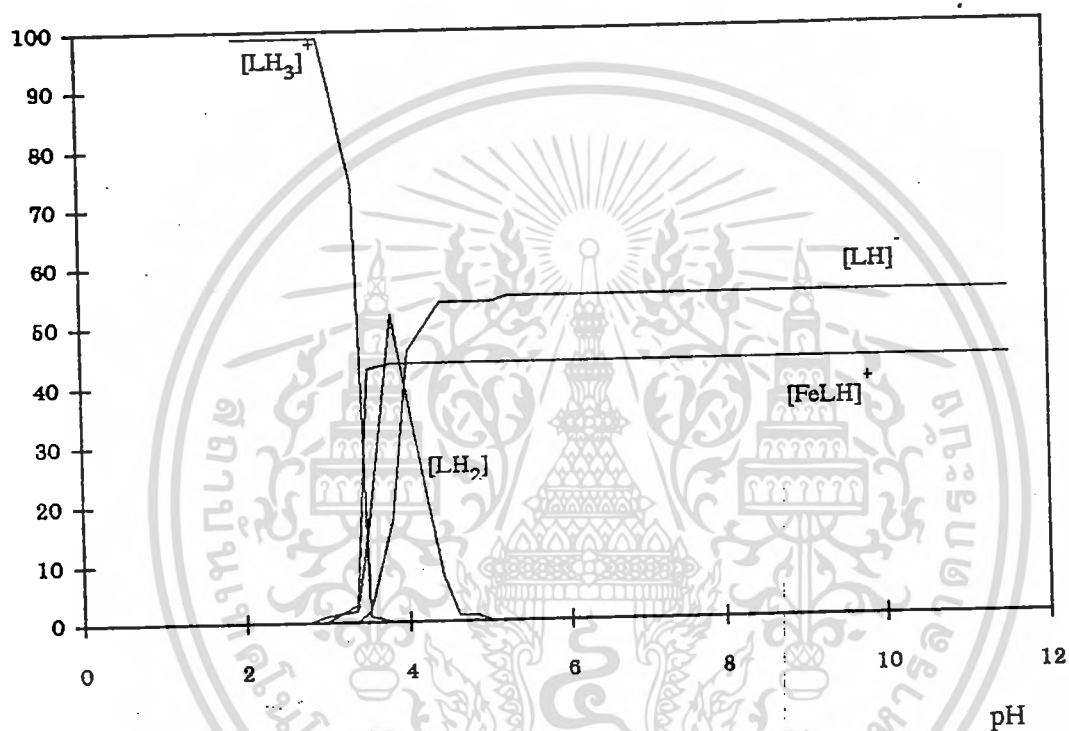
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-40 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีรียส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Fe(III) 0.02775 \text{ mM}$

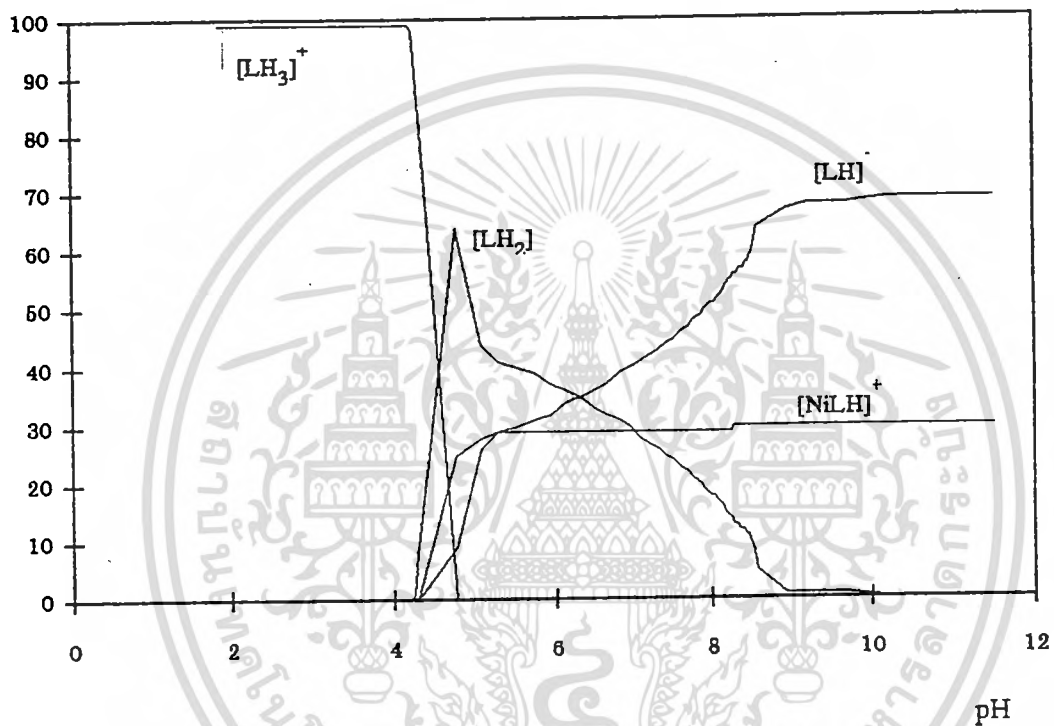
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-41 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Ni(II)$  0.00458 mM

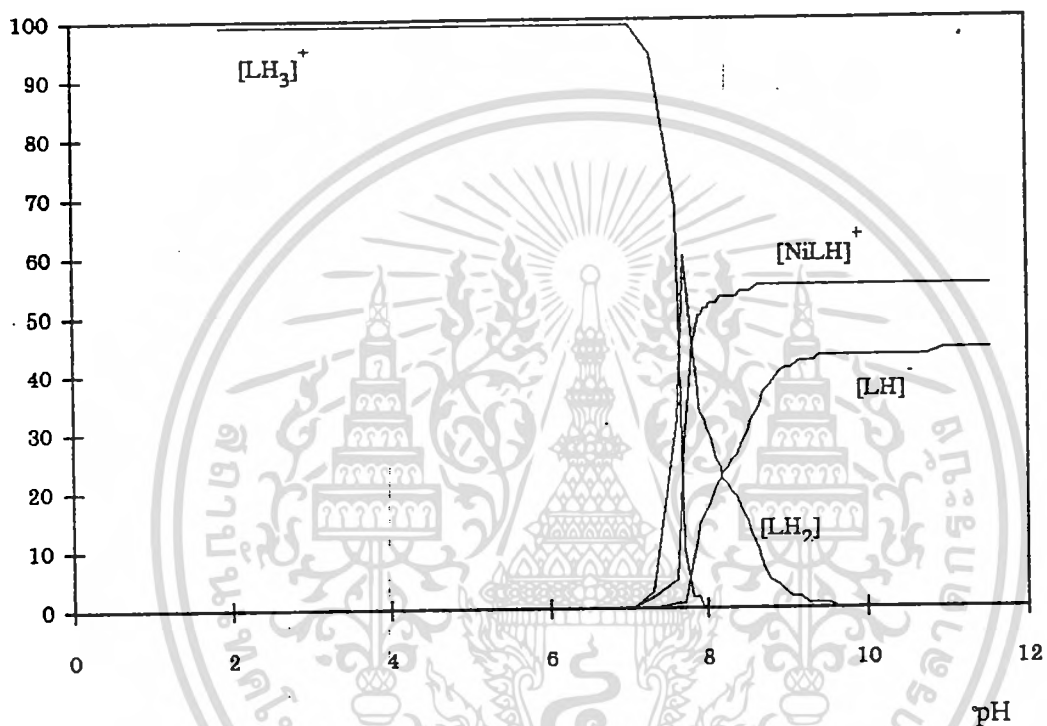
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-42 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Ni(II)$   $0.00865 \text{ mM}$

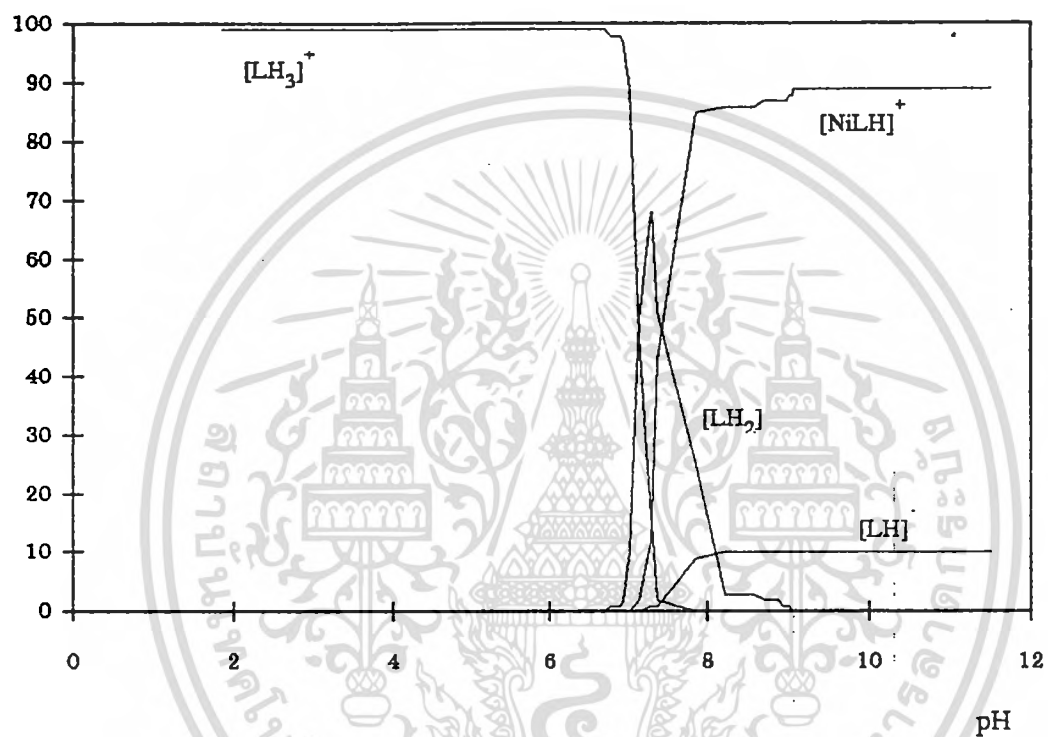
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-43 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Ni(II)$   $0.01679 \text{ mM}$

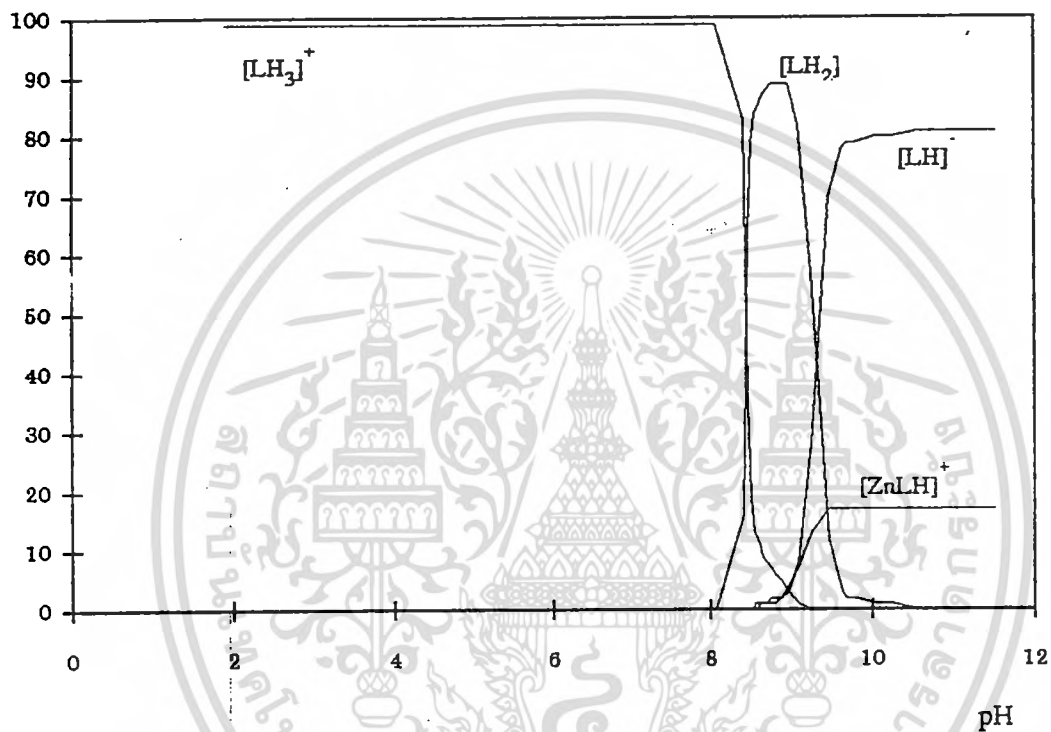
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-44 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Zn(II)$  0.00309 mM

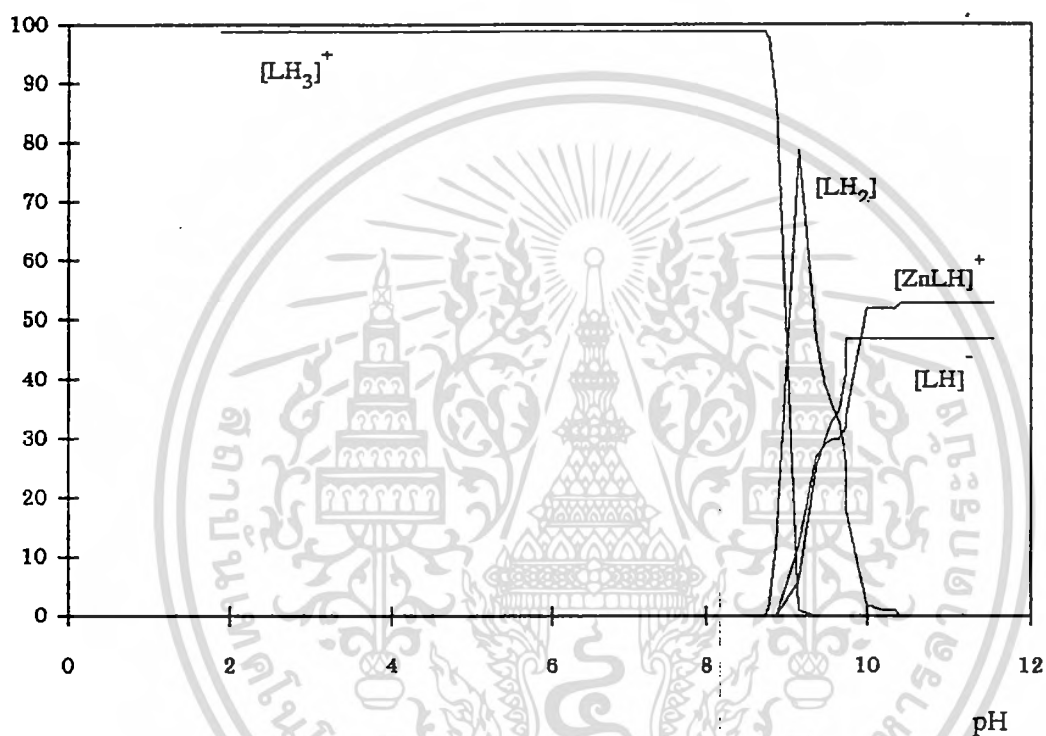
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-45 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Zn(II)$   $0.00669 \text{ mM}$

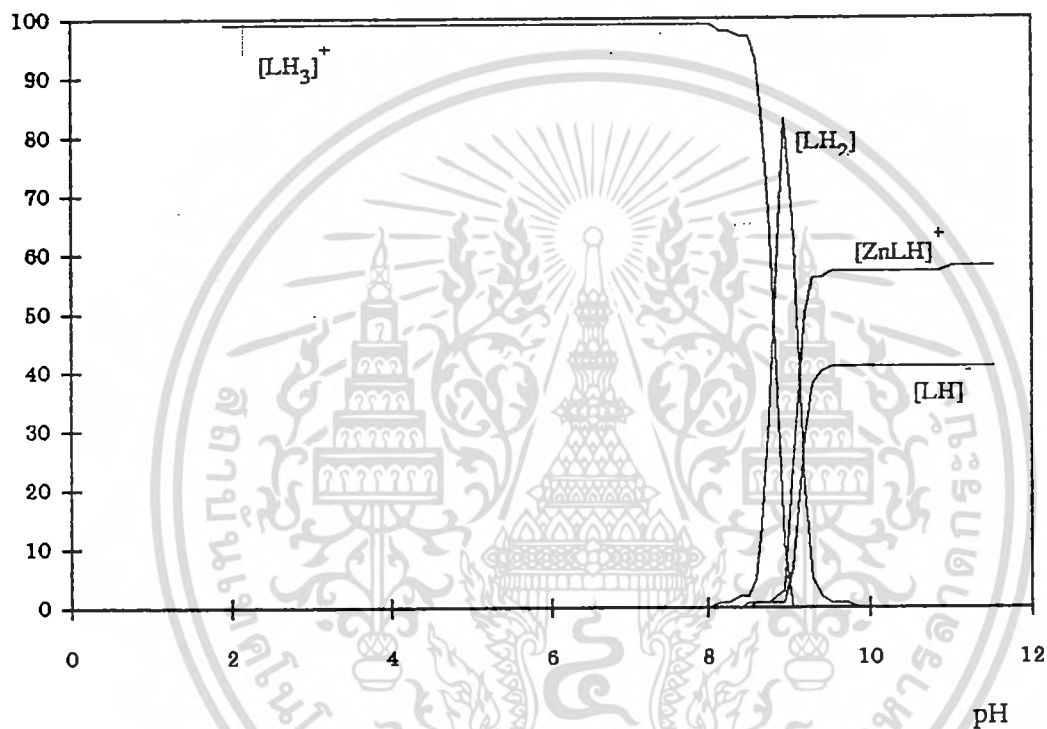
% Distribution



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

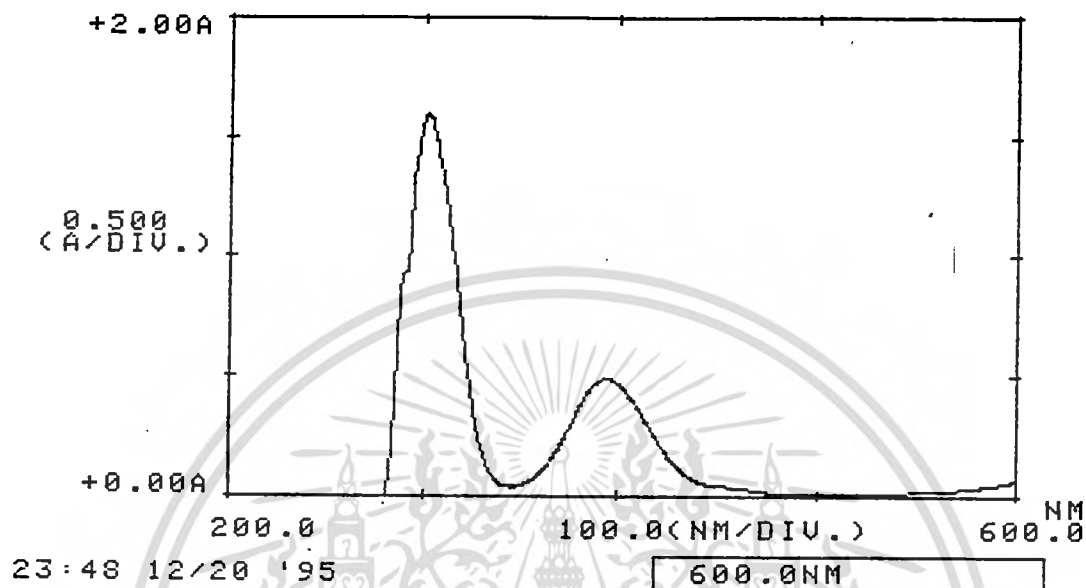
กราฟที่ 4-46 เส้นโค้งการกระจายตัวของสปีชีส์ต่าง ๆ ของสารประกอบเชิงซ้อน  $PIH + Zn(II)$   $0.01236 \text{ mM}$

% Distribution

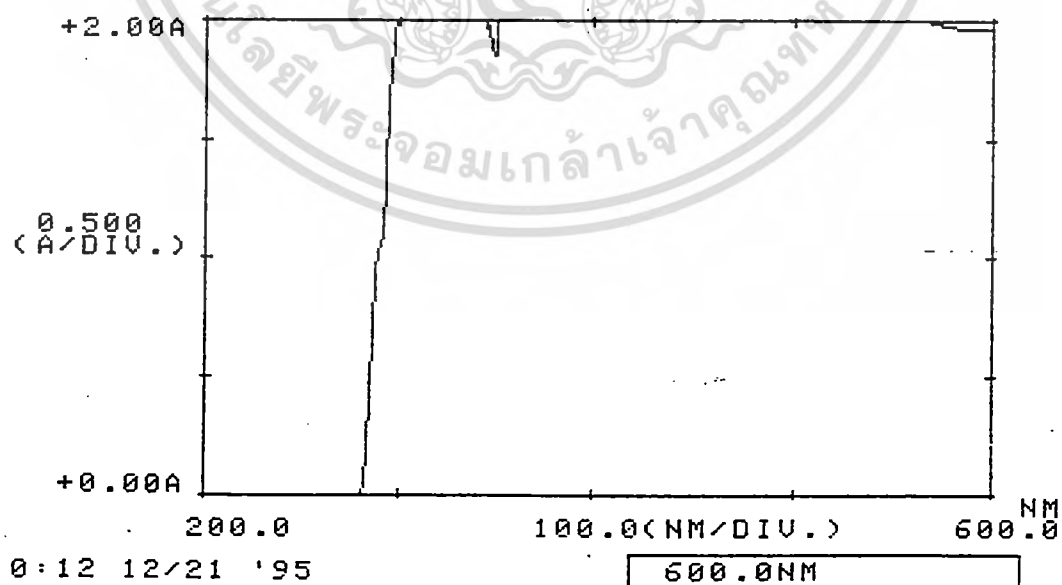


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4.47 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Ni(II) ที่ pH 1.54

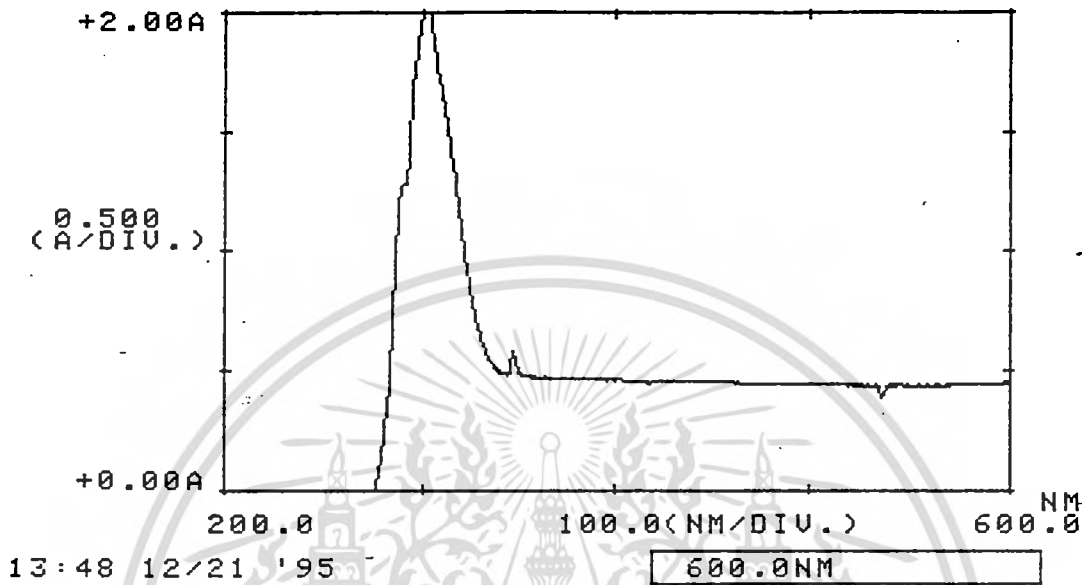


กราฟที่ 4.48 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Ni(II) ที่ pH 11.5

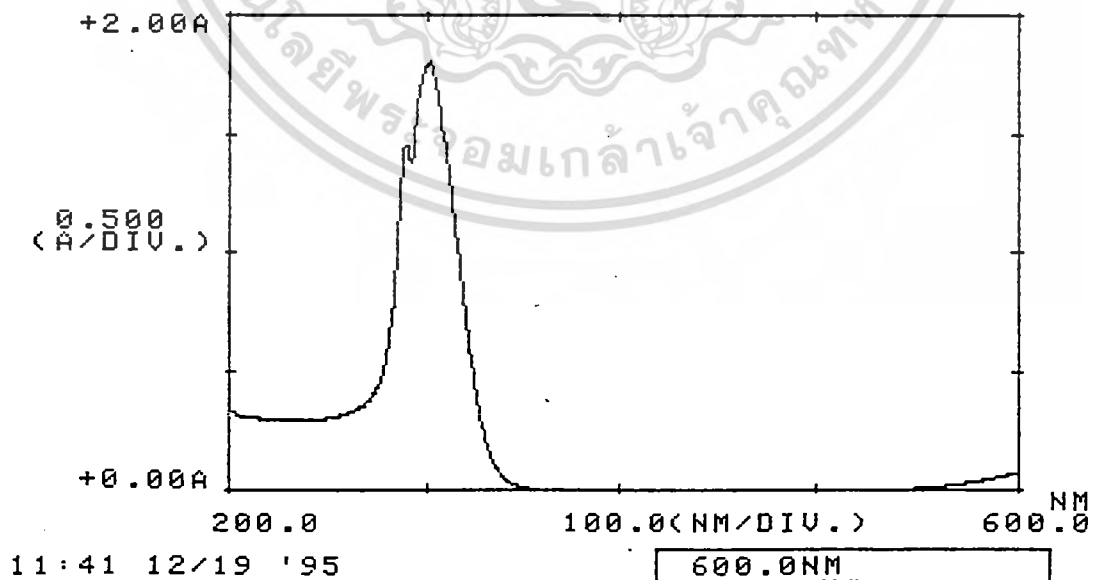


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-49 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Ni(II) ที่ pH 12.46

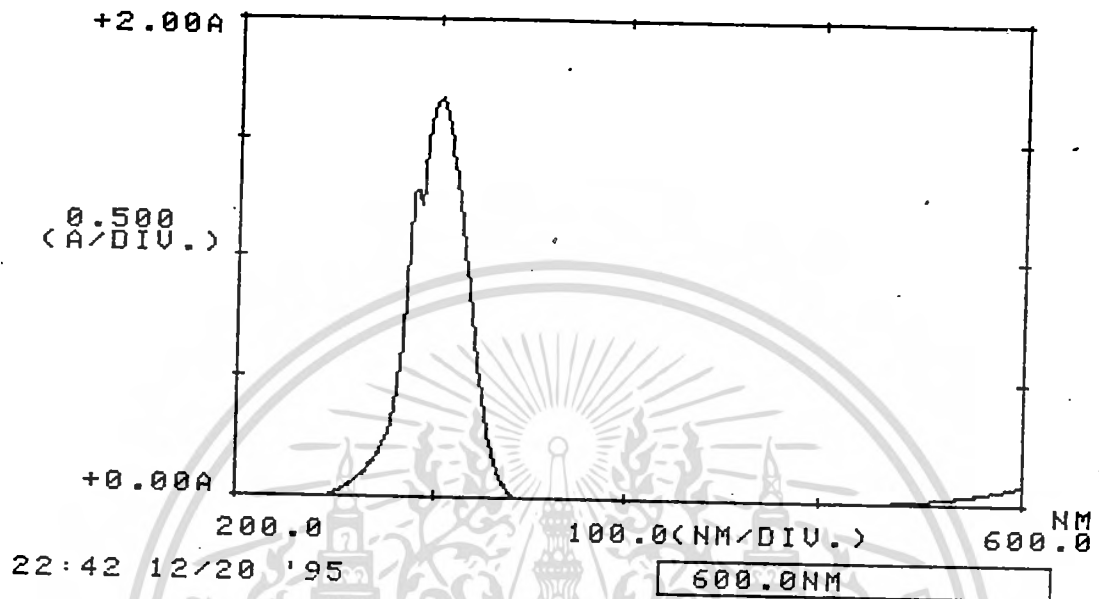


กราฟที่ 4-50 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Cu(II) ที่ pH 2.04

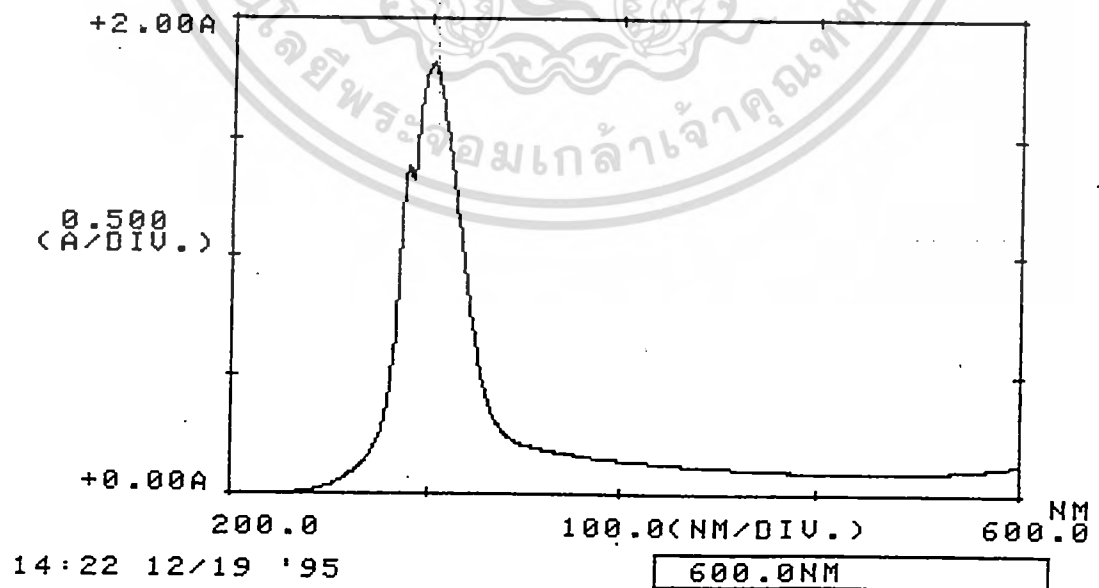


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-51 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Cu(II) ที่ pH 2.38

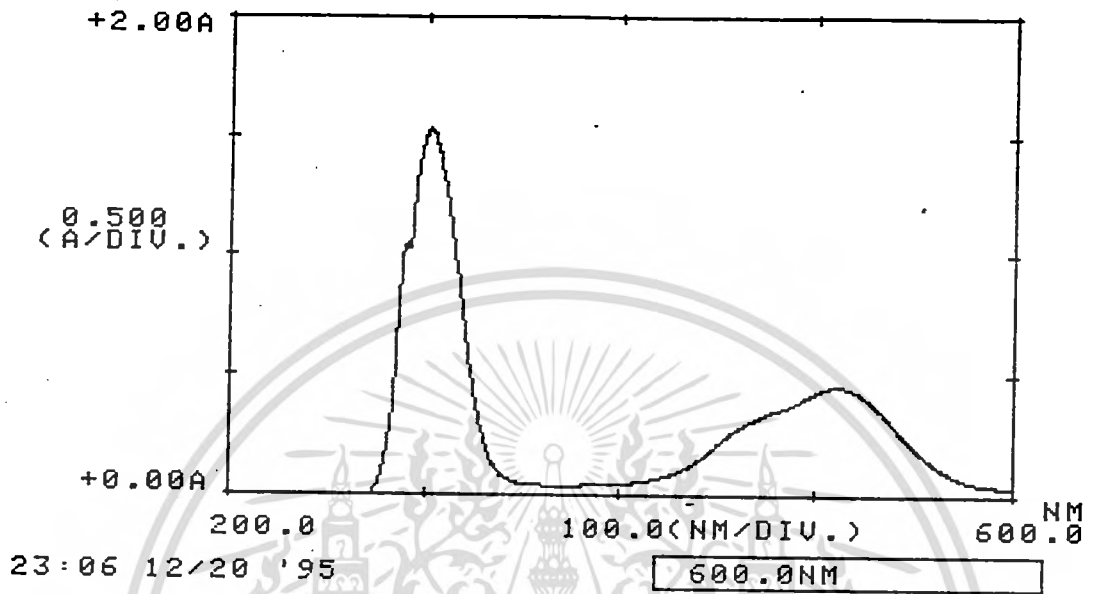


กราฟที่ 4-52 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Cu(II) ที่ pH 4

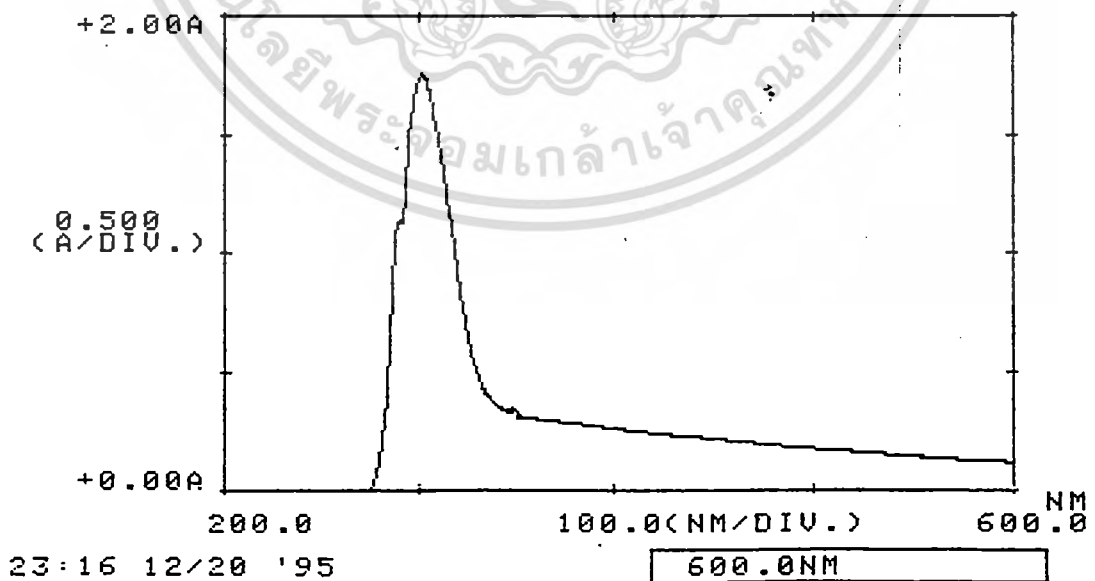


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-53 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Co(II) ที่ pH 2.10

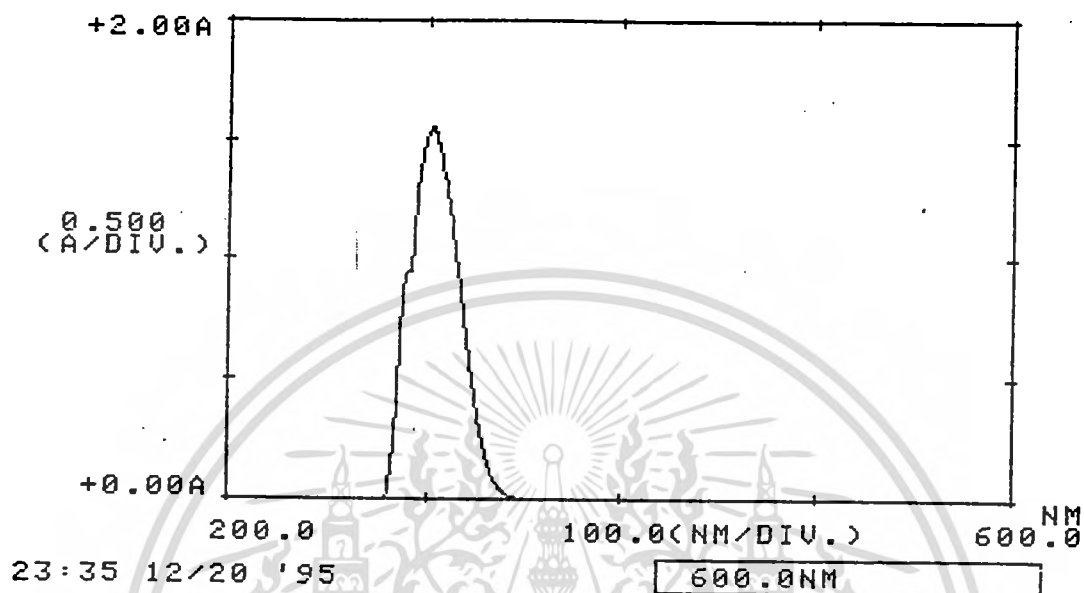


กราฟที่ 4-54 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Co(II) ที่ pH 11.85

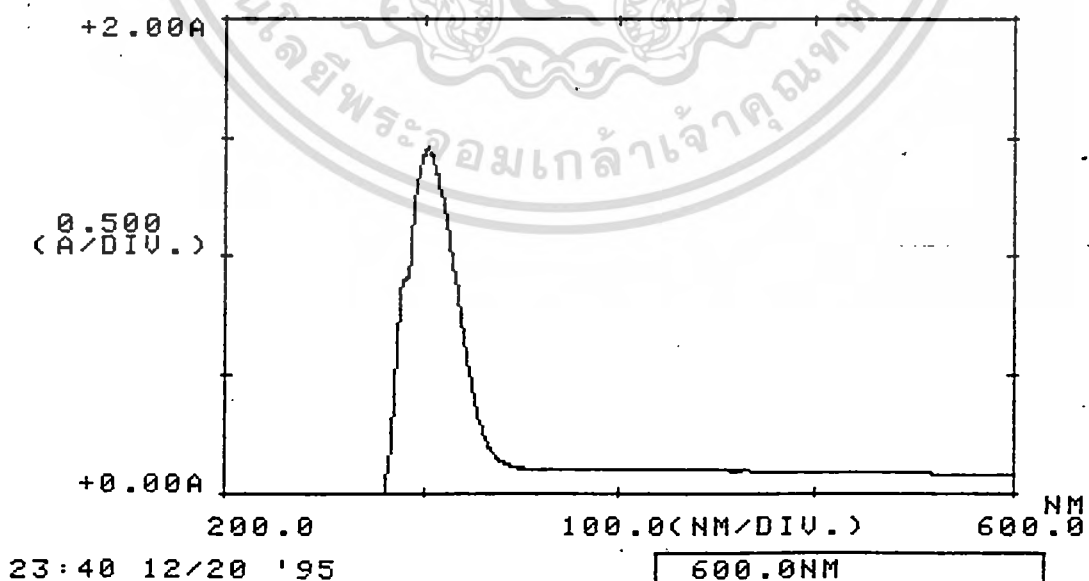


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-55 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Zn(II) ที่ pH 2.04

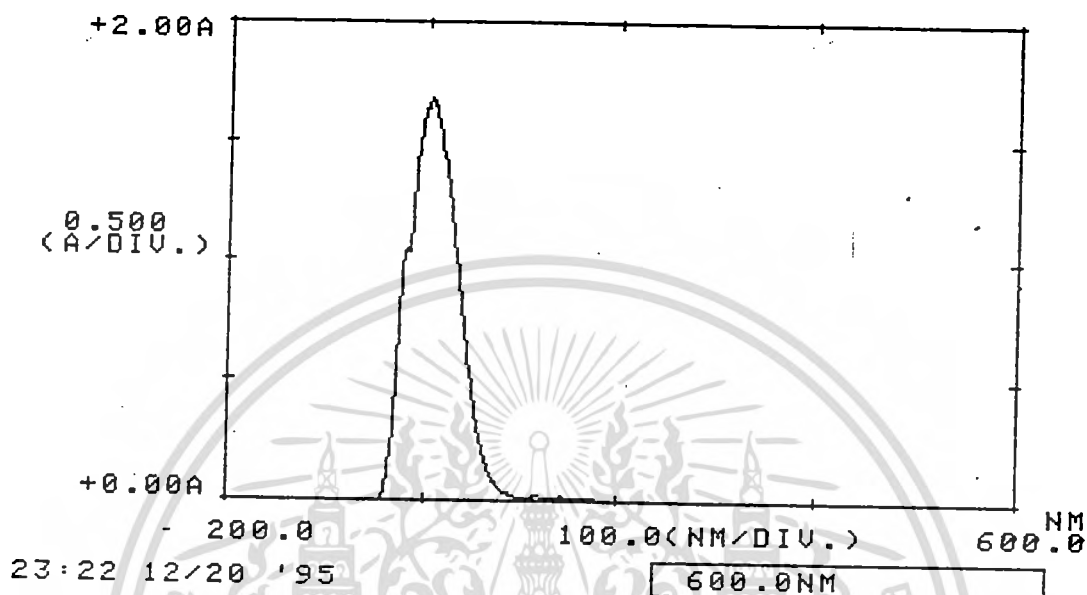


กราฟที่ 4-56 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Zn(II) ที่ pH 11.8

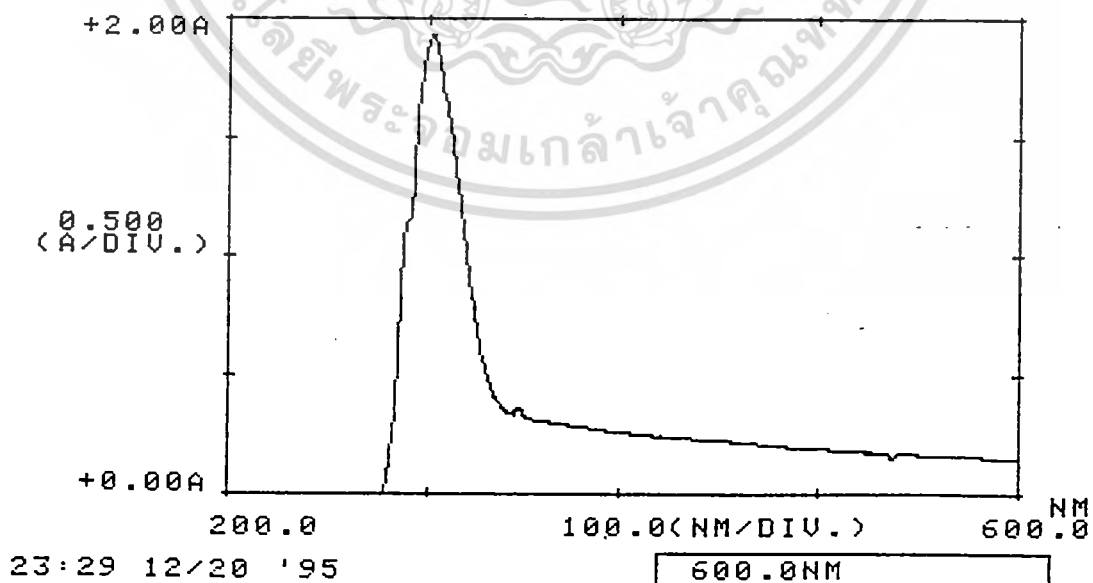


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-57 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Cd(II) ที่ pH 1.71

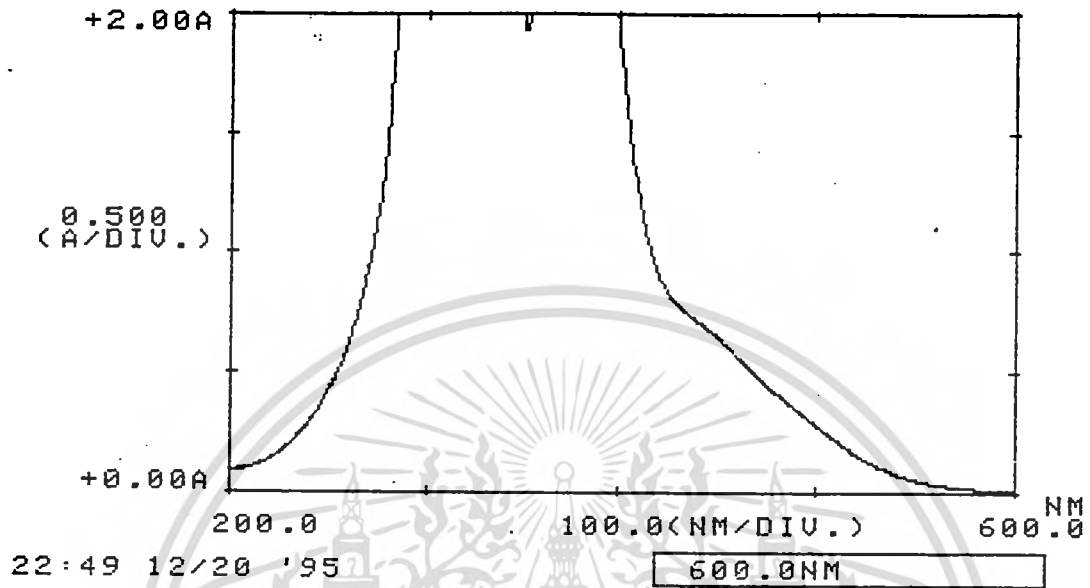


กราฟที่ 4-58 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Cd(II) ที่ pH 11.8

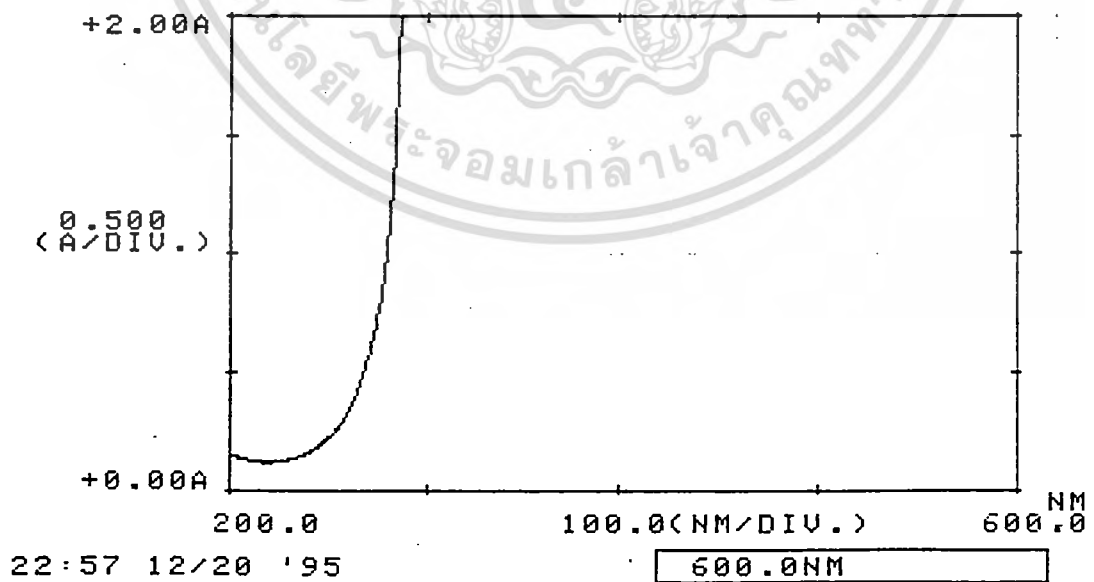


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-59 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(III) ที่ pH 2.18

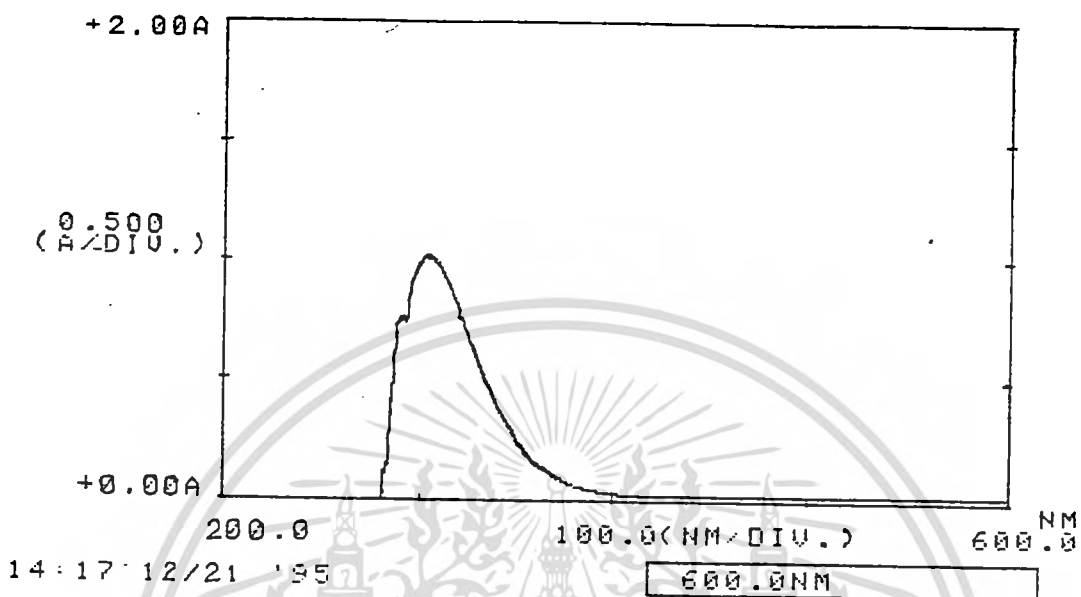


กราฟที่ 4-60 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(III) ที่ pH 10

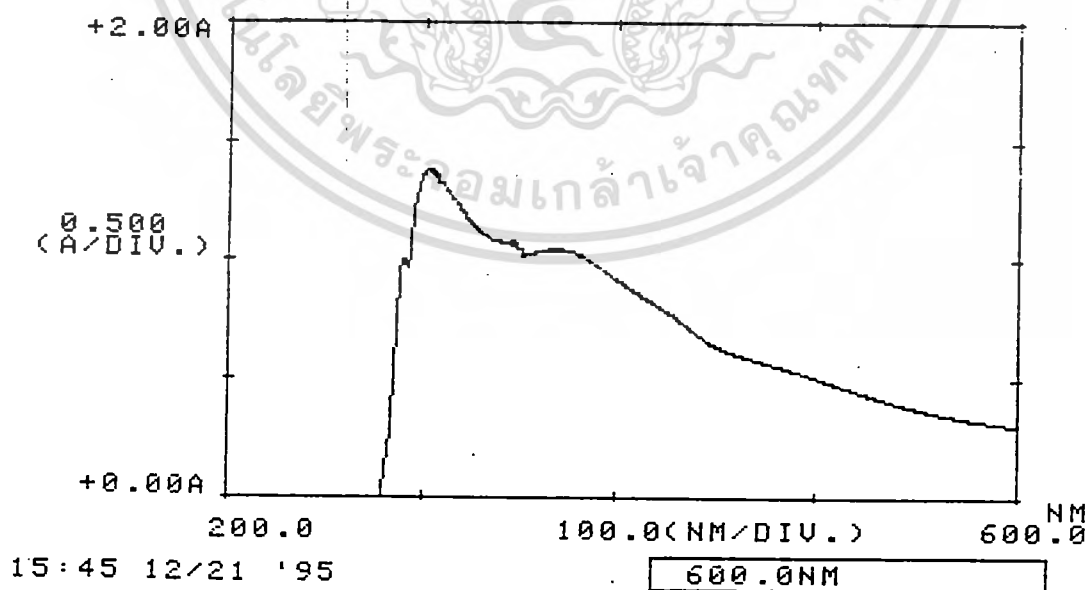


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-61 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 1.85

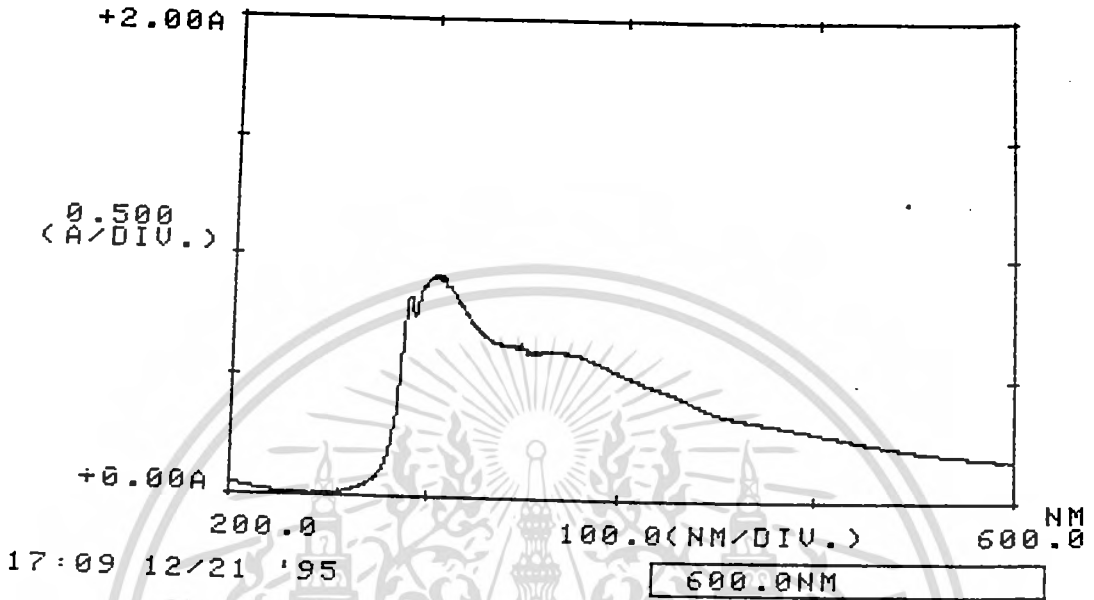


กราฟที่ 4-62 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 11.8

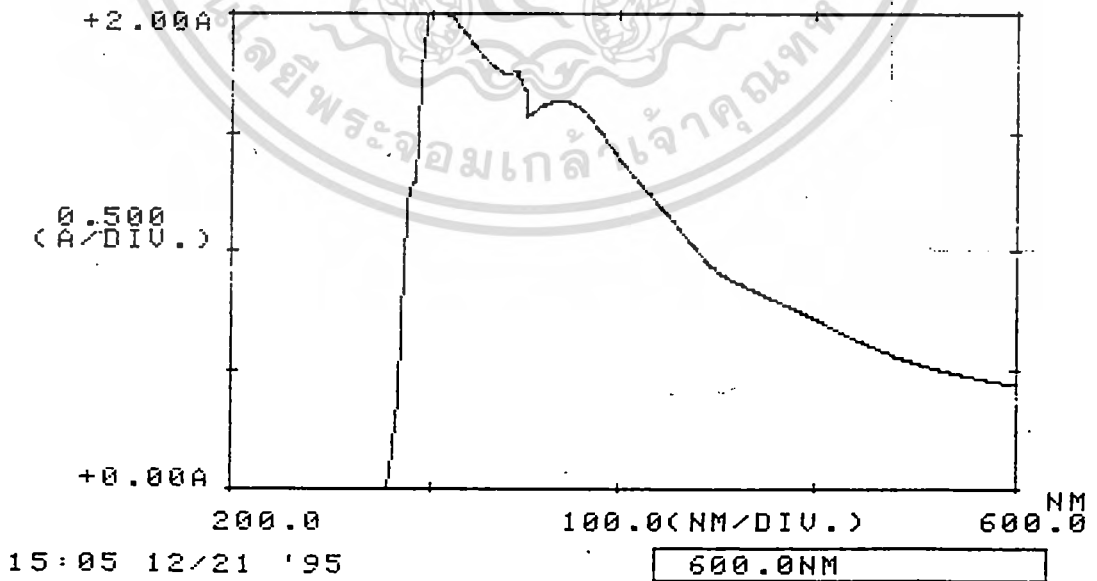


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-63 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 12

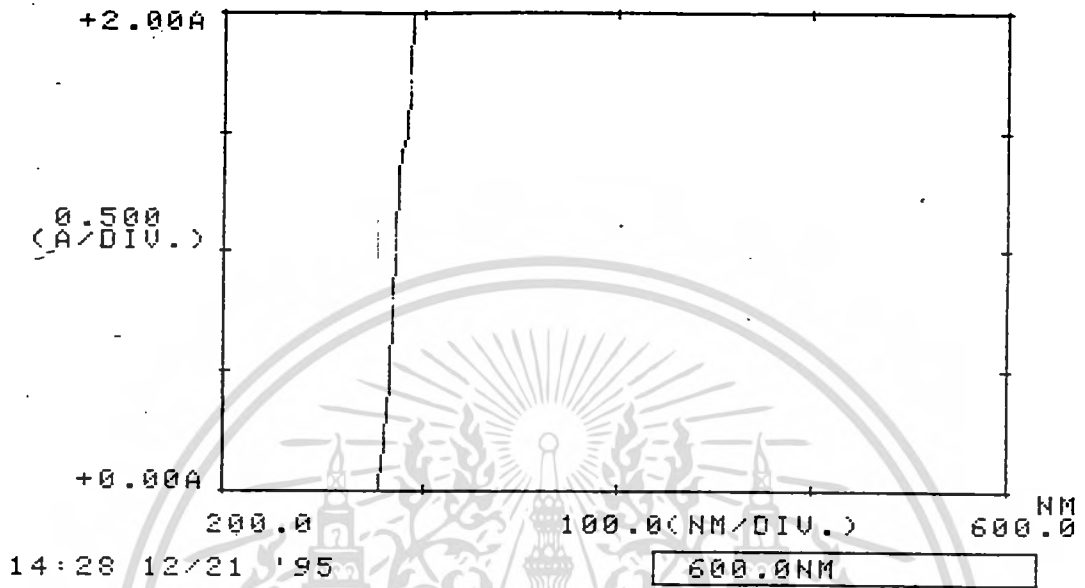


กราฟที่ 4-64 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 12.16

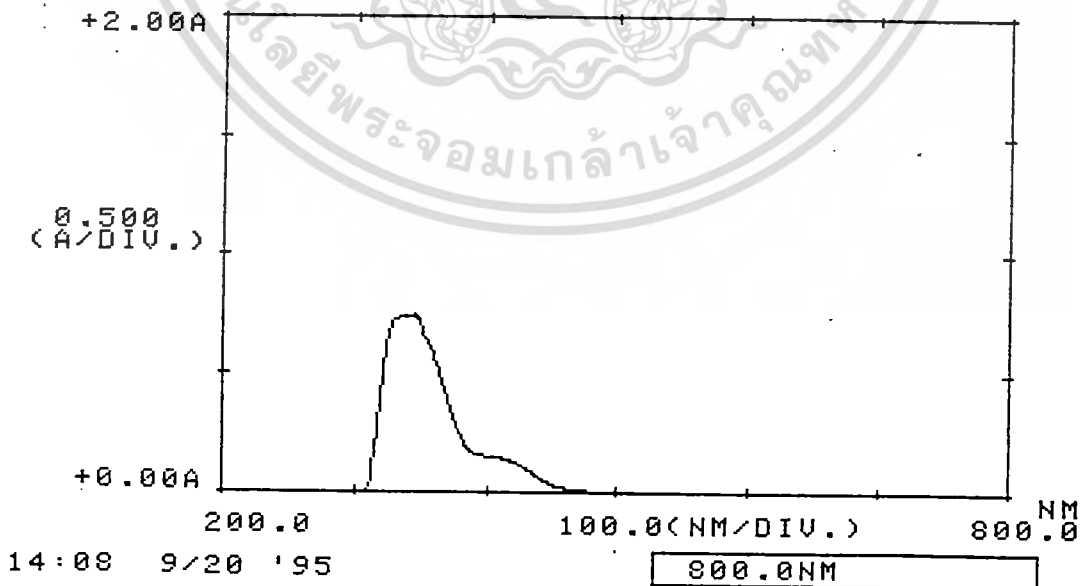


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-65 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ Fe(II) ที่ pH 12.36

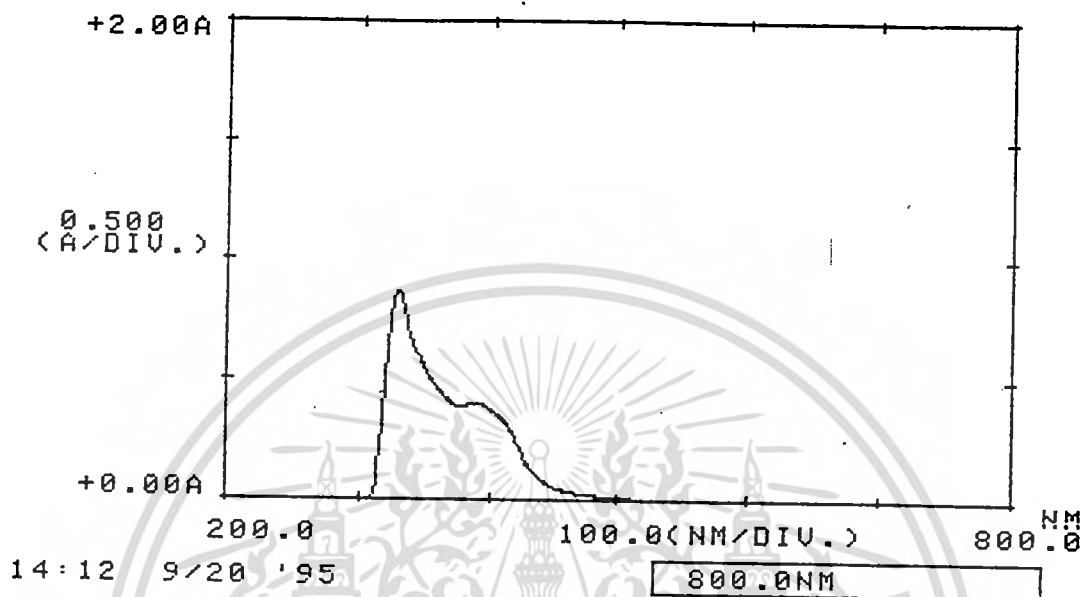


กราฟที่ 4-66 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 2

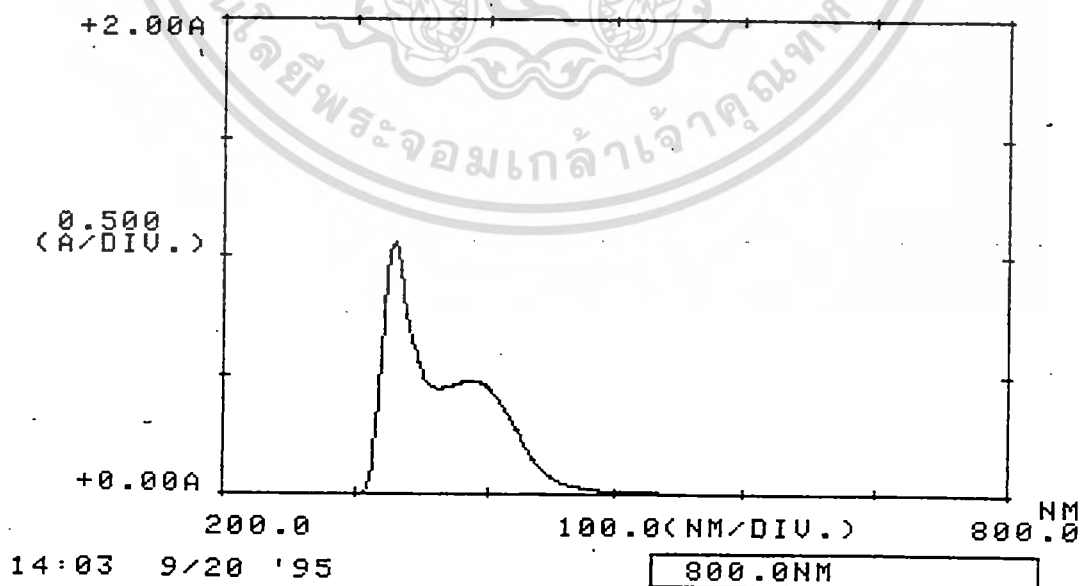


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-67 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 5

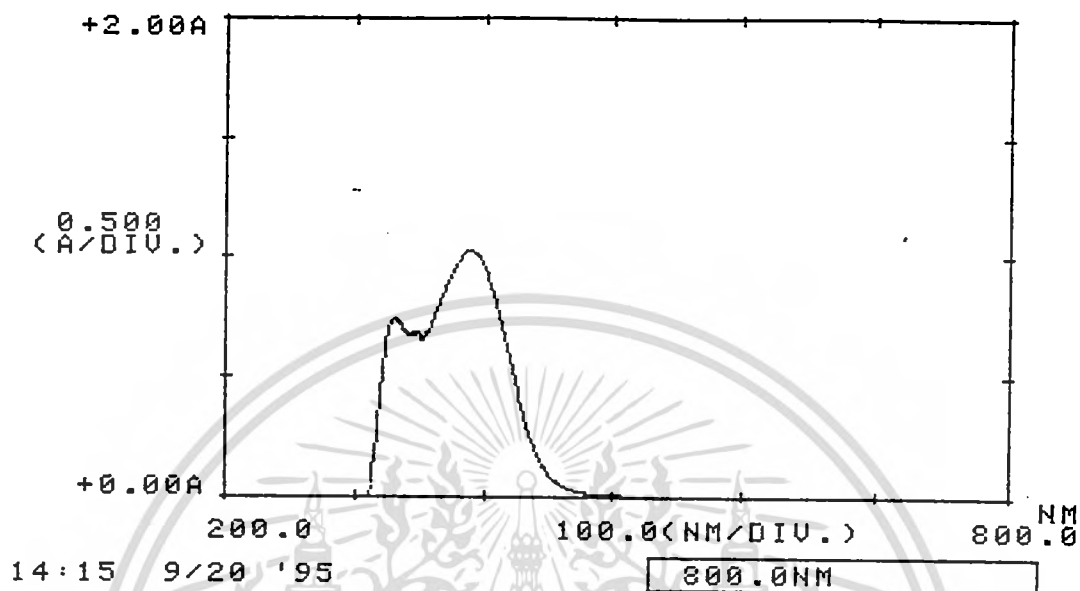


กราฟที่ 4-68 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 7

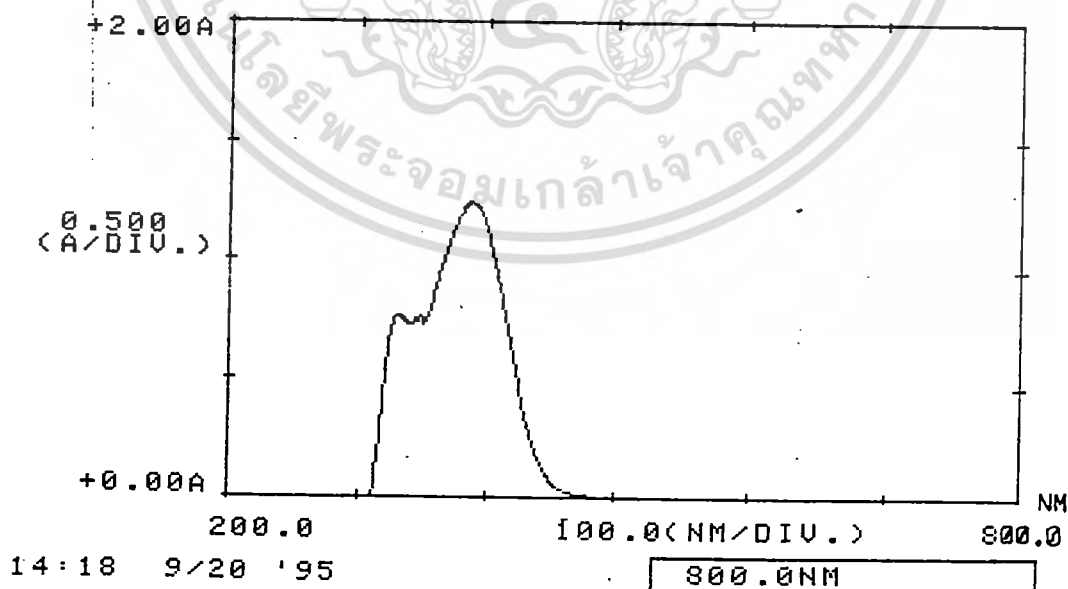


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-69 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 11

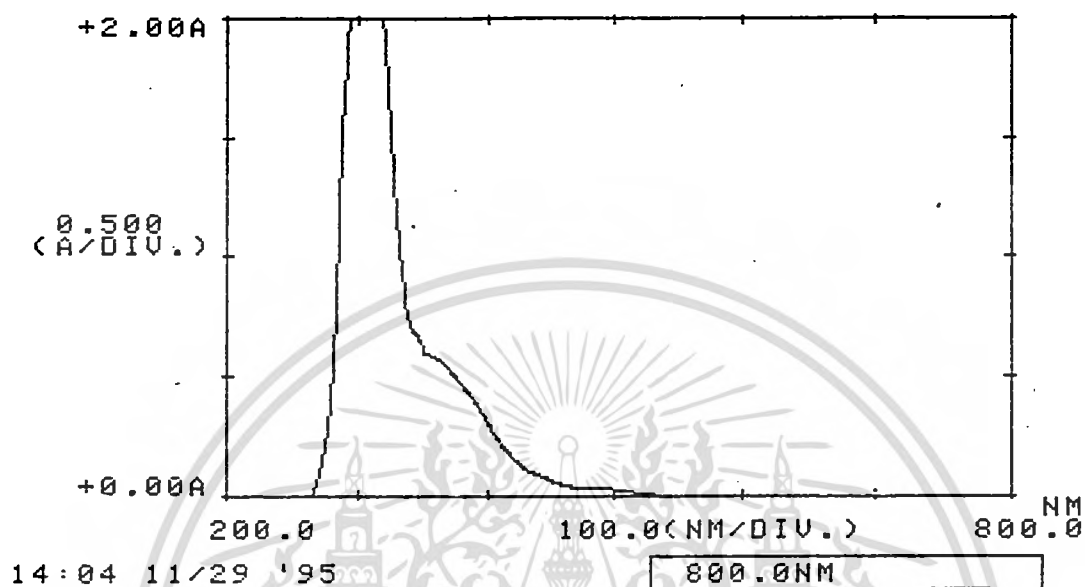


กราฟที่ 4-70 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH 12

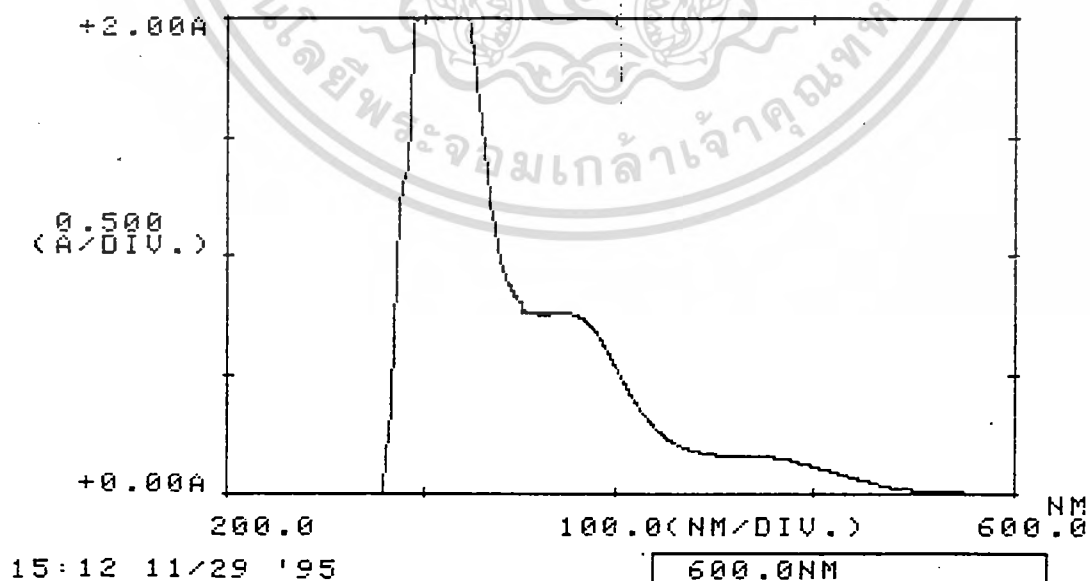


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-71 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ  $\text{PIH}+\text{Fe(II)}$  ที่  $\text{pH } 2$

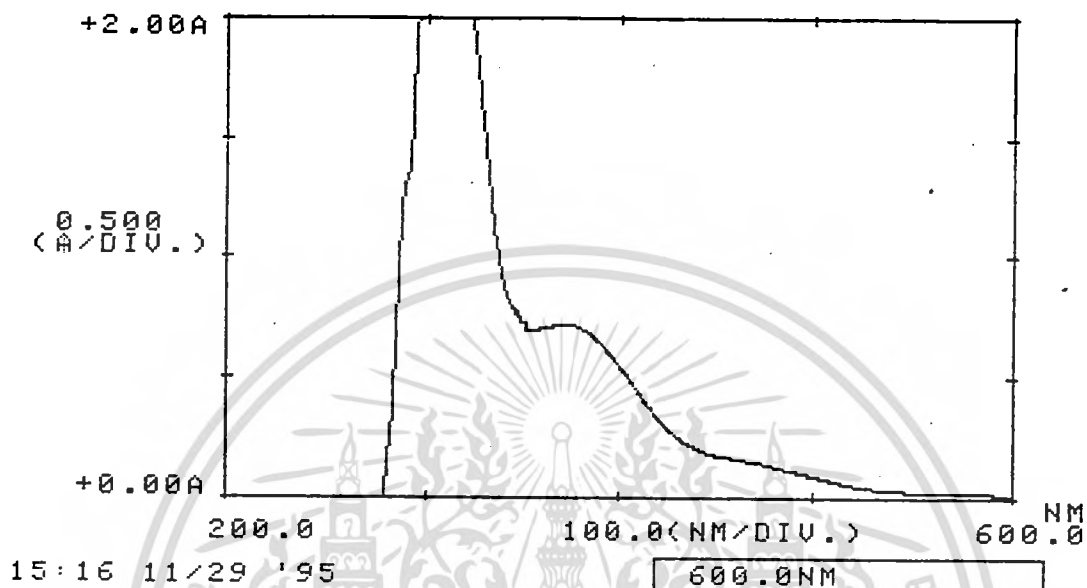


กราฟที่ 4-72 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ  $\text{PIH}+\text{Fe(II)}$  ที่  $\text{pH } 5.2$

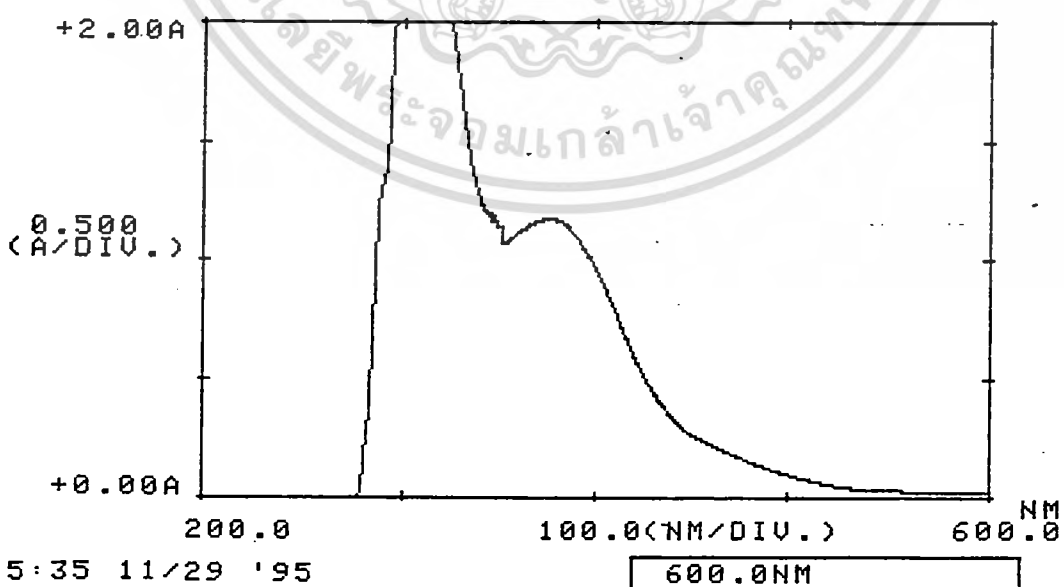


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-73 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Fe(II) ที่ pH 8.9

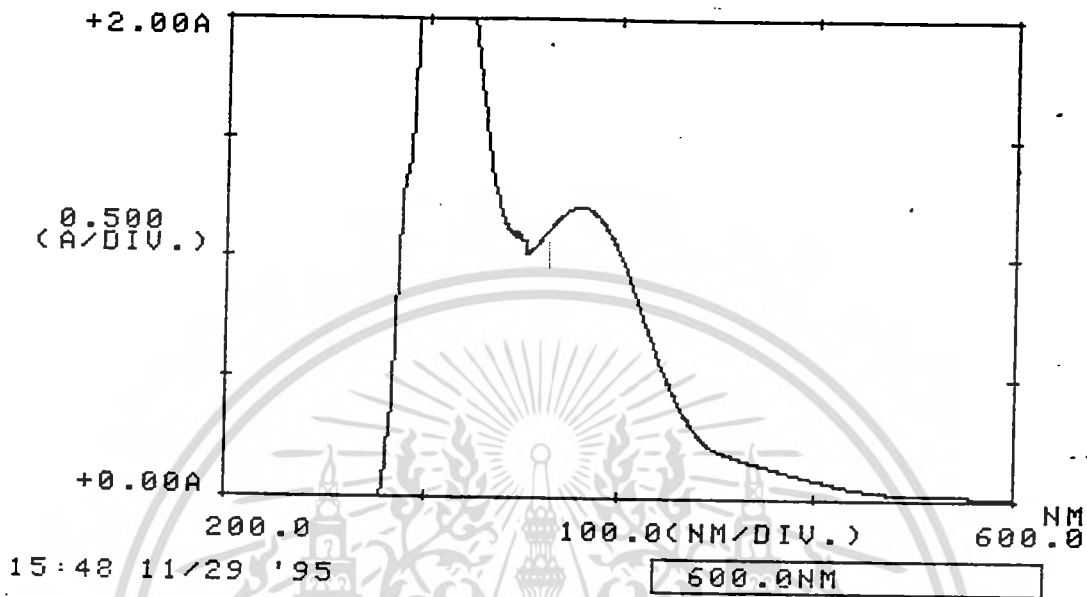


กราฟที่ 4-74 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Fe(II) ที่ pH 10

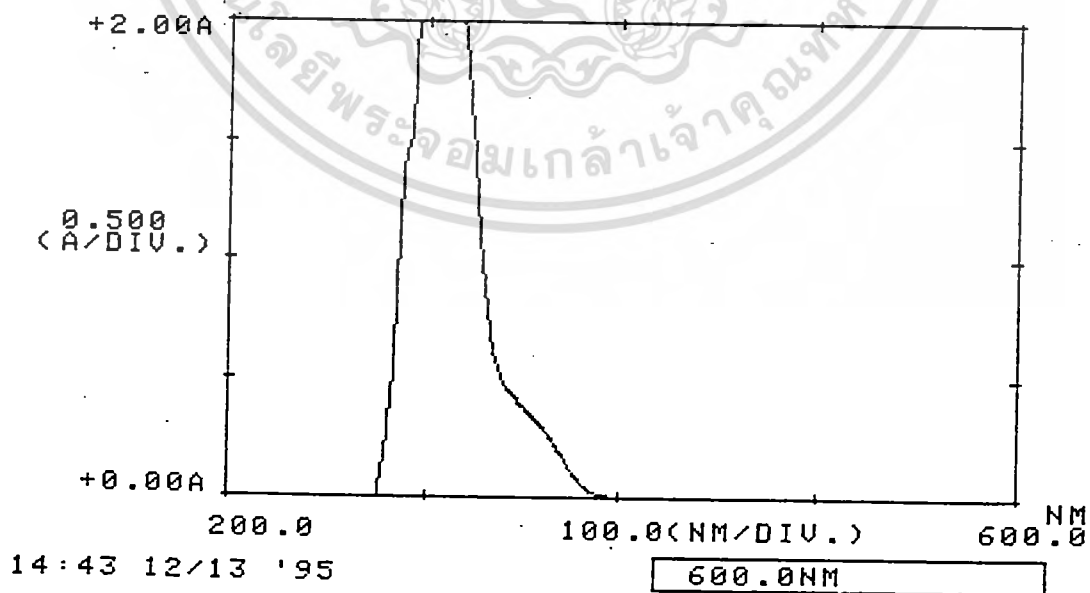


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-75 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Fe(II) ที่ pH 11

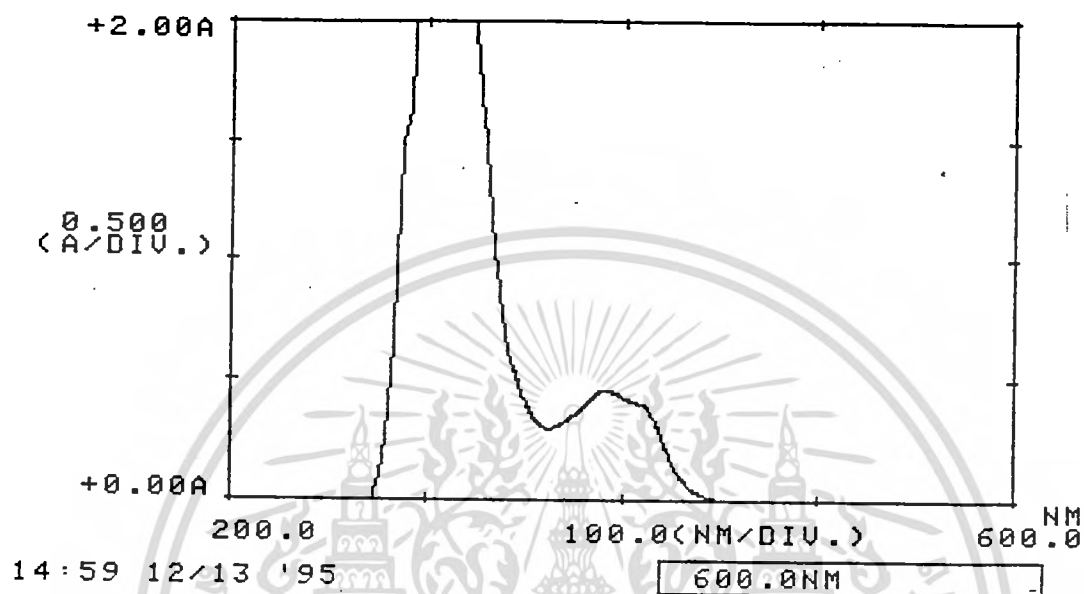


กราฟที่ 4-76 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Cd(II) ที่ pH 2

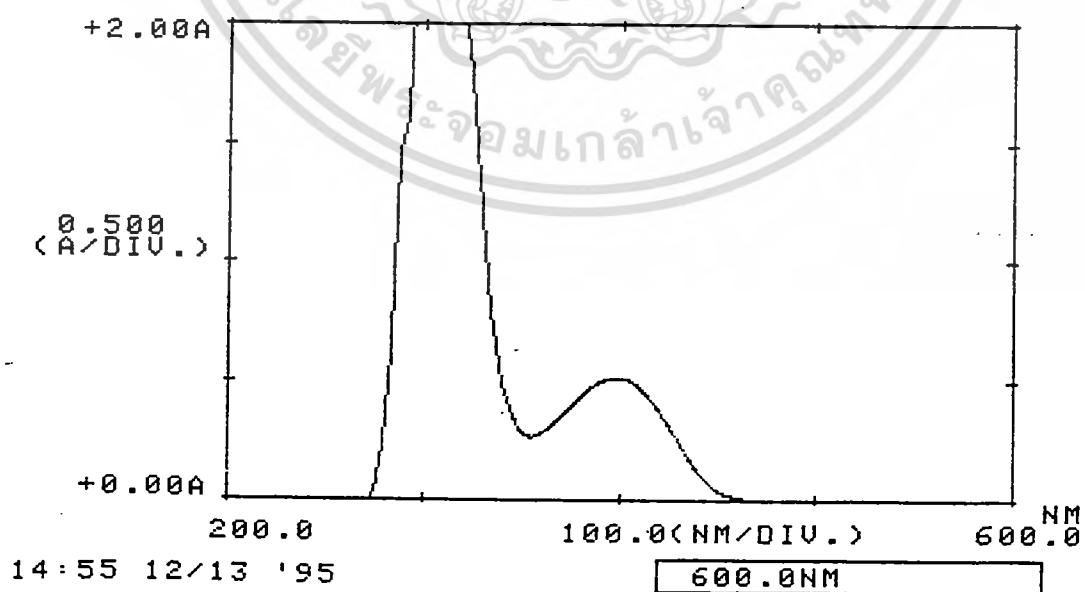


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-77 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Ca(II) ที่ pH 5.0

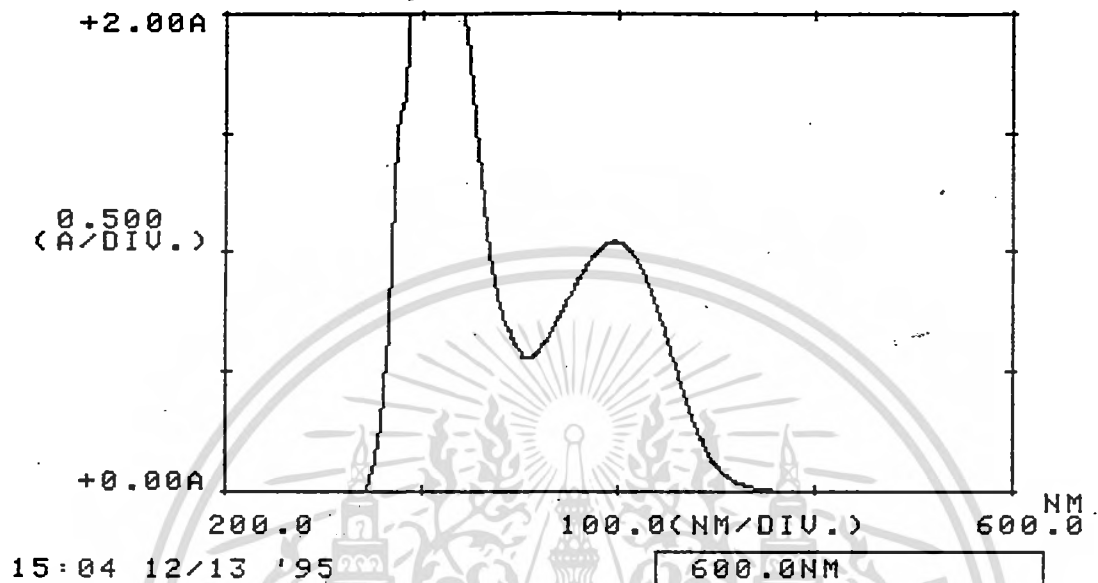


กราฟที่ 4-78 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Ca(II) ที่ pH 8.34

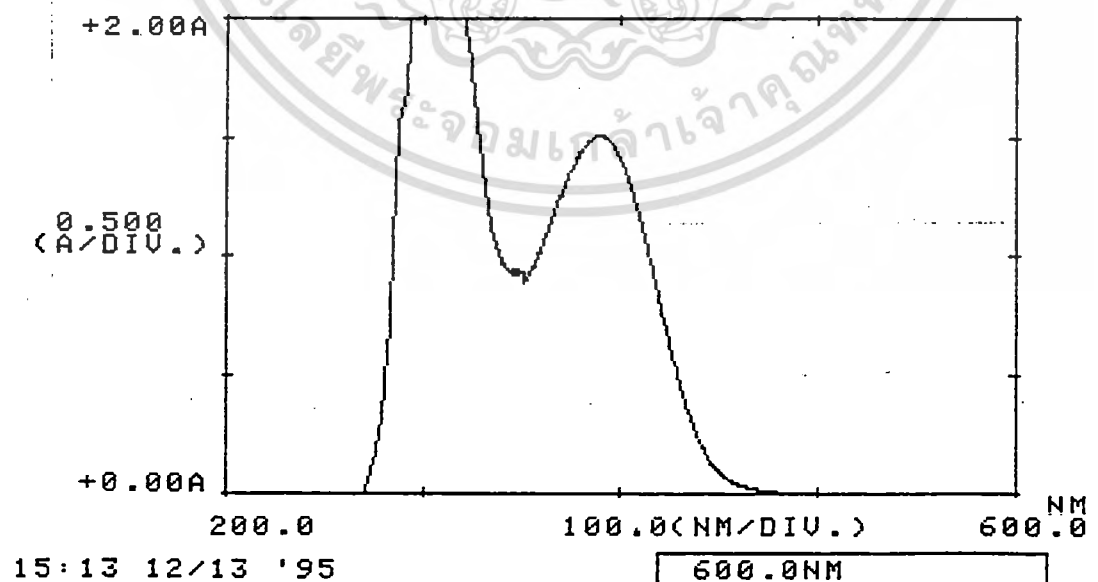


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-79 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Cd(II) ที่ pH 9.92

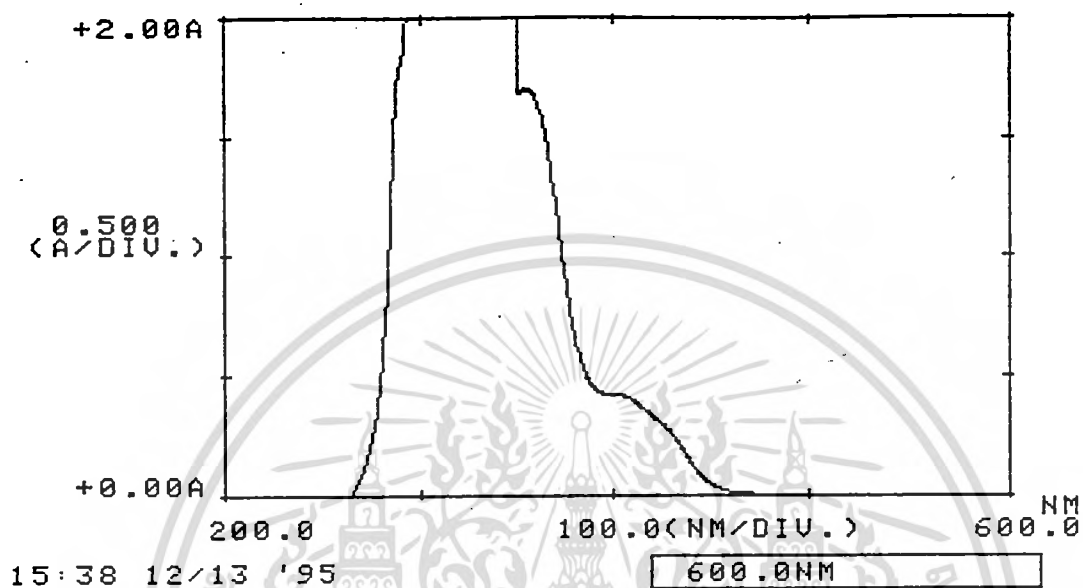


กราฟที่ 4-80 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Cd(II) ที่ pH 11.35

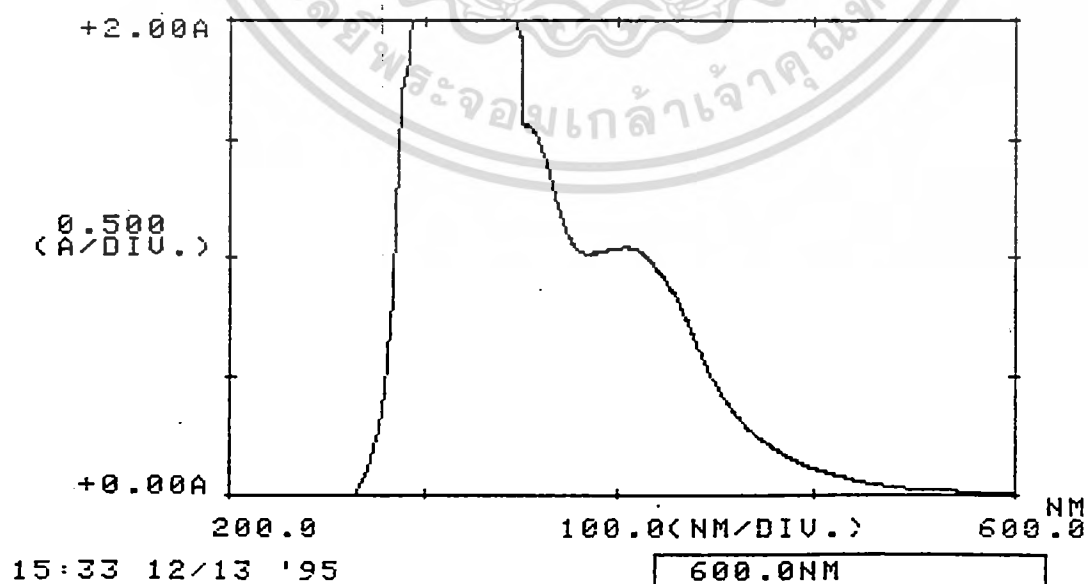


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-81 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Ni(II) ที่ pH 1.99

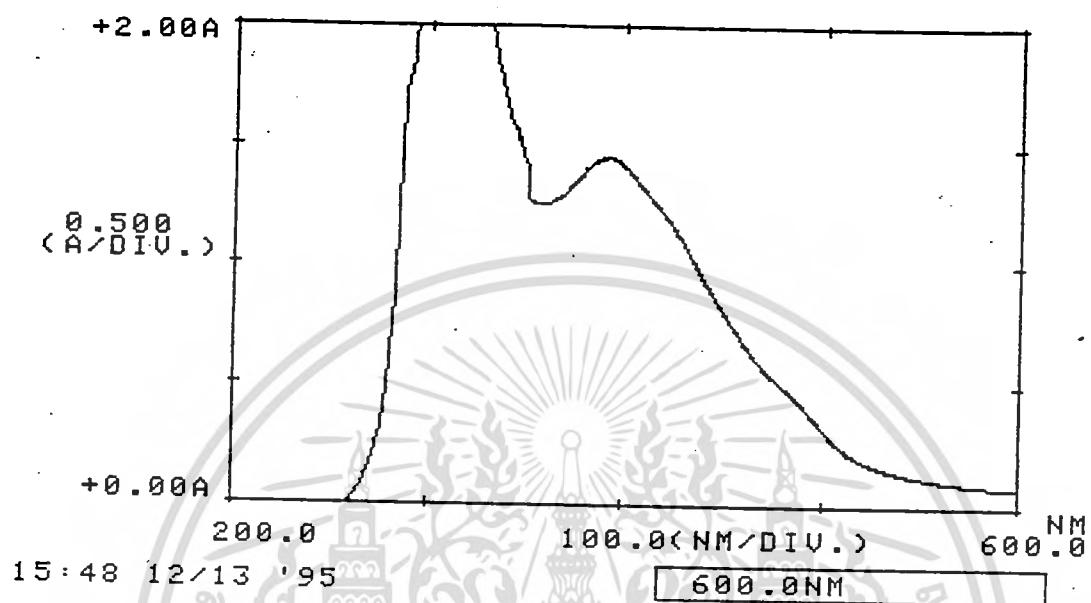


กราฟที่ 4-82 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Ni(II) ที่ pH 3.51

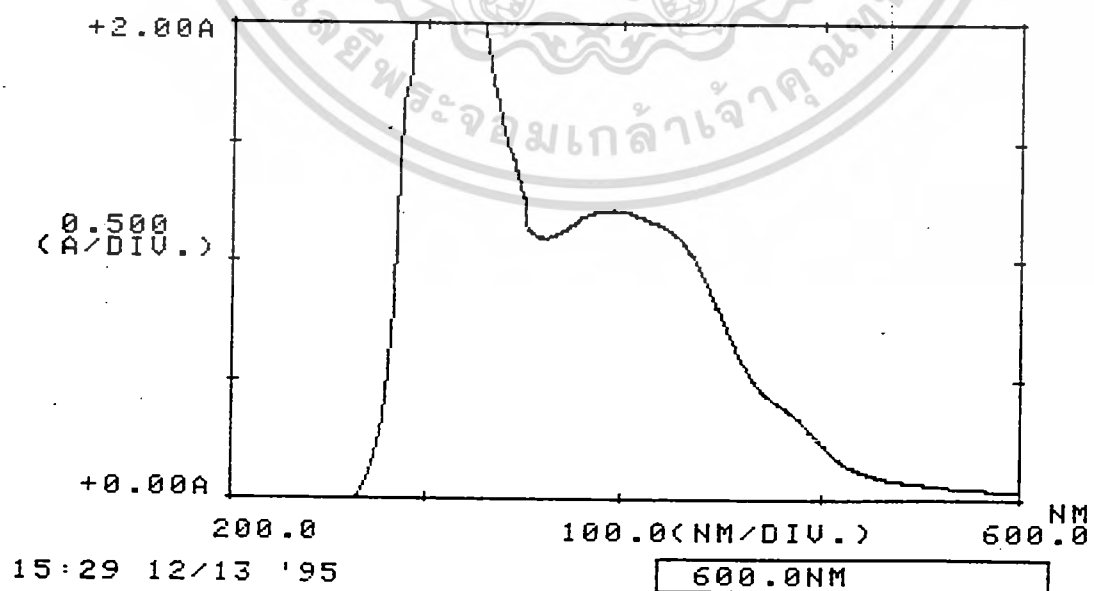


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-83 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Ni(II) ที่ pH 6.27

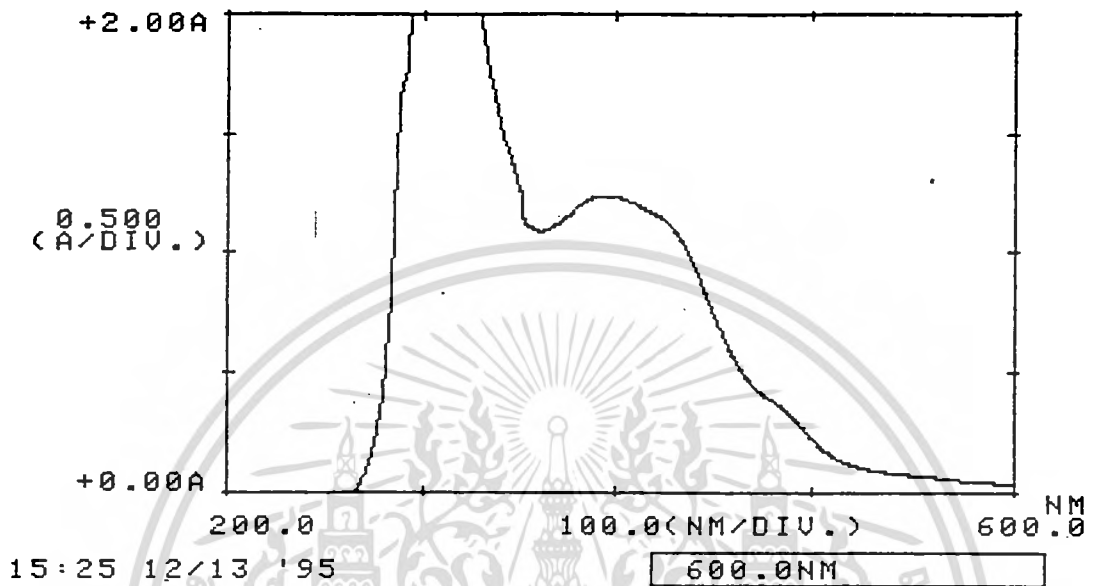


กราฟที่ 4-84 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Ni(II) ที่ pH 8.02

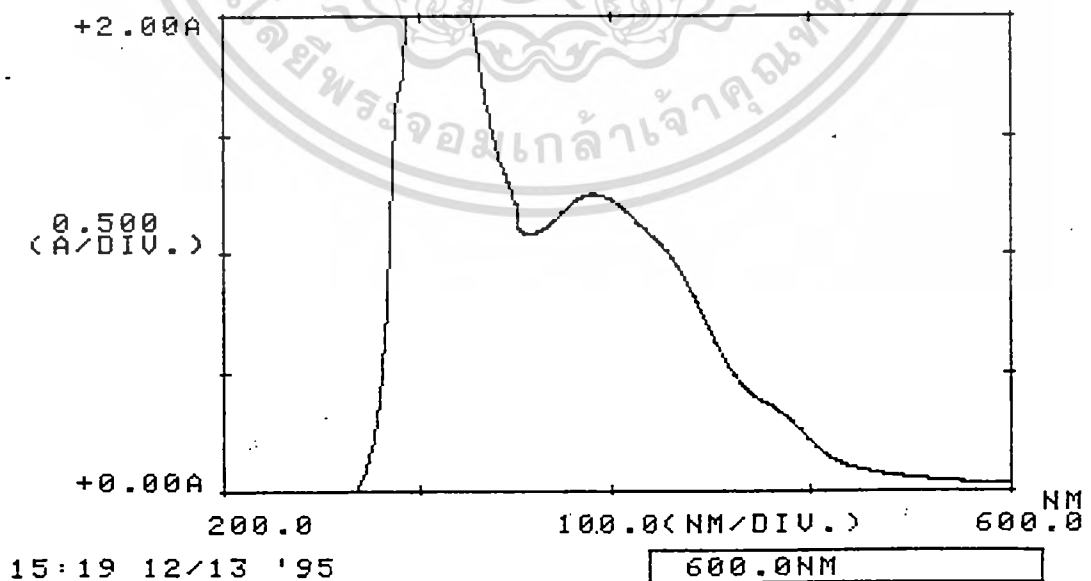


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-85 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Ni(II) ที่ pH 10.2

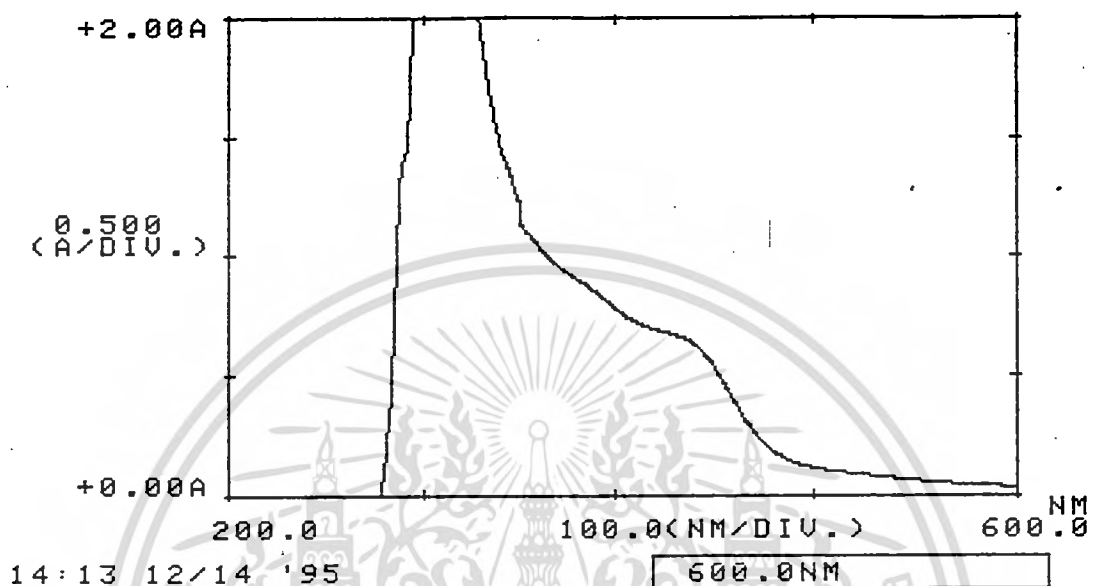


กราฟที่ 4-86 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Ni(II) ที่ pH 11.75

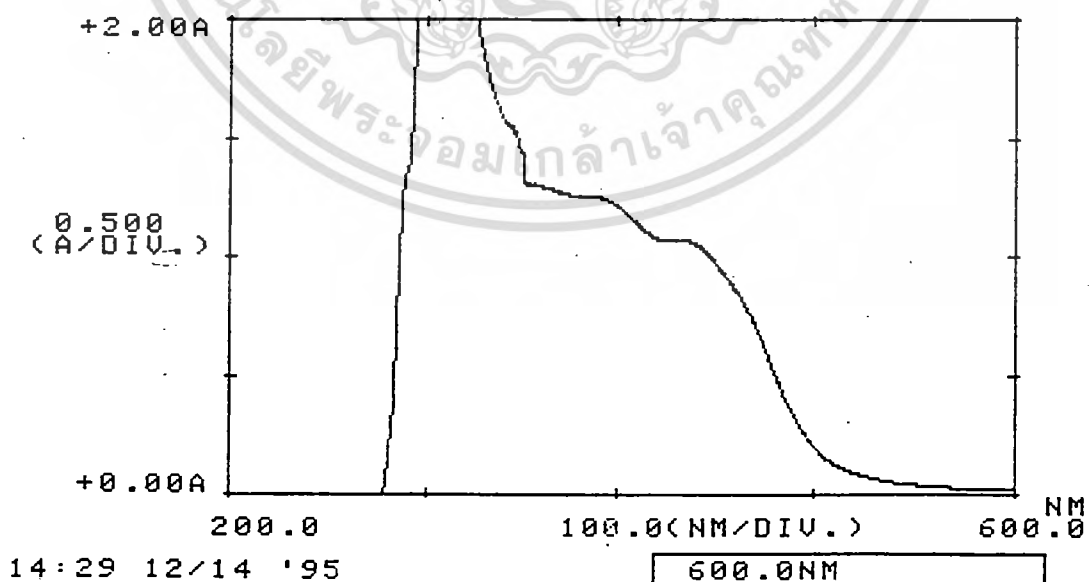


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-87 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Co(II) ที่ pH 1.74

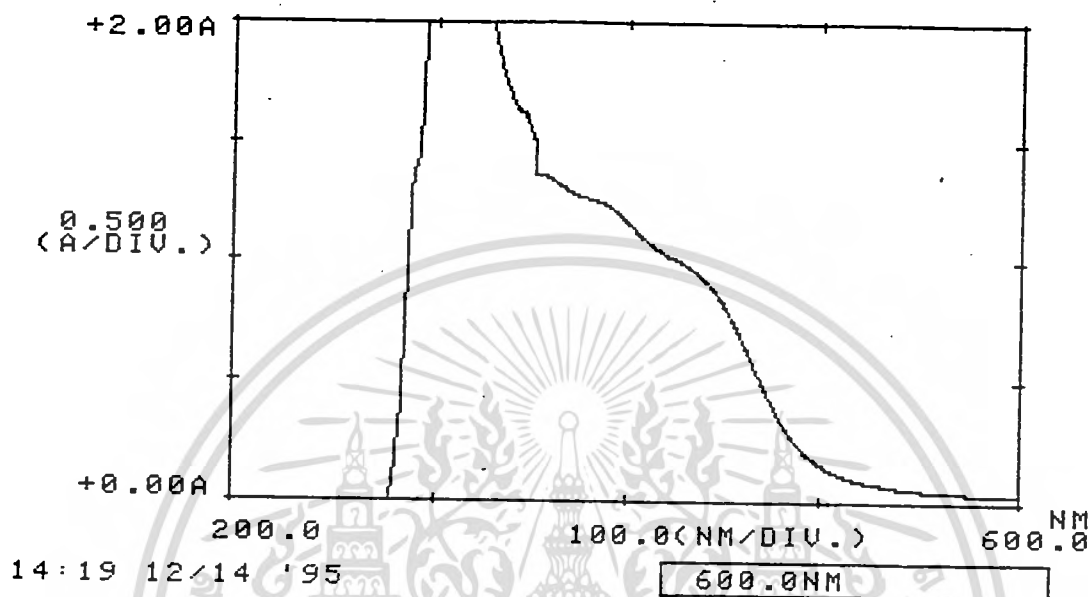


กราฟที่ 4-88 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Co(II) ที่ pH 1.96

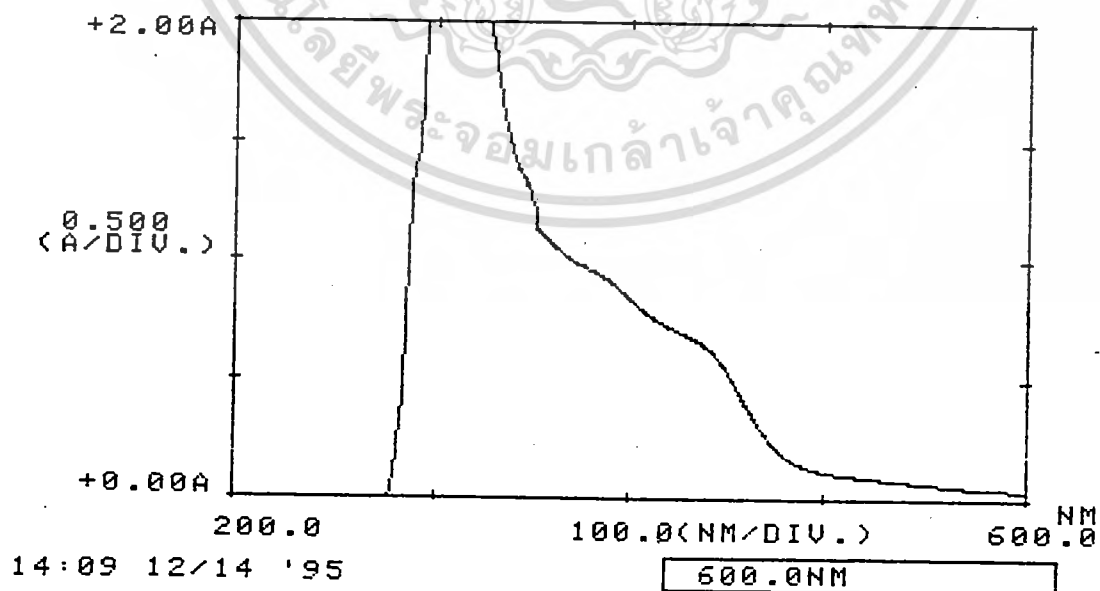


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-89 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Co(II) ที่ pH 4.11

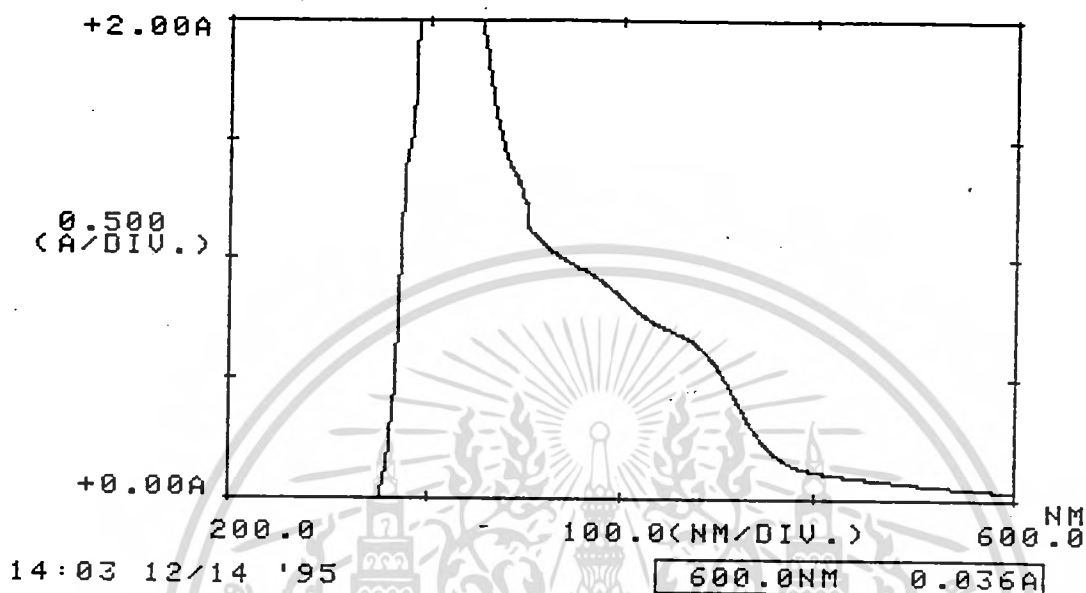


กราฟที่ 4-90 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Co(II) ที่ pH 10.01

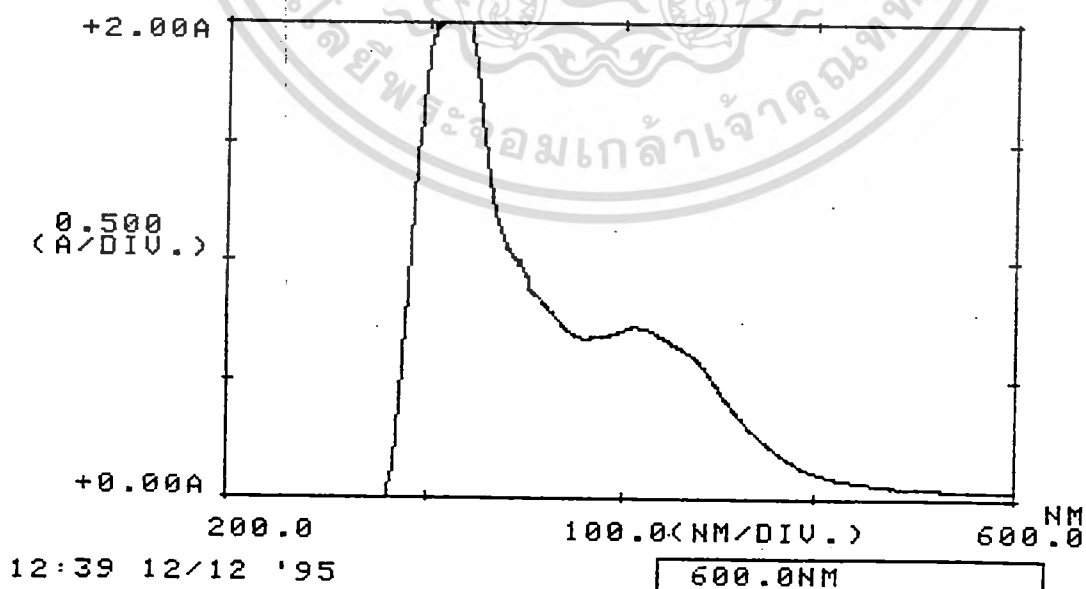


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-91 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ  $\text{PIH}+\text{Co(II)}$  ที่  $\text{pH } 11.96$

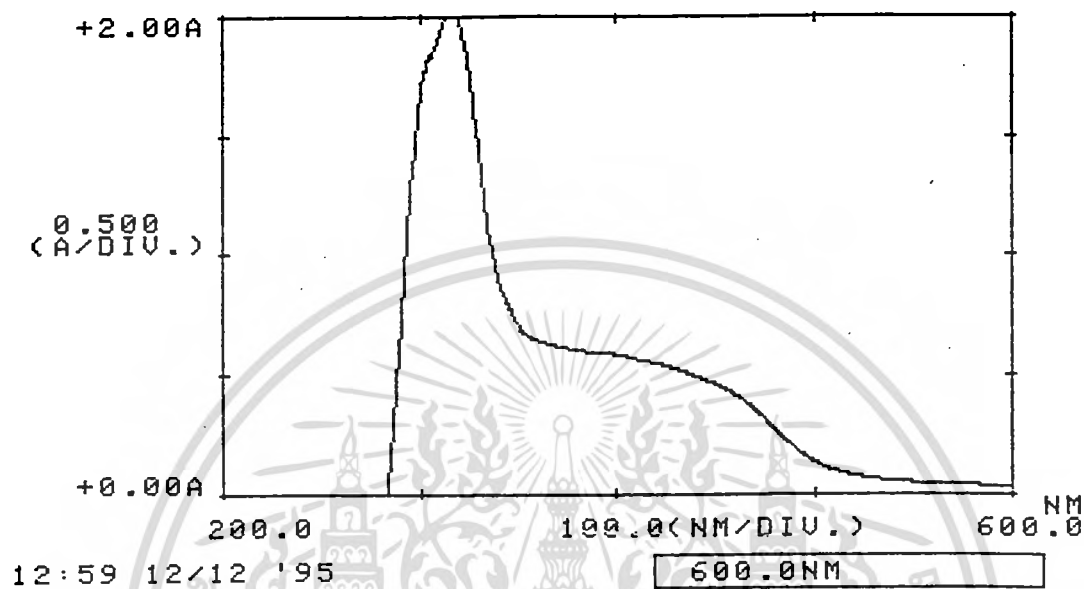


กราฟที่ 4-92 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ  $\text{PIH}+\text{Cu(II)}$  ที่  $\text{pH } 3$

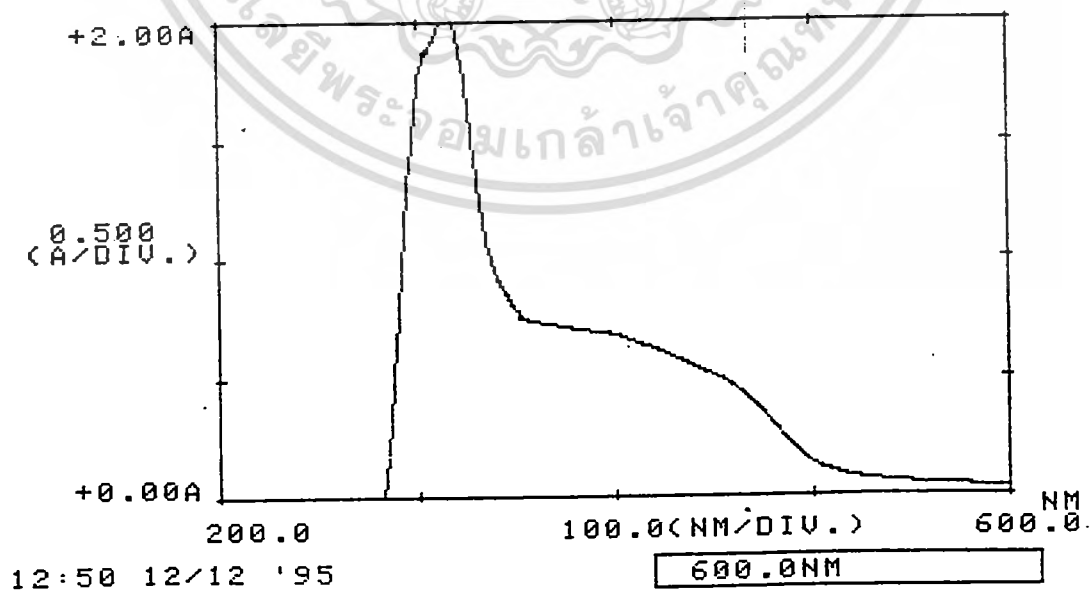


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-93 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Cu(II) ที่ pH 6.6

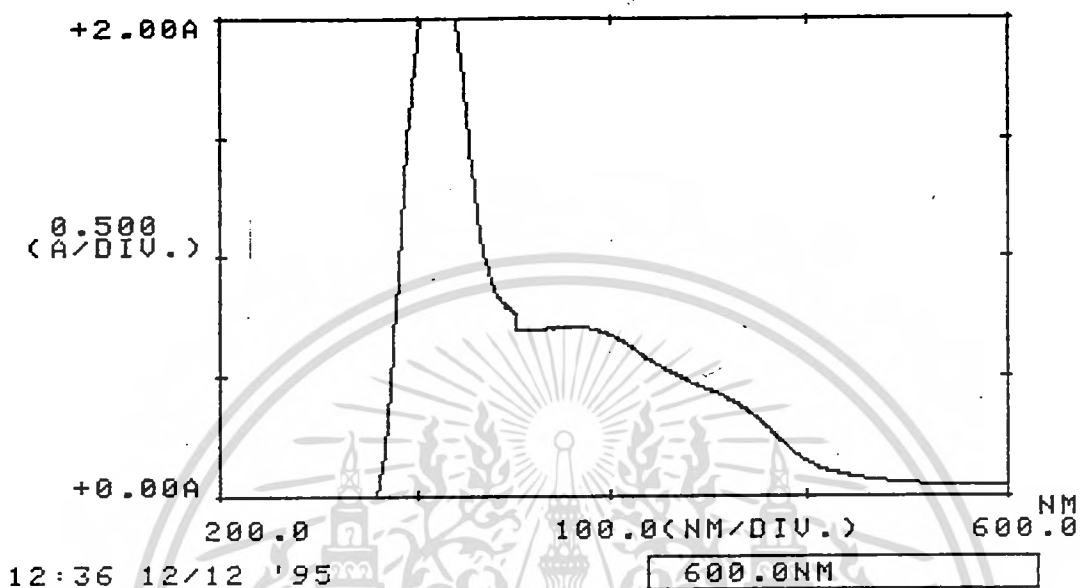


กราฟที่ 4-94 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Cu(II) ที่ pH 10

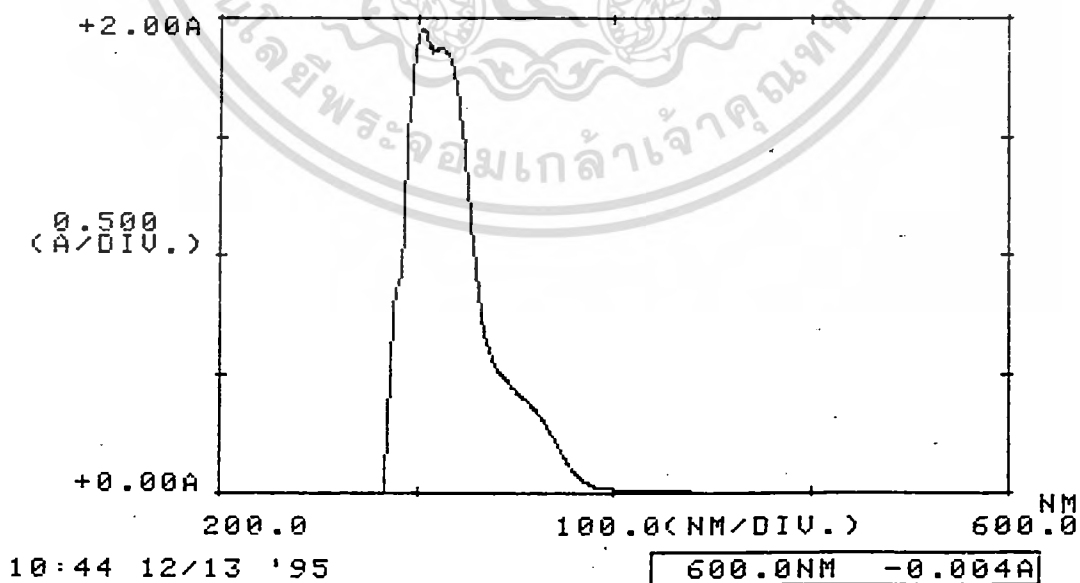


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-95 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Cu(II) ที่ pH 11.8

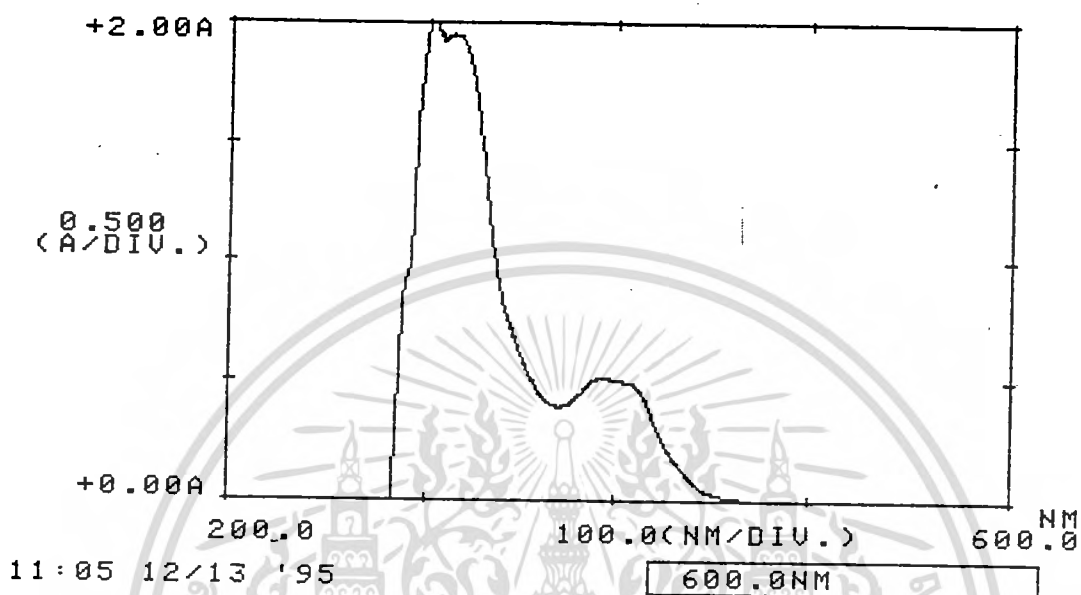


กราฟที่ 4-96 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Zn(II) ที่ pH 1.97

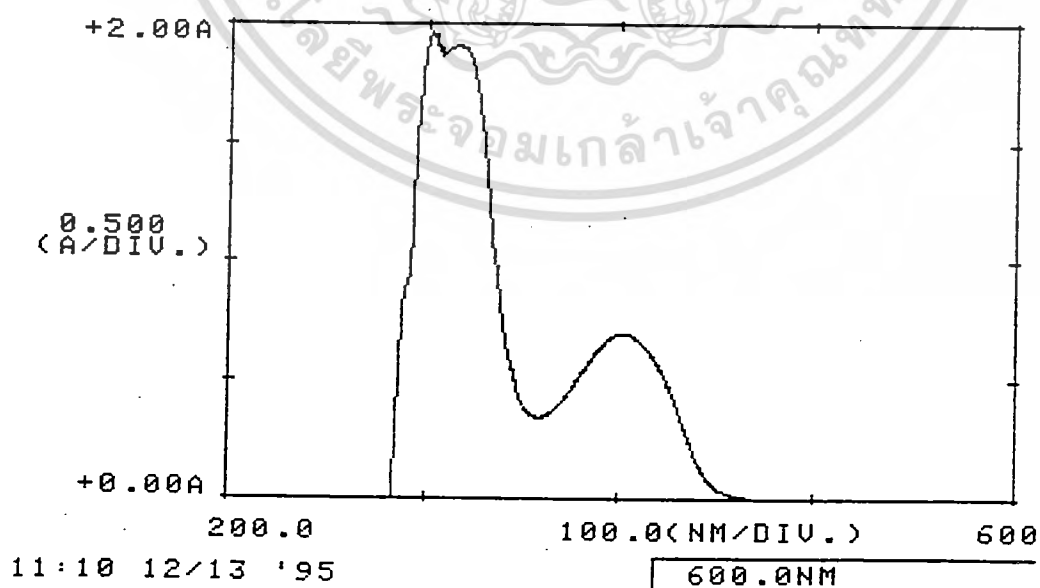


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-97 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Zn(II) ที่ pH 4.6

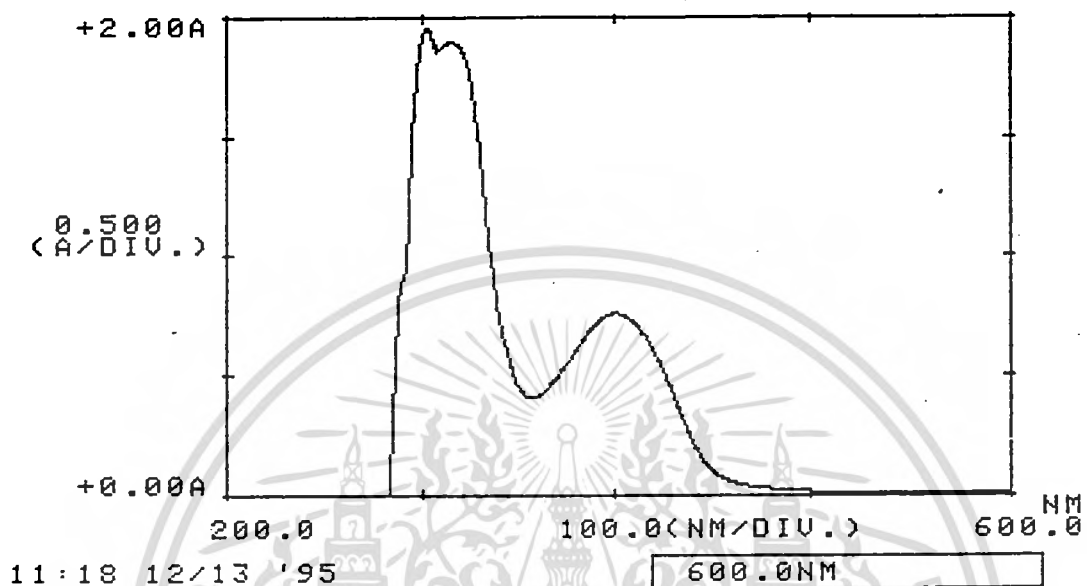


กราฟที่ 4-98 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Zn(II) ที่ pH 7.37

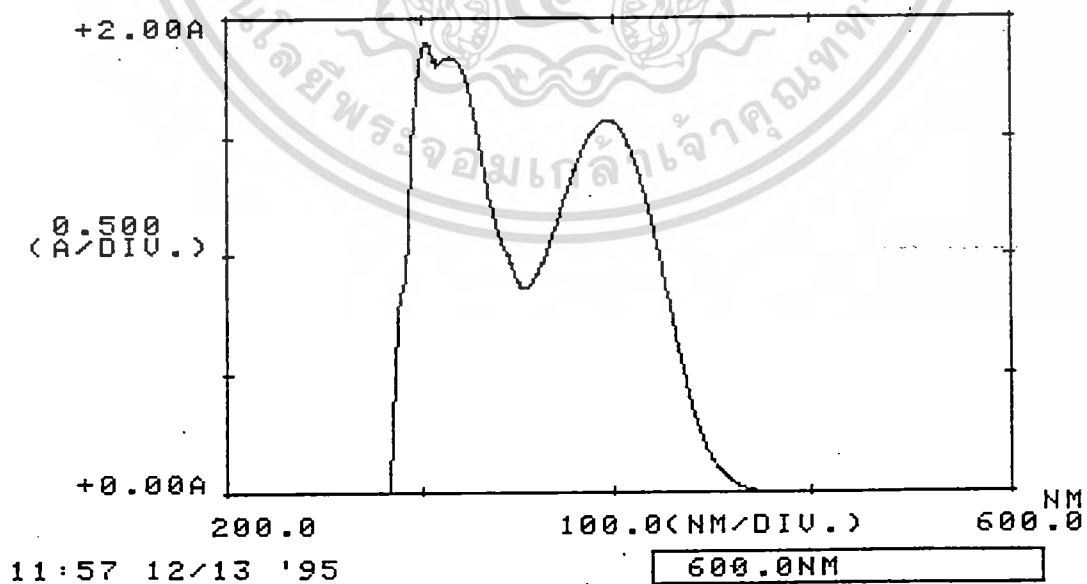


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-99 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Zn(II) ที่ pH 8.23

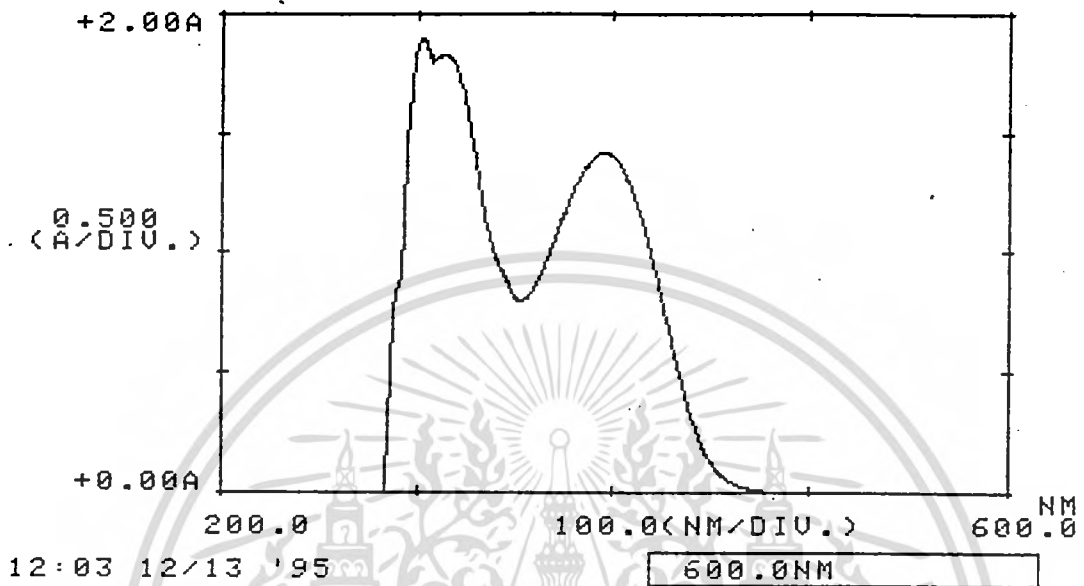


กราฟที่ 4-100 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Zn(II) ที่ pH 11.07

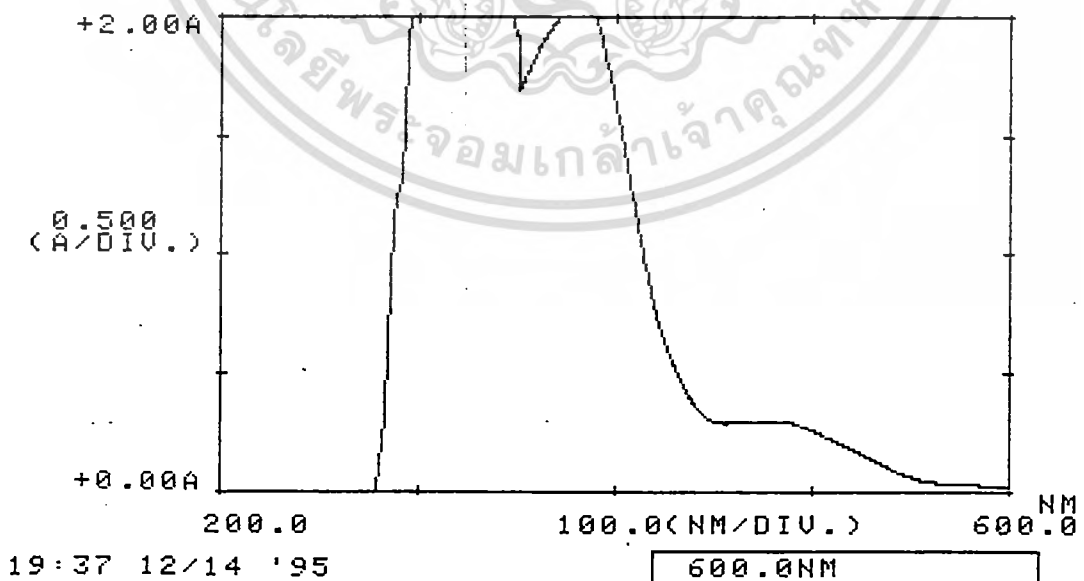


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-101 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Zn(II) ที่ pH 11.17

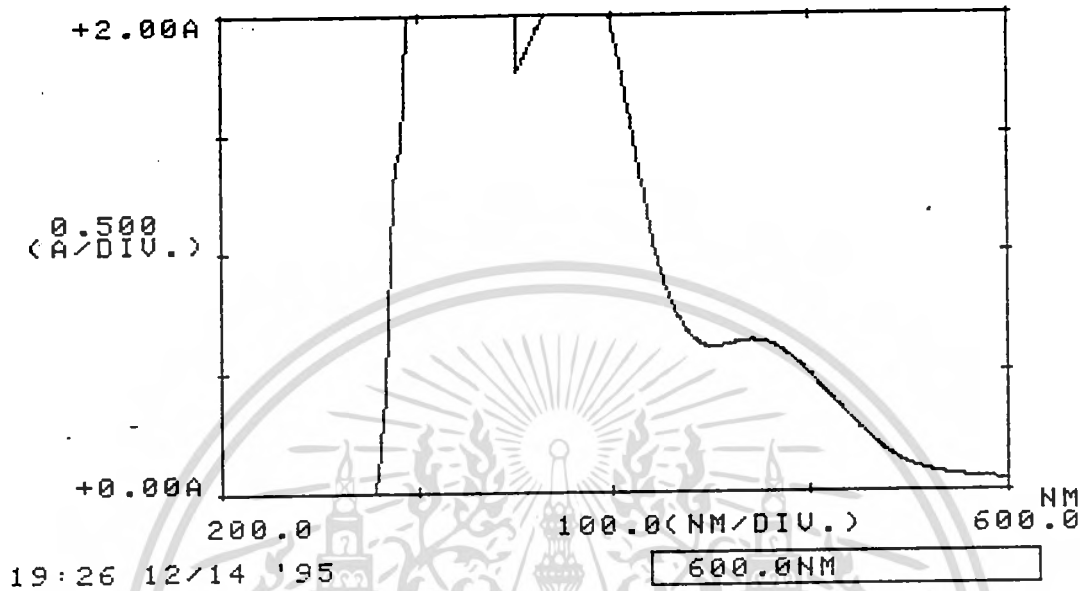


กราฟที่ 4-102 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ PIH+Fe(III) ที่ pH 1.99

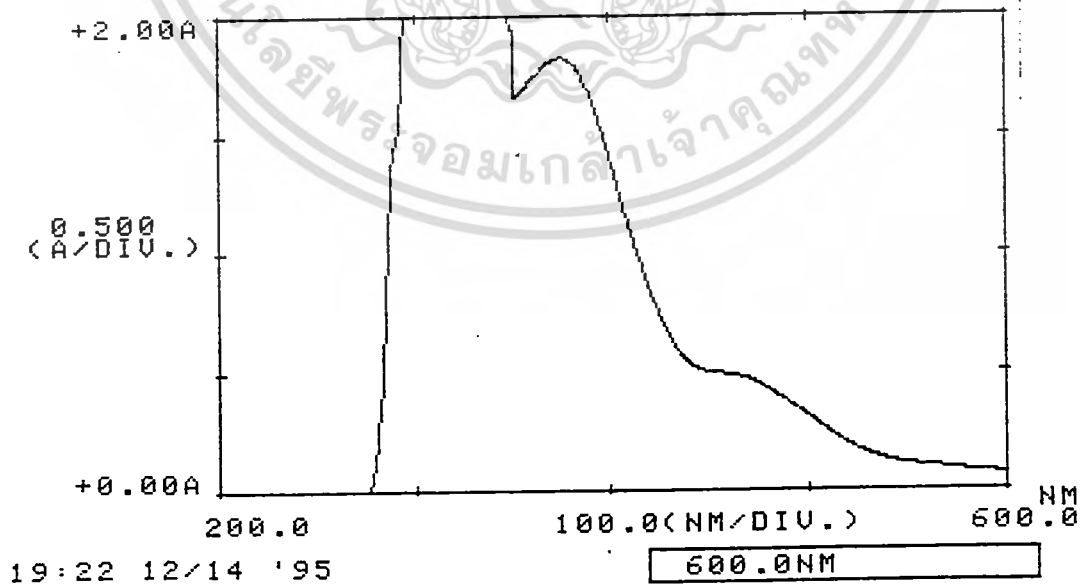


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-103 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ  $\text{PIH}+\text{Fe(III)}$  ที่  $\text{pH } 4.5$

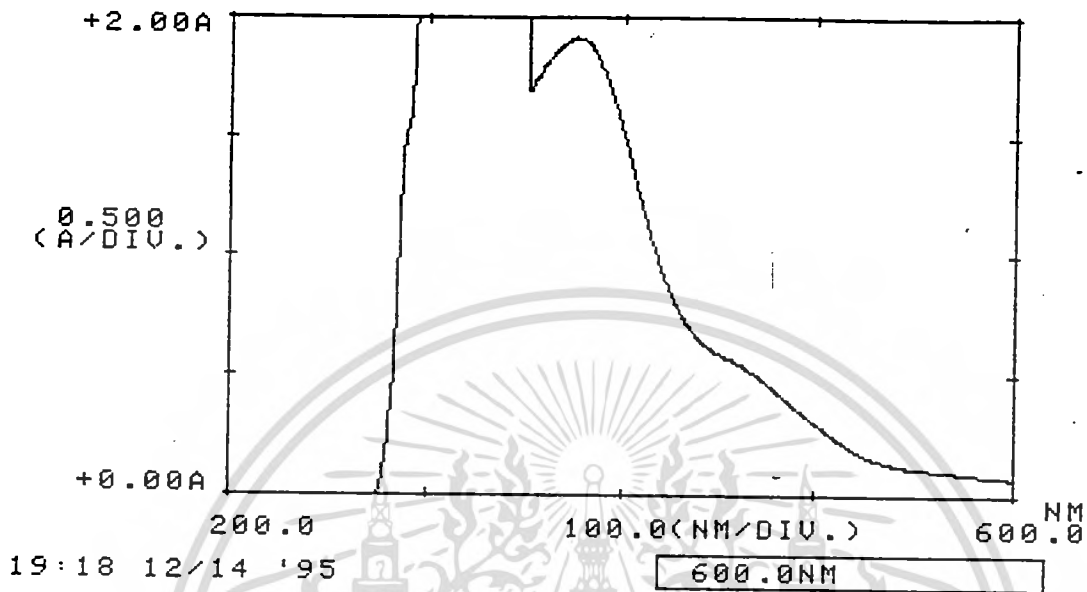


กราฟที่ 4-104 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ  $\text{PIH}+\text{Fe(III)}$  ที่  $\text{pH } 8$

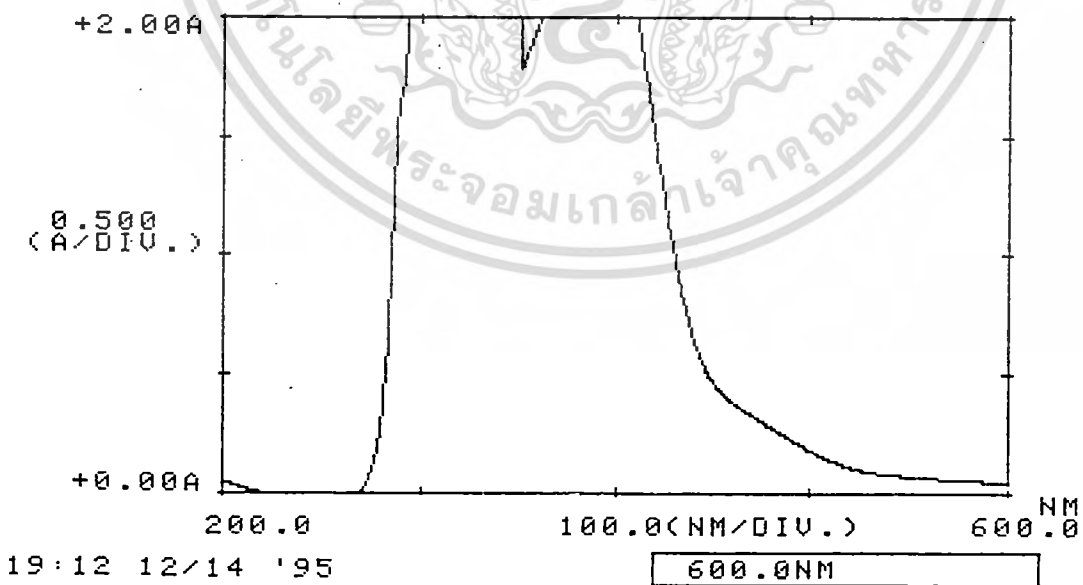


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟที่ 4-105 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ  $\text{PIH}+\text{Fe(III)}$  ที่  $\text{pH } 10$

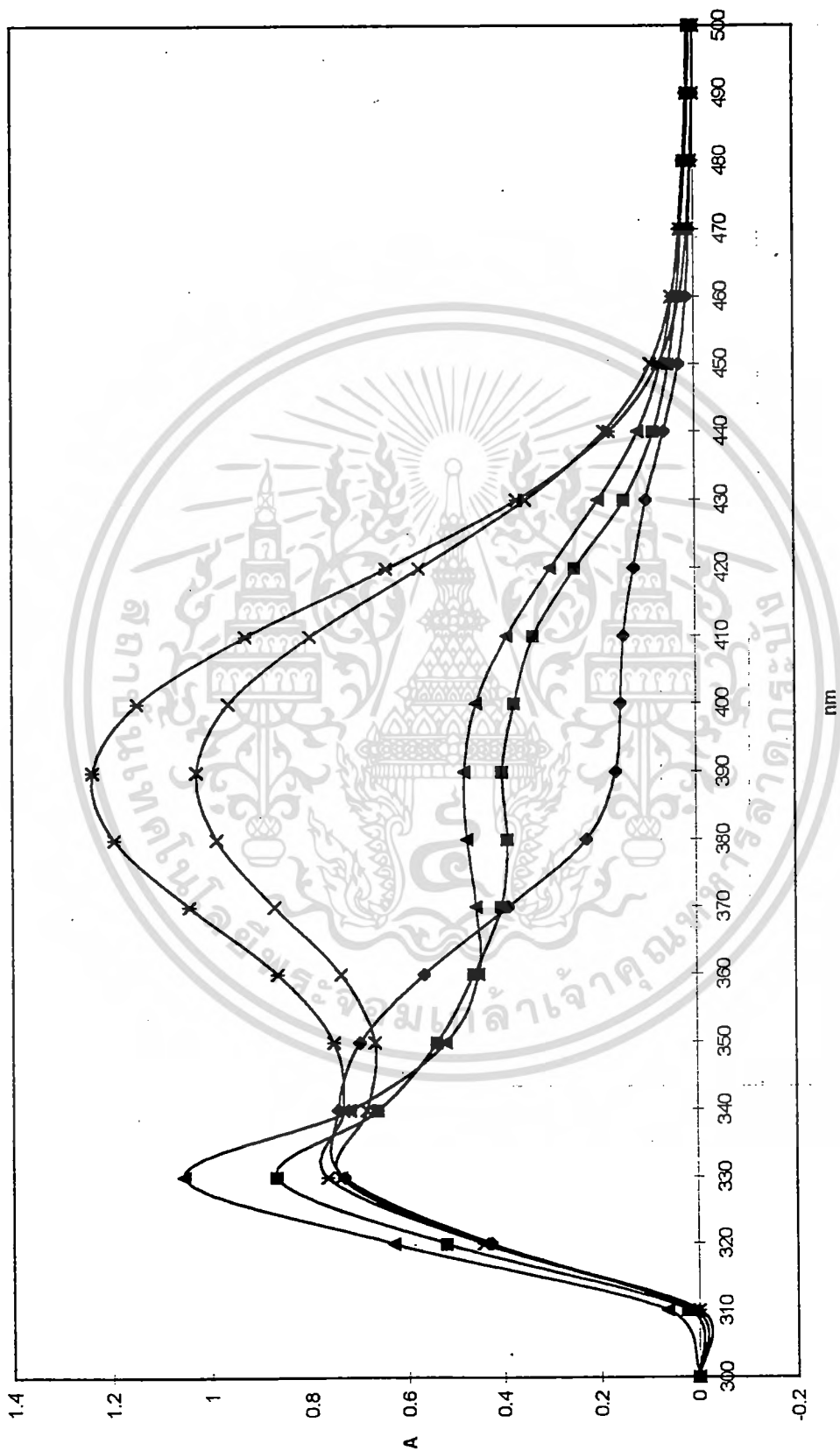


กราฟที่ 4-106 แสดงข้อมูลที่ได้จากการวัดการดูดกลืนแสงของ  $\text{PIH}+\text{Fe(III)}$  ที่  $\text{pH } 11.78$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

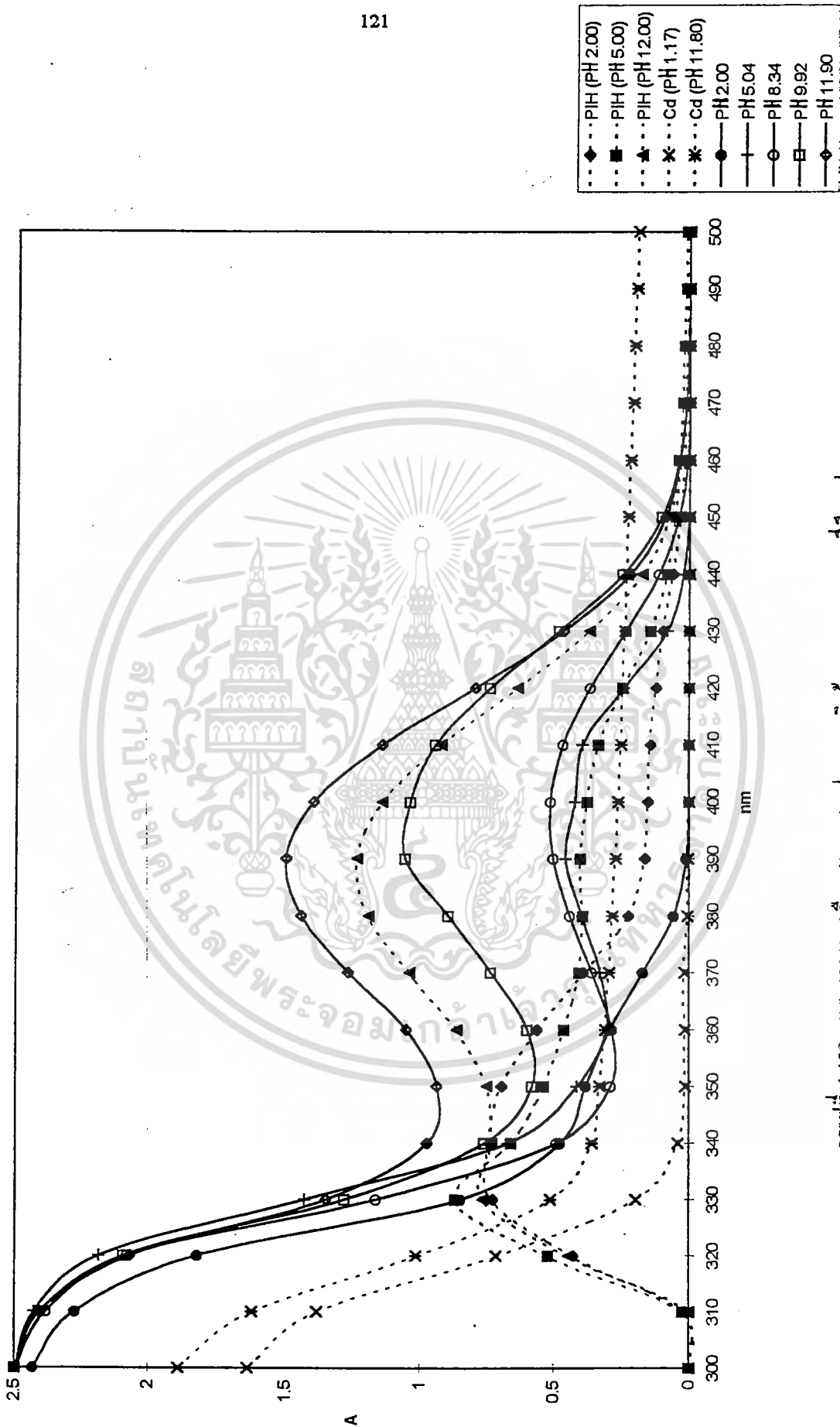
PIH



ภาพที่ 4-107 แสดงการดูดกลืนแสงของ PIH ที่ pH ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

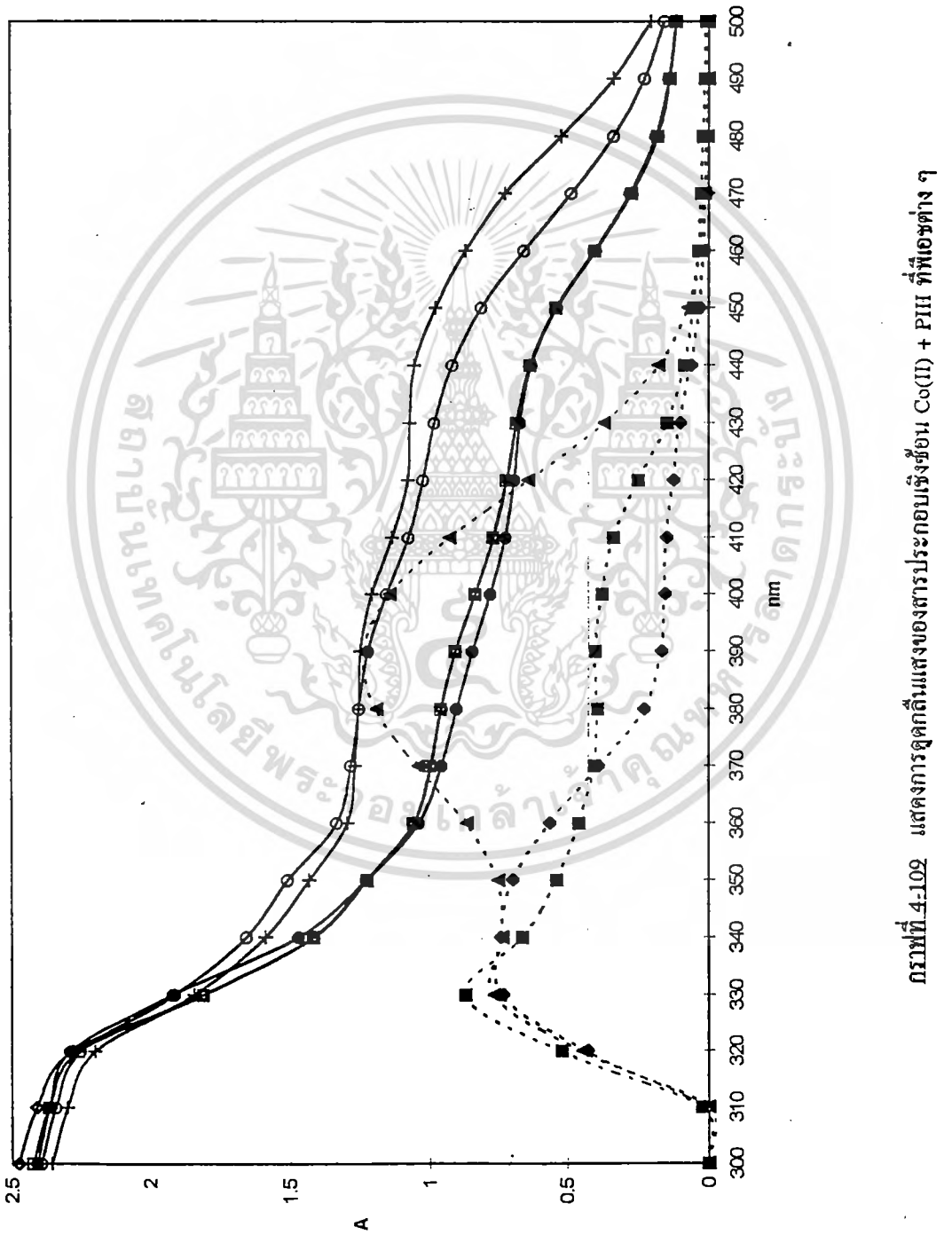
Cd(II)/PIH



ภาพที่ 4-108 แสดงการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Cd(II) + PIH ที่พีเอชต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

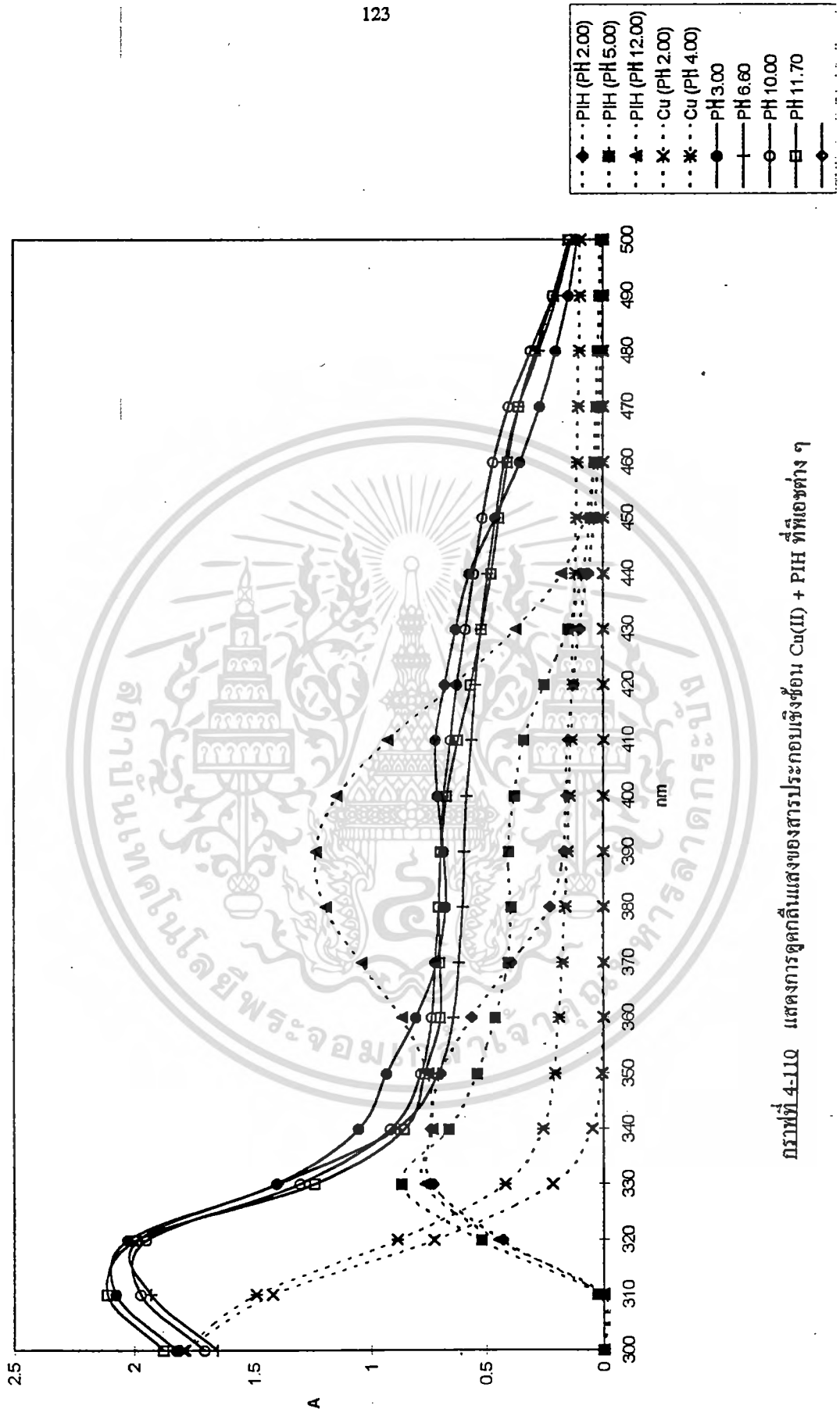
Co(II)/PIH



ภาพที่ 4-102 แสดงการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Co(II) + PIH ที่พีเอชต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

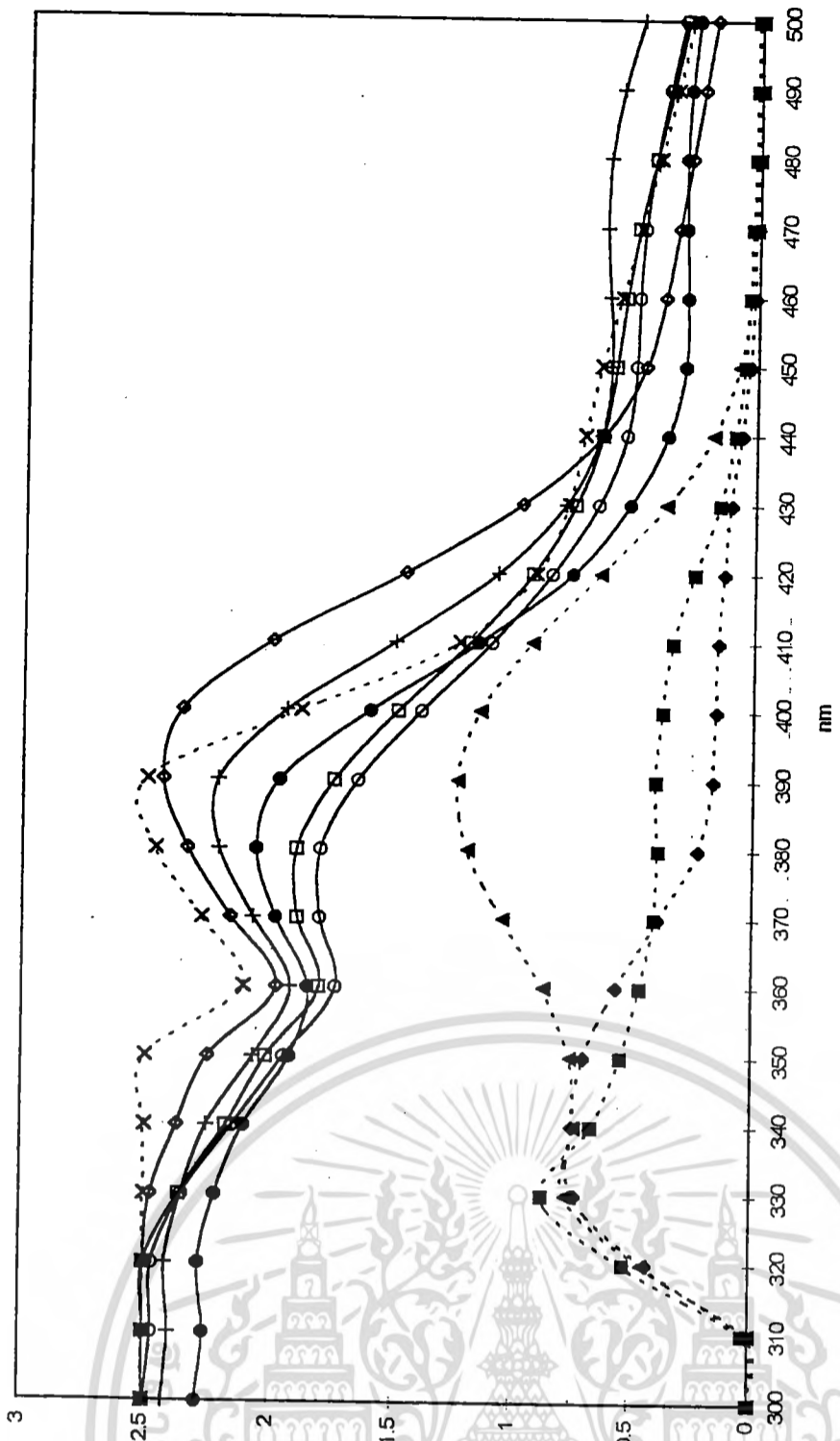
Cu(II)PIH



กราฟที่ 4-110 แสดงการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Cu(II) + PIH ที่ pH ต่าง ๆ

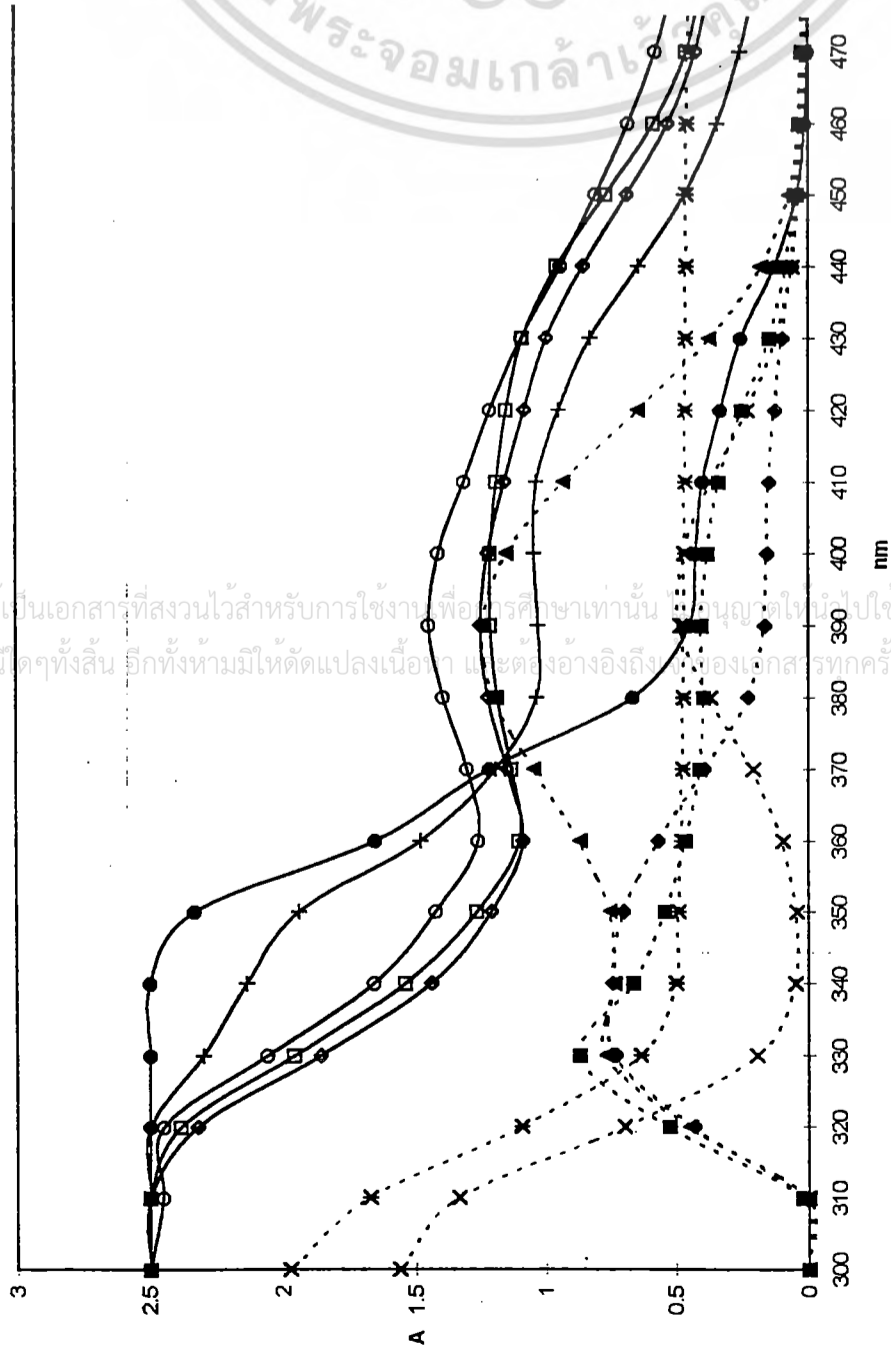
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Fe(III)PIH



ภาพที่ 4-112 แสดงการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Fe(III) + PIH ที่พีเอชต่าง ๆ

Ni(II)PIH



ภาพที่ 4-113 แสดงการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อน Ni(II) + PIH ที่พีเอชต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

1. กานต์ วัชรกิติพงศ์, ชีรวิฑูรย์ เชี่ยวธีรกุล “ การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของ 1-[N-เมทิลไพริดอกซิลิโคนิเมียม]-2-[2-N-เมทิลไพริโคนิเมียม] ไฮดรอกซิดกับไอออนของโลหะทรานสิชัน” วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี , ภาควิชาเคมี , สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง , ปีการศึกษา 2536.
2. ธวัชพันธ์ เกษสุรินทร์ชัย, อมร พรหมเกษสกุล “ การศึกษาค่าคงที่ทางอุณหพลศาสตร์สำหรับไอออนในเชนซ์ของไพริดอกซัลไอโซนิโคโคโรนอลไฮดรอกไซด์” วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี, ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปีการศึกษา 2536.
3. กิติกร ปัญญาเทียม, ศศิธร เอี่ยมธนะมาศ “ สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะยูเรเนียม และไพริดอกซัลไอโซนิโคโคโรนอลไฮดรอกไซด์” วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี, ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ปีการศึกษา 2537.
4. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล, ผศ. เอมี่วิเคราะห์ 1. , พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536.
5. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล, ผศ. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 1. , พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2536.
6. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล, ผศ. คณิศา ตั้งคณานุกรณ์. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์ 2. , กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537.
7. Vogel, I. *Quantitative Inorganic Analysis* . , Longman Group Limited , London , 1961.
8. Bassett, J. , Danney, R. , Jeffery, G.H. and Mendham, J. *Vogel's Textbook of Quantitative Chemical Analysis* . , Longman Scientific & Technical, London , 1989.
9. Christensen, H.N. *J. Amer. Chem. Soc.* , 1957, 79, 4073.
10. Matsushima, Y.; and Martell, A.E. *J. Amer. Chem. Soc.* , 1967, 89, 1322, 1331.
11. Matsushima, Y. *Chem. Pharm. Bull.*, 1968, 16, 2046.
12. Harris, D.C.; and Aisen, P. *Biochim. Biophys. Acta.*, 1973, 329, 156.
13. Hussain, M.A.M.; Flynn, D.M.; Green, N.; Hussein, S.; and Hoffbrand, A.V. *Lancet*, ii, 1976, 1278.
14. Propper, R.D.; Cooper, B.; Ruffo, R.R.; et al., *N. Engl. J. Med.* 1977, 297, 418.
15. Metzler, C.A.; Cahill, A.; and Metzler, D.E. *J. Am. Chem. Soc.*, 1980, 102, 6075.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. Hershko, C.; Avramovici-Grisaru, S.; Link, G.; Gelfand, L.; and Sarel, S. *J. Lab. Clin. Med.* ; 1981, 98, 99.
17. Johnson, D.K.; Murphy, T.B.; Rose, N.J.; Goodwin, W.H.; and Pickart, L. *Inorg. Chim. Acta.*, 1982, 67, 159.
18. Johnson, D.K.; Pipard, M.J.; Murphy, T.B.; and Rose, N.J. *J. Pharm. Exp. Ther.*, 1982, 221, 399.
19. Avramovici-Grisaru, S.; Sarel, S.; Link, G.; and Hershko, C. *J. Med. Chem.*, 1983, 26, 298.
20. Aruffo, A.A.; Murphy, T.B.; Johnson, D.K.; Rose, N.J.; and Schwmecker, V. *Acta Cryst. Sect. C.*, 1984, 40, 1164.
21. Yayon, A.; Cabanchik, Z.I.; and Ginsburg, H. *Embo J.*, 1984, 3, 2695.
22. Avramovici-Grisaru, S.; Cohen, S.; Sarel, S.; and Bauminger, R.E. *Israel J. Chem.*, 1985, 25, 288.
23. Gans, P.; Sabatini, A.; and Vacca, A. *J. Chem. Soc., Dalton Trans.*, 1985, 1195.
24. Krogstad, D.J.; Schlesinger, P.H.; and Gluzman, I.Y. *J. Cell Biol.*, 1985, 101, 2302.
25. Yayon, A.; Cabanchik, Z.I.; and Ginsburg, H. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 1985, 82, 2784.
26. Sarel, S.; Avramovici-Grisaru, S.; and Cohen, S. *J. Chem. Soc. Chem. Comm.*, 1986, 47.
27. Ibanez, J.G.; Gonzales, I.; and Gardena, M.A. *J. Chem. Educ.*, 1988, 65, 173.
28. Ponka, P.; Richardson, D.R.; Baker, E.; Schulman, H.M.; and Edward, J.T. *Bioch. Biophys. Acta.* 1988, 967, 122.
29. Richardson, D.R.; Baker, E.; Ponka, P.; Wilairat, P.; Vitolo, M.L.; and Webb, J. *Birth Defects Orig. Artic Ser.* 1988, 23, 81.
30. Hancock, R.D.; and Martel, A.E. *Chem. Rev.*, 1989, 89, 1875.
31. Part 1. Avramovici-Grisaru, S.; Cohen, S.; and Sarel, S. *Heterocycles*, 1990, 30, 1079.
32. Part 2. Avramovici-Grisaru, S.; Cohen, S.; and Sarel, S., *J. Org. Chem.*, 1990, 55, 5236.
33. Dubois, J.E.; Fakhrayan, H.; Doucet, J.P.; and Hage Chahine, J.M. *Inorg. Chem.*, 1990, 31, 853.

34. Hershko, C.; Link, G.; Pinson, A.; Avramovici-Grisaru, S.; Sarel, S.; Peter, H.H.; Hider, R.C.; and Grady, R.W. *Annals N.Y. Academy Sciences* ; 1990, 612 , 351.
35. Iheanacho, E.N.; Samuni, A.; Avramovici-Grisaru, S.; Sarel, S.; and Spira, D.T. *Trans. Roy. Soc Trop. Med. Hyg.* , 1990, 84, 213.
36. Richardson, D.R.; Vitolo, L.M. Wis; Hefter, G.T.; May, P.M.; Clare, B.W.; and Webb, J. *Inorg. Chim. Acta.* , 1990, 170, 165.
37. Ginsberg, H.; and Stein, W.D. *Biochem. Pharmac.* , 1991, 41, 1463.
38. Iheanacho, E.N.; Sarel, S.; Samuni, A.; Avramovici-Grisaru, S.; and Spira, D.T. *Free Rad. Res. Comms.* , 1991, 11, 307.
39. Iheanacho, E.N.; Sarel, S.; Samuni, A.; Avramovici-Grisaru, S.; and Spira, D.T. *Free Rad. Res. Comms.* , 1991, 15, 1.
40. Ginsberg, H.; and Krugliak, M. *Biochem. Pharmac.*, 1992, 43, 63.
41. Slater, A.F.G. *Pharmac. Ther.*, 1998, 57, 203.
42. Part 3. Doungdee, P.; Sarel, S.; Ringel, I.; Gibson, D.; Wongvisetsirikul, N.; and Avramovici-Grisaru, S. *Heterocycles*, 1995,40,No.1.
43. Part 4. Doungdee, P.; Sarel, S.; Wongvisetsirikul, N.; and Avramovici-Grisaru, S. *J. Chem.Soc. Perkin Trans.2* , 1995.