

## บทที่ 5

### ผลการจำลอง และวิเคราะห์ผลงานวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลองที่ได้จากการดำเนินงานวิจัย ประกอบด้วยผลการทดลอง กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน จากการทดลองด้วยคอลัมน์เรซิน (อาทร วุฒิสัตย์วงศ์กุล;2545) โดยแสดงประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนไอออน และผลการฝึกช่างงานนิเวศสำหรับการหาแบบจำลอง กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน โดยแสดงผลตามขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย สุดท้ายจะแสดงผลการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก และความเข้มข้นไอออนเหล็ก โดยเปรียบเทียบผลการทดลอง กับผลการทำนายด้วยช่างงานนิเวศ และ ผลการทดลองกับผลจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข ณ ความอัตราการไหลต่างๆ

#### 5.1 ผลการทดลองกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

##### 5.1.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของการแลกเปลี่ยนไอออน และการนำกลับกรด

ในส่วนนี้จะแสดงให้เห็นถึง ผลการทดลอง โดยเริ่มจากการป้อนกรดเสียเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน และนำข้อมูลของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก และไอออนลบที่ประกอบด้วย ปริมาณกรดที่บำบัดได้ ความเข้มข้นไอออนเหล็กเริ่มต้น – สิ้นสุด และความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก เริ่มต้น – สิ้นสุด มาคำนวณเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ และปริมาณกรดที่สามารถนำกลับได้ แสดงในตารางที่ 5.1 – 5.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซับในหอเรซิน ของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก โดยเปลี่ยนอัตราการใช้ ในช่วง 110-200 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการใช้	ปริมาณกรดเสีย ที่บำบัดได้(ลิตร)	ความเข้มข้นไอออนเหล็กขาเข้า (g/l) ที่วิเคราะห์	ปริมาณเหล็กทั้งหมดขาเข้า (g)	ความเข้มข้นไอออนเหล็กขาออก (g/l) ที่วิเคราะห์	ปริมาณเหล็กทั้งหมดขาออก (g)	ปริมาณเหล็กทั้งหมด (g)	ปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซับในเรซิน ผลต่าง (g) ขาเข้า(1) - ขาออก(2)
110 ลิตรต่อชั่วโมง	220	6.3600	1,399.2000	2.2170	2	487.7400	3 911.4600
140 ลิตรต่อชั่วโมง	245	6.2800	1,538.6000	2.2130	542.1850	996.4150	
160 ลิตรต่อชั่วโมง	256	6.3400	1,623.0400	2.1340	546.3040	1,076.7360	
180 ลิตรต่อชั่วโมง	261	6.2500	1,631.2500	2.2100	576.8100	1,054.4400	
200 ลิตรต่อชั่วโมง	200	6.5500	1,310.0000	2.3020	460.4000	849.6000	

ตารางที่ 5.2 แสดงปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซับในหอเรซิน ของการแลกเปลี่ยนไอออนลบ โดยเปลี่ยนอัตราการใช้ ในช่วง 110-200 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการใช้	ปริมาณกรดเสีย ที่บำบัดได้(ลิตร)	ความเข้มข้นไอออนเหล็กขาเข้า (g/l) ที่วิเคราะห์	ปริมาณเหล็กทั้งหมดขาเข้า (g)	ความเข้มข้นไอออนเหล็กขาออก (g/l) ที่วิเคราะห์	ปริมาณเหล็กทั้งหมดขาออก (g)	ปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซับในเรซิน ผลต่าง (g) ขาเข้า(4) - ขาออก(5)
110 ลิตรต่อชั่วโมง	165	2.2170	365.8050	1.7564	5 289.8042	6 76.0008
140 ลิตรต่อชั่วโมง	182	2.2130	402.7660	1.7024	309.8374	92.9286
160 ลิตรต่อชั่วโมง	192	2.1340	409.7280	1.7220	330.6289	79.0991
180 ลิตรต่อชั่วโมง	198	2.2100	437.5800	1.9137	378.9045	58.6755
200 ลิตรต่อชั่วโมง	167	1.3020	217.4340	1.1978	200.0399	17.3941

ตารางที่ 5.3 แสดงประสิทธิภาพเปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนเหล็กของเรซิน ของระบบที่ใช้ในงานวิจัย ที่ประกอบด้วยหอยสำหรับแลกเปลี่ยนไอออนบวก และแลกเปลี่ยนไอออนลบ

ปริมาณเหล็กทั้งหมด เข้า (g)	ปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซับในเรซิน ผลต่าง (g) เข้า(1) - ออก(2)	ปริมาณเหล็กที่ถูกดูดซับในเรซิน ผลต่าง (g) เข้า(4) - ออก(5)	ปริมาณ ไอออนเหล็กที่อยู่ในระบบ (g) (3)+(6)=(7)	% การดูดซับไอออนเหล็ก	
				ทั้งระบบ (7/1)	เฉพาะประจุลบ (6/1)
1	3	6	987.4608	70.57	65.14
1,399.2000	911.4600	76.0008			5.43
1,538.6000	996.4150	92.9286	1,089.3436	70.80	64.76
1,623.0400	1,076.7360	79.0991	1,155.8351	71.21	66.34
1,631.2500	1,054.4400	58.6755	1,113.1155	68.24	64.64
1,310.0000	849.6000	17.3941	866.9941	66.18	64.85

ตารางที่ 5.4 แสดงปริมาณการนำกลับกรด ของระบบที่ใช้ในงานวิจัย

อัตราการไหล	เริ่มต้น				สิ้นสุด				% recovery HCl (8)/(7)
	ลิตร	ความเข้มข้นกรด HCl เข้า (mol/l) ที่วิเคราะห์	ทั้งหมด amount		ลิตร	ความเข้มข้นกรด HCl ออก (mol/l) ที่วิเคราะห์	ทั้งหมด amount		
			เข้า (mol)	เข้า (g)			ออก (mol)	ออก (g)	
110 ลิตรต่อชั่วโมง	220	0.9880	217.3600	7.933.64	165	1.1885	196.1025	7,157.74	90.22
140 ลิตรต่อชั่วโมง	245	0.9833	240.9085	8,793.16	182	1.1609	211.2838	7,711.86	87.70
160 ลิตรต่อชั่วโมง	256	0.9880	252.9280	9,231.87	192	1.1880	228.0960	8,325.50	90.18
180 ลิตรต่อชั่วโมง	261	0.9840	256.8240	9,374.08	198	1.1690	231.4620	8,448.36	90.12
200 ลิตรต่อชั่วโมง	200	0.9858	197.1600	7,196.34	167	1.0664	178.0888	6,500.24	90.33

### 5.1.2 วิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับหออเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

จากการทดลองบำบัดกรดเสีย (Pickling Liquors) โดยใช้หออเรซินแลกเปลี่ยนไอออนทั้ง 2 สามารถวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของการดูดซับ และการนำกลับกรด ณ อัตราการไหลที่ต่างกัน ตั้งแต่ 110,140,160,180 และ 200 ลิตรต่อชั่วโมง โดยปฏิบัติงานจนกระทั่งเรซินอิ่มตัวดังนี้

ตารางที่ 5.5 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับของเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	เปอร์เซ็นต์การนำกลับกรด*	เปอร์เซ็นต์ไอออนเหล็กที่เรซินดูดซับ**		
		Cation Resin C-150	Anion Resin A-500	ทั้งระบบ
110	90.22	65.14	5.43	70.57
140	87.70	64.76	6.04	70.80
160	90.18	66.34	4.87	71.21
180	90.12	64.64	3.60	68.24
200	90.33	64.85	1.33	66.18

\* เมื่อเทียบกับระบบนำกลับกรด จากคู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรมการแปรรูปเหล็ก และกระบวนการกำจัดสนิม ของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม ที่มีประสิทธิภาพการนำกลับกรดได้ 80% และเมื่อเทียบกับระบบของ อาหาร วุฒิสัตย์วงศ์กุล;2545 ที่สามารถนำกลับกรดได้ 75 – 86%

\*\* เมื่อเปรียบเทียบกับระบบของ อาหาร วุฒิสัตย์วงศ์กุล;2545 ที่สามารถดูดซับได้ 59 – 63%

จากตารางที่ 5.5 เปอร์เซ็นต์การนำกลับกรดของการทดลองนี้อยู่ที่ 87.70 – 90.33% ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีกว่าระบบนำกลับกรดเสียในคู่มือ ที่นำกลับกรดได้ 80% และในการทดลองของ อาหาร วุฒิสัตย์วงศ์กุล;2545 75-86% และสามารถเพิ่มความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกจาก 0.9833 – 0.9880 mol/l เป็น 1.0664 – 1.1885 mol/l ซึ่งสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการกำจัดสนิมได้

ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับไอออนเหล็กทั้งระบบสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 66.18 – 71.21% เมื่อเทียบกับการทดลองของอาหาร วุฒิสัตย์วงศ์กุล;2545 ที่ทำได้เพียง 59 – 63% ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้เรซินแบบแมคโคพอร์ส ที่มีความทนทานต่อสภาวะที่เสี่ยงต่อการทำลายโครงสร้างเรซิน และสามารถแลกเปลี่ยนไอออนขนาดใหญ่ได้ดี เนื่องจากมีรูพรุนที่ใหญ่กว่าแบบเจล

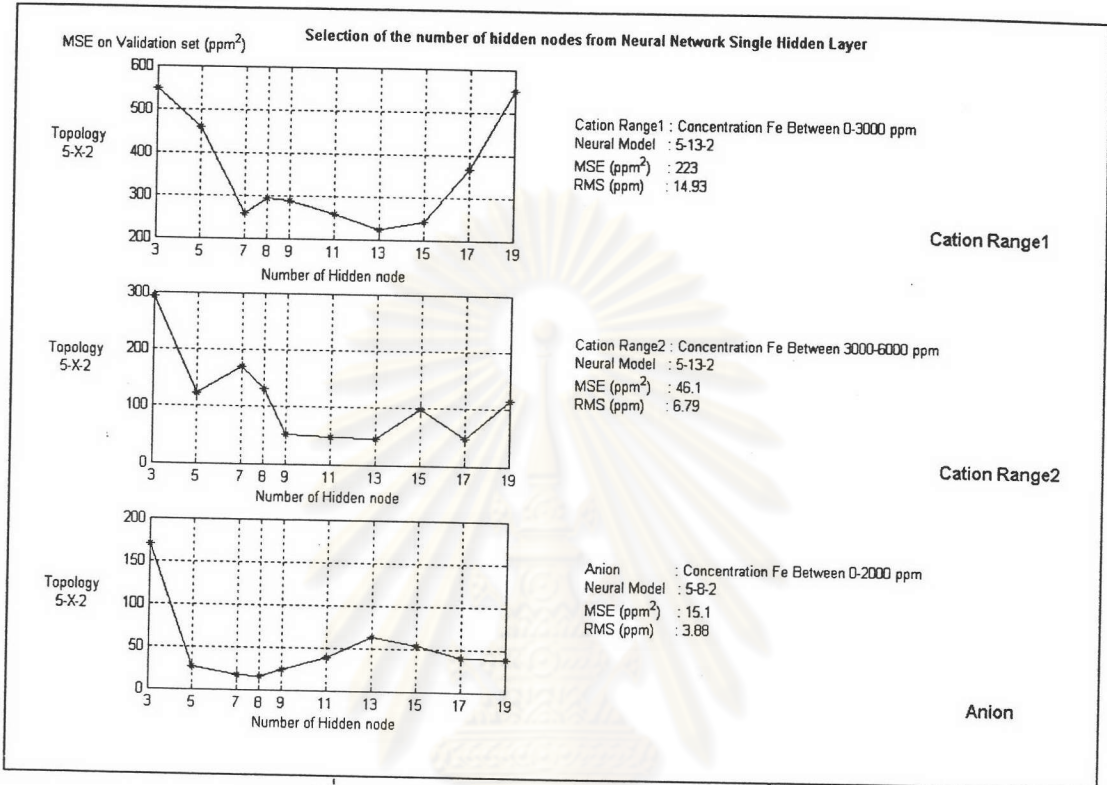
สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับไอออนบวก คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 64.64 – 66.34% สามารถดูดซับไอออนเหล็กได้ดี เมื่อพิจารณาความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ในตารางที่ 3.1 บทที่ 3 ระบุว่าเรซินชนิดนี้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ 1.8 eq/l Resin (eq/l เป็น หน่วยสมมูลต่อปริมาตรเรซิน) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้เรซิน 13 ลิตร ทำให้ระบบสามารถรองรับไอออนบวกได้ 23.4 eq ซึ่งเมื่อเทียบกลับเป็นน้ำหนักของไอออนบวก  $Fe^{2+}$  และ  $Fe^{3+}$  (46.58 g/eq) ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกได้ 1,090 กรัม ตารางที่ 5.1 ในการทดลองเรซินสามารถดูดซับได้ 849.6 – 1,076.73 กรัม

สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับไอออนลบ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 1.33 – 6.04% ต่ำกว่าความจุของการแลกเปลี่ยนไอออนลบ ในตารางที่ 3.1 บทที่ 3 ระบุว่าเรซินชนิดนี้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ 1.15 eq/l Resin ซึ่งในการทดลองนี้ใช้เรซิน 13 ลิตร ทำให้ระบบสามารถรองรับไอออนลบได้ 14.95 eq ซึ่งเมื่อเทียบกลับเป็นน้ำหนักของไอออนลบ  $FeCl_4^-$  (197.65 g/eq) ซึ่งสามารถแลกเปลี่ยนไอออนลบได้ 2,955 กรัม ตารางที่ 5.2 ในการทดลองเรซินดูดซับได้เพียง 17.39 – 92.92 กรัมเท่านั้น จากการวิเคราะห์ในขั้นตอนของการเปลี่ยนไอออนบวกเป็นไอออนลบเชิงซ้อน ที่มีการเติม ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสัดส่วน  $H_2O_2$  1 ลิตร : กรดเสี้ยว 100 ลิตร (E. Marranon, 1999,2000) ยังไม่สามารถเปลี่ยนเป็นไอออนลบเชิงซ้อนได้สมบูรณ์ จึงทำให้การแลกเปลี่ยนไอออนลบนั้นทำได้ไม่ดี

โดยภาพรวมของระบบการแลกเปลี่ยนไอออนนี้ สามารถนำกลับกรดได้มากกว่า 90% เมื่อเทียบกับระบบนำกลับกรดของกรมโรงงาน และพร้อมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้

5.2 ผลการฝึก และการทดสอบข่ายงาน การคัดเลือกข่ายงาน

5.2.1 กรณีที่ 1 ผลการฝึกและการทดสอบ ข่ายงานนิวรัล แบบ 1 ชั้นซ่อน (Single Hidden Layer)



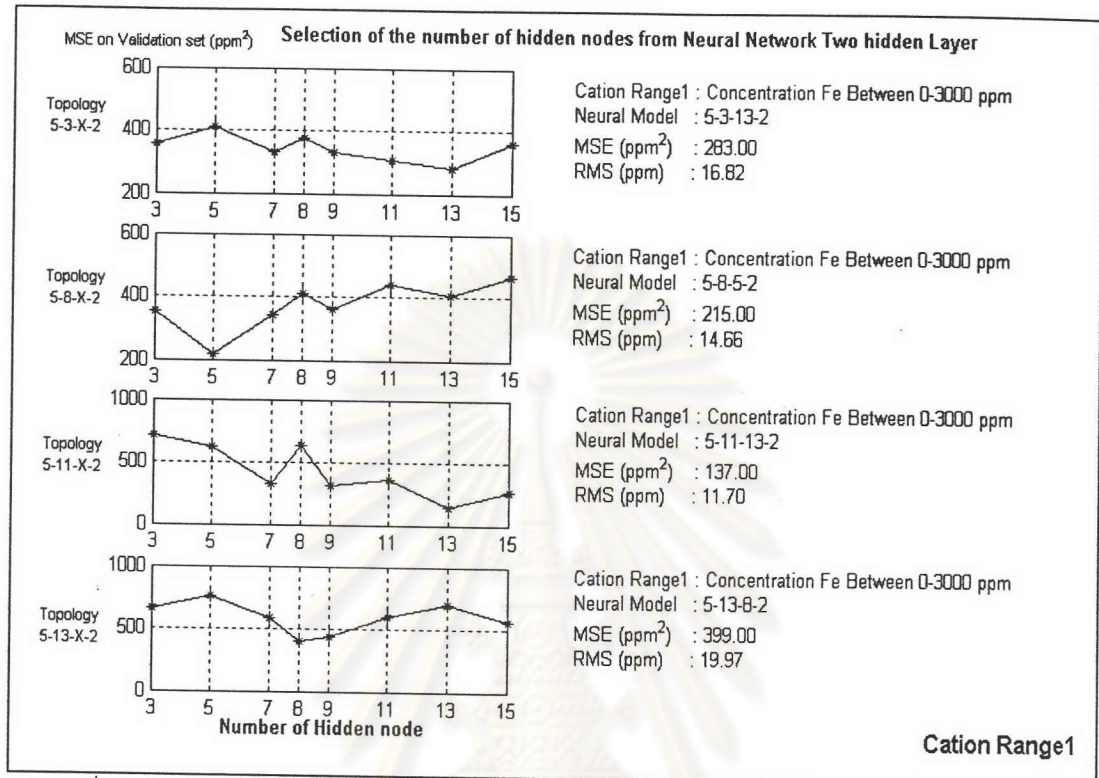
รูปที่ 5.1 แสดงผลการฝึกข่ายงานนิวรัล 1 ชั้นซ่อน

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการคัดเลือกโครงสร้างข่ายงาน 1 ชั้นซ่อน (Single Hidden Layer)

แสดงโครงสร้างข่ายงานที่ผ่านการคัดเลือกสำหรับ ข่ายงานนิวรัล 1 ชั้นซ่อน (Single Hidden Layer)				
Type of Resin	Concentration Range (ppm)	Topology	MSE (ppm <sup>2</sup> )	RMS (ppm)
1. Cation Range 1	0-3000	[5-13-2]	223.0	14.93
2. Cation Range 2	3000-6000	[5-13-2]	45.1	6.79
3. Anion	0-2000	[5-8-2]	15.1	3.88

## 5.2.2 กรณีที่ 2 ผลการฝึก และการทดสอบข่ายงานนิวรัลแบบ 2 ชั้นซ่อน (Two Hidden Layer)

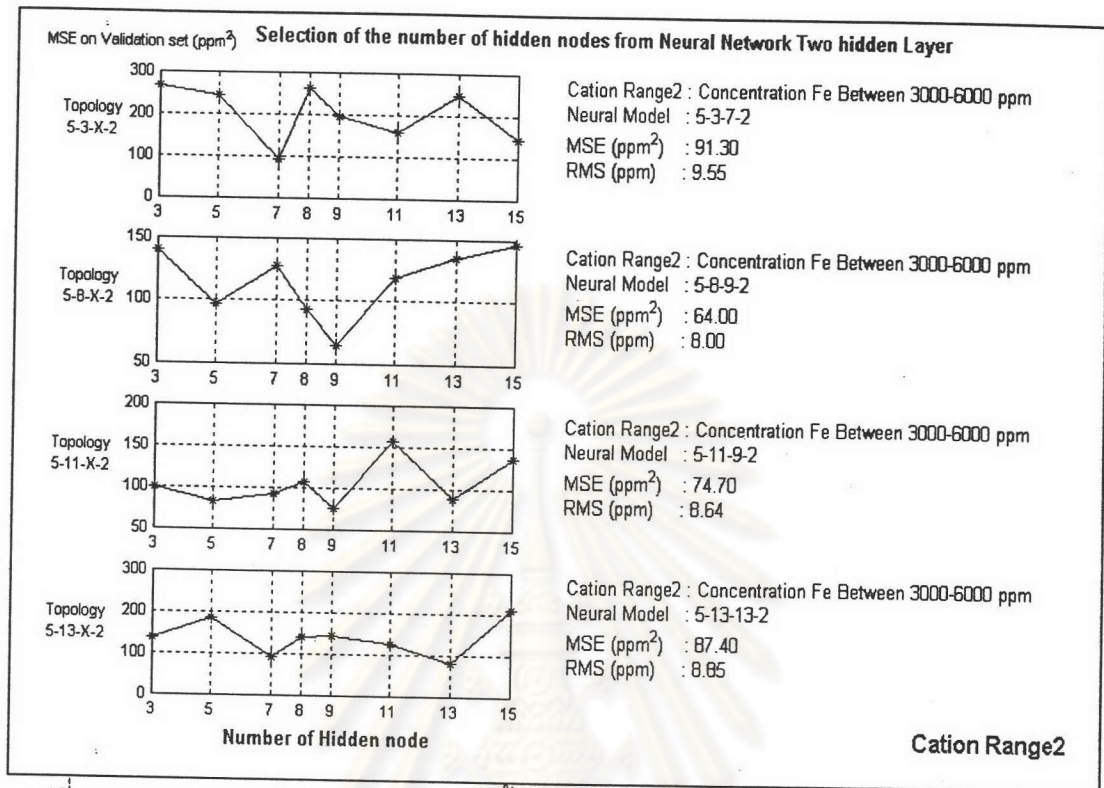
### 1. ผลการฝึก และการทดสอบข่ายงานนิวรัลของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Range 1)



รูปที่ 5.2 แสดงผลการฝึกข่ายงานนิวรัล 2 ชั้นซ่อนสำหรับ Cation Range 1 (0-3000 ppm)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 2. ผลการฝึก และการทดสอบข่ายงานนิวรัลของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก (Cation Range 2)

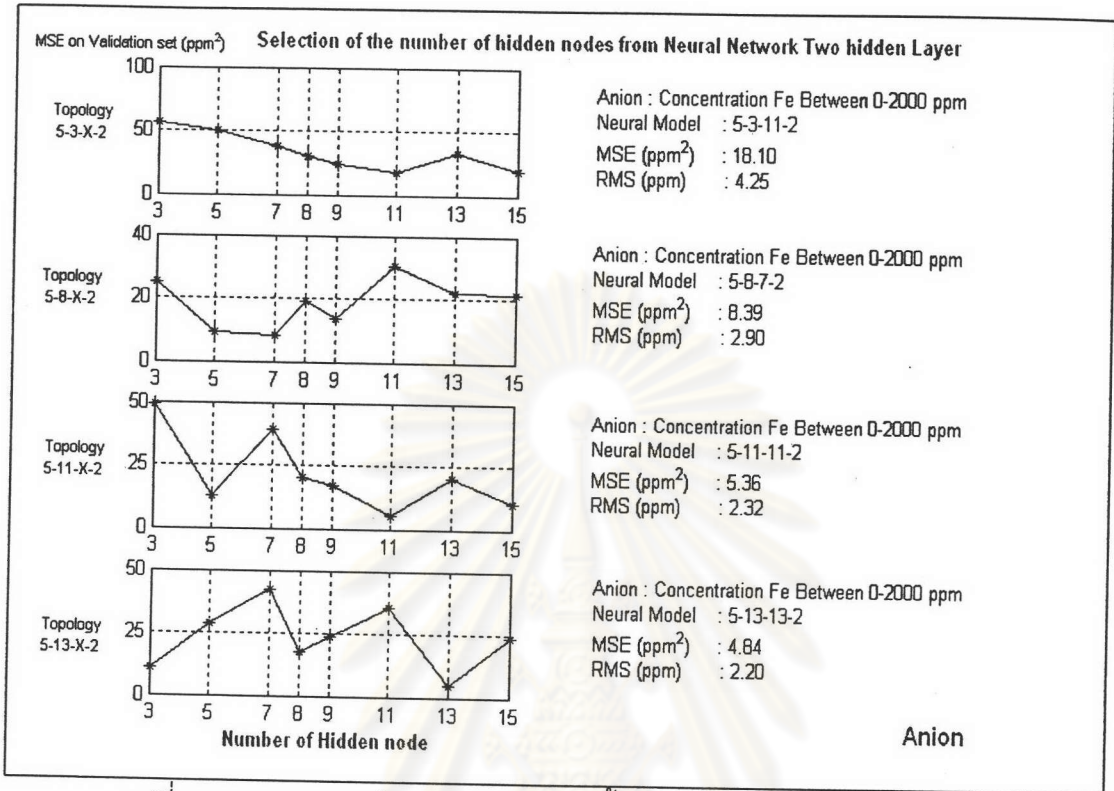


รูปที่ 5.3 แสดงผลการฝึกข่ายงานนิวรัล 2 ชั้นซ่อน สำหรับ Cation Range 2 (3000-6000 ppm)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 3. ผลการฝึก และการทดสอบข่ายงานนิวรัลของการแลกเปลี่ยนไอออนลบ (Anion)



รูปที่ 5.4 แสดงผลการฝึกข่ายงานนิวรัล 2 ชั้นซ่อน ของ Anion (0-2000 ppm)

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการคัดเลือกโครงสร้างข่ายงาน 2 ชั้นซ่อน (Two Hidden Layer)

แสดงโครงสร้างข่ายงานที่ผ่านการคัดเลือกสำหรับ ข่ายงานนิเวรัล 2 ชั้นซ่อน (Two Hidden Layer)				
Type of Resin	Concentration Range (ppm)	Topology	MSE (ppm <sup>2</sup> )	RMS (ppm)
4. Cation Range 1	0-3000	[5-3-13-2]	283.00	16.82
5. Cation Range 1	0-3000	[5-8-5-2]	215.00	14.66
6. Cation Range 1	0-3000	[5-11-13-2]	137.00	11.70
7. Cation Range 1	0-3000	[5-13-8-2]	399.00	19.97
8. Cation Range 2	3000-6000	[5-3-7-2]	91.30	9.55
9. Cation Range 2	3000-6000	[5-8-9-2]	64.00	8.00
10. Cation Range 2	3000-6000	[5-11-9-2]	74.70	8.64
11. Cation Range 2	3000-6000	[5-13-13-2]	87.40	8.85
12. Anion	0-2000	[5-3-11-2]	18.10	4.25
13. Anion	0-2000	[5-8-7-2]	8.39	2.90
14. Anion	0-2000	[5-11-11-2]	5.36	2.32
15. Anion	0-2000	[5-13-13-2]	4.84	2.20

จากการฝึก และการทดสอบข่ายงานนิเวรัลทั้งหมด 126 ข่ายงาน สามารถพิจารณา  
คัดเลือกข่ายงานที่ให้ผลการฝึก และการทดสอบ ที่แสดงโดย MSE และ RMS ที่น้อยที่สุดได้ 15  
ข่ายงาน ในส่วนข่ายงานสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ได้แบ่งช่วงข้อมูลความเข้มข้นออกเป็น  
2 ช่วง โดยช่วงที่ 1 อยู่ระหว่าง 0-3000 ppm เรียกว่า Cation Range1 และช่วงที่ 2. อยู่ระหว่าง  
3000 – 6000 ppm เรียกว่า Cation Range2 และนำมาจับคู่กันทั้งหมดได้ 17 แบบจำลอง ส่วน  
ข่ายงานสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนลบอีก 5 ข่ายงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 5.8 แสดงการจัดแบบจำลองตั้งแต่ แบบจำลองที่ 1 ถึง แบบจำลองที่ 7

สำหรับข่ายงาน 1 ชั้นซ้อน		
Type of Resin	Concentration Range ( <i>ppm</i> )	Topology
1 <sup>st</sup> NNs Model is: for Cation Column (10fig/10)		
Cation Range 1	0-3000	[5-13-2]
Cation Range 2	3000-6000	[5-13-2]

2 <sup>nd</sup> NNs Model is: for Anion Column (10fig/20)		
Anion	0-2000	[5-8-2]

สำหรับข่ายงาน 2 ชั้นซ้อน		
Type of Resin	Concentration Range ( <i>ppm</i> )	Topology
3 <sup>rd</sup> NNs Model is: for Cation Column (40fig/60)		
3*Cation Range 1	0-3000	[5-3-13-2]
3-1 Cation Range 2	3000-6000	[5-3-7-2]
3-2 Cation Range 2	3000-6000	[5-8-9-2]
3-3 Cation Range 2	3000-6000	[5-11-9-2]
3-4 Cation Range 2	3000-6000	[5-13-13-2]

สำหรับข่ายงาน 2 ชั้นซ้อน (ต่อ)		
Type of Resin	Concentration Range ( <i>ppm</i> )	Topology
4 <sup>th</sup> NNs Model is: for Cation Column (40fig/100)		
4*Cation Range 1	0-3000	[5-8-5-2]
4-1 Cation Range 2	3000-6000	[5-3-7-2]
4-2 Cation Range 2	3000-6000	[5-8-9-2]
4-3 Cation Range 2	3000-6000	[5-11-9-2]
4-4 Cation Range 2	3000-6000	[5-13-13-2]

5 <sup>th</sup> NNs Model is: for Cation Column (40fig/140)		
5*Cation Range 1	0-3000	[5-11-13-2]
5-1 Cation Range 2	3000-6000	[5-3-7-2]
5-2 Cation Range 2	3000-6000	[5-8-9-2]
5-3 Cation Range 2	3000-6000	[5-11-9-2]
5-4 Cation Range 2	3000-6000	[5-13-13-2]

6 <sup>th</sup> NNs Model is: for Cation Column (40fig/180)		
6*Cation Range 1	0-3000	[5-13-8-2]
6-1 Cation Range 2	3000-6000	[5-3-7-2]
6-2 Cation Range 2	3000-6000	[5-8-9-2]
6-3 Cation Range 2	3000-6000	[5-11-9-2]
6-4 Cation Range 2	3000-6000	[5-13-13-2]

7 <sup>th</sup> NNs Model is: for Anion Column (40fig/220)		
7-1 Anion	0-2000	[5-3-11-2]
7-2 Anion	0-2000	[5-8-7-2]
7-3 Anion	0-2000	[5-11-11-2]
7-4 Anion	0-2000	[5-13-13-2]

เมื่อพิจารณาผลการฝึกข่ายงานจากตารางที่ 5.5, 5.6, 5.7 แบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนบวกคือ แบบจำลองที่ 5-2 ซึ่งประกอบด้วย ข่ายงานสำหรับ Cation Range 1 คือ [5-11-13-2] โดยมีค่า MSE 137 ppm<sup>2</sup> RMS 11.7 ppm และข่ายงานสำหรับ Cation Range 2 คือ [5-8-9-2] ได้ค่า MSE 64.0 ppm<sup>2</sup> RMS 8.0 ppm ส่วนการแลกเปลี่ยนไอออนลบคือ แบบจำลองที่ 7-4 โครงสร้างข่ายงาน [5-13-13-2] ได้ค่า MSE 4.84 ppm<sup>2</sup> RMS 2.20 ppm

### 5.2.3 วิเคราะห์ผลการฝึกข่ายงาน และการทดสอบข่ายงานนิเวรัล

จากการนำข้อมูลดิบที่ได้จากการทดลองจริงของกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน มาจัดชุดรูปแบบ (Pattern Data Set) ซึ่งเป็นลักษณะของการเรียงข้อมูลใหม่ และในขั้นตอนต่อไป จึงเริ่มสร้างโครงสร้างข่ายงานที่ยังไม่สามารถระบุได้ว่าข่ายงานใดเหมาะสมที่สุดในการเป็นตัวแทนระบบนี้ได้ ขั้นตอนต่อมาจึงทำการฝึกข่ายงาน และทดสอบข่ายงานเพื่อให้ข่ายงานเกิดเรียนรู้ เพื่อให้ข่ายงานจดจำพฤติกรรมกรรมการเปลี่ยนแปลงของชุดรูปแบบข้อมูล และทำการปรับค่าน้ำหนักของข่ายงานจนกระทั่งได้ ค่าความผิดพลาดน้อยสุด จึงสามารถนำข่ายงานนั้นมาทำนายระบบต่อไป

จากข่ายงานทั้งหมดที่ได้ออกแบบมามีจำนวนทั้งสิ้น 126 ข่ายงาน ที่ประกอบด้วยอินพุท 5 โนด และเอาท์พุท 2 โนด แตกต่างกันในชั้นซ่อน และจำนวนนิวรอนในแต่ละชั้น โดยผ่านการฝึกข่ายงาน นิวรัลแบบการกระจายย้อนกลับ และใช้การเรียนรู้แบบบริเวณเบอกร์ - มาร์ควอร์ ข่ายงานทั้งหมดที่ถูกฝึกจนกระทั่งได้ค่า MSE น้อยสุดในแต่ละข่ายงาน โดยแสดงดังรูปที่ 5.1, 5.2, 5.3 และ 5.4 ซึ่งสามารถคัดเลือกข่ายงานมาพิจารณาได้ 15 ข่ายงานตามตารางที่ 5.5, 5.6 ต่อจากนั้นนำไปจัดเป็นแบบจำลองได้ทั้งสิ้น 22 แบบจำลองตามตารางที่ 5.4 โดยแบ่งเป็นแบบจำลองสำหรับแลกเปลี่ยนประจุบวก 17 แบบจำลอง คือ แบบจำลองที่ 1, 3-1, 3-2, 3-3, 3-4, 4-1, 4-2, 4-3, 4-4, 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 6-1, 6-2, 6-3, 6-4 และ สำหรับการแลกเปลี่ยนประจุลบอีก 5 แบบจำลอง คือแบบจำลองที่ 2, 7-1, 7-2, 7-3, 7-4 และในขั้นตอนต่อไปเราจะนำข่ายงานทั้งหมดทำนายผลการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบกับผลจากการทดลองจริง โดยดัชนีชี้วัดที่ใช้เปรียบเทียบคือ

1. ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Mean Square Error)

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2 \quad \text{สมการที่ 5.1}$$

2. ค่ารากความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2} \quad \text{สมการที่ 5.2}$$

3. เปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index)

$$RMSP \text{ Error index} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n p_i^2}} \times 100 \quad \text{สมการที่ 5.3}$$

4. เปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูงสุด (Maximum Percent Error Index)

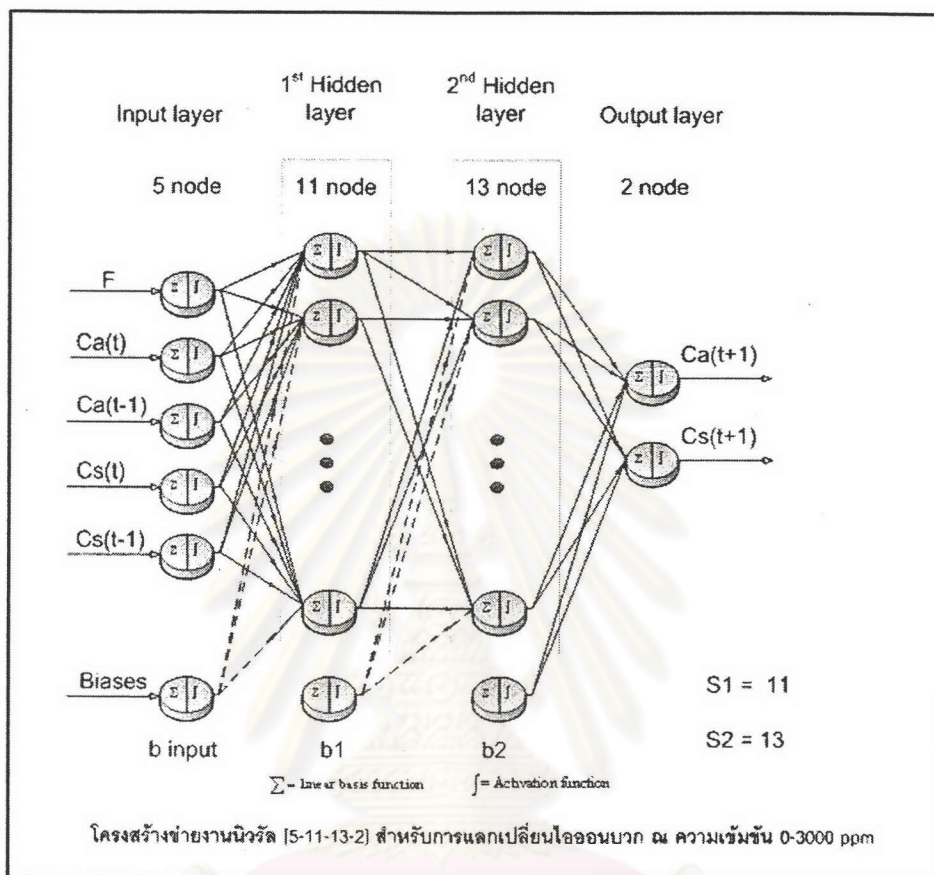
$$MP \text{ Error index} = \frac{\max |y_i - p_i|}{\max |p_i|} \times 100 \quad \text{สมการที่ 5.4}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.3 แสดงลักษณะโครงสร้างข่ายงานนิวรัลที่เหมาะสมที่ใช้ทำนาย

#### 5.3.1 โครงสร้างข่ายงานนิวรัล [5-11-13-2]

สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนบวก ช่วง 0-3000 ppm

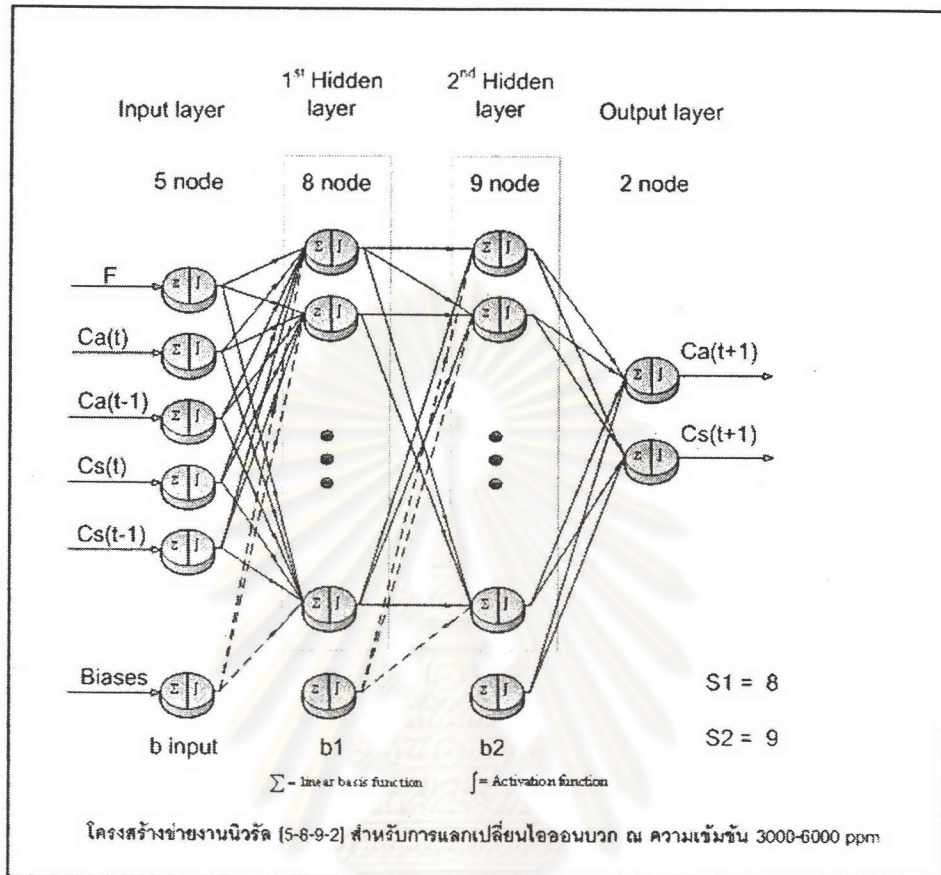


รูปที่ 5.5 แสดง ลักษณะโครงสร้างข่ายงานนิวรัล [5-11-13-2]

จากรูปที่ 5.5 แสดงลักษณะโครงสร้างข่ายงานนิวรัล [5-11-13-2] ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก ณ ความเข้มข้น 0-3000ppm ที่ประกอบด้วย ชั้นอินพุต 5 โหนด ชั้นซ่อนแรก 11 โหนด ชั้นซ่อนที่สอง 13 โหนด และเอาต์พุต 2 โหนด โดยชั้นอินพุต ประกอบด้วย  $F$  คือ อัตราการไหล ตั้งแต่ 110, 140, 160, 180 และ 200 ลิตรต่อชั่วโมง  $C_a(t), C_a(t-1)$  คือความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่เวลาปัจจุบัน และเวลาย้อนหลัง 1 ช่วงเวลา ส่วน  $C_a(t+1)$  คือความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่ทำนาย  $C_s(t), C_s(t-1)$  คือความเข้มข้นไอออนเหล็กที่เวลาปัจจุบัน และเวลาย้อนหลัง 1 ช่วงเวลา ส่วน  $C_s(t+1)$  คือความเข้มข้นไอออนเหล็กที่ทำนาย

### 5.3.2 โครงสร้างข่ายงานนิวรัล [5-8-9-2]

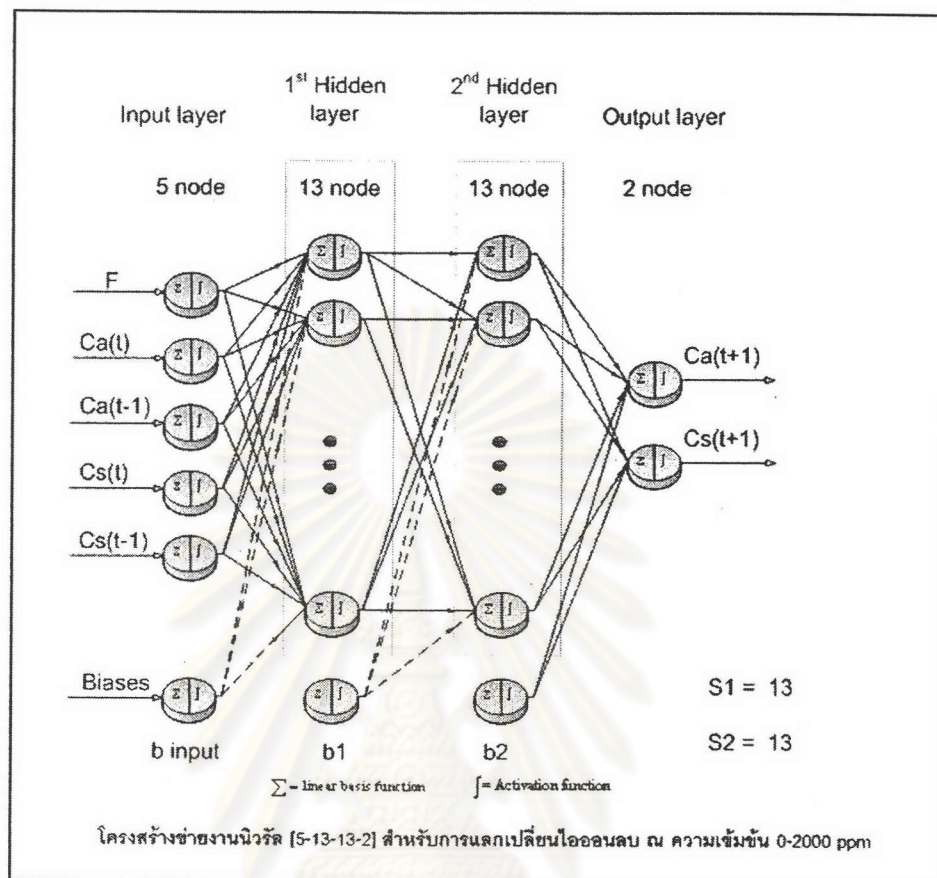
สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนบวก ช่วง 3000-6000ppm



รูปที่ 5.6 แสดง ลักษณะโครงสร้างข่ายงานนิวรัล [5-8-9-2]

จากรูปที่ 5.6 แสดงลักษณะโครงสร้างข่ายงานนิวรัล [5-8-9-2] ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวก ณ ความเข้มข้น 3000-6000ppm ที่ประกอบด้วย ชั้นอินพุต 5 โหนด ชั้นซ่อนแรก 3 โหนด ชั้นซ่อนที่สอง 7 โหนด และเอาต์พุต 2 โหนด โดยชั้นอินพุต ประกอบด้วย  $F$  คืออัตราการไหล ตั้งแต่ 110, 140, 160, 180 และ 200 ลิตรต่อชั่วโมง  $C_a(t), C_a(t-1)$  คือความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่เวลาปัจจุบัน และเวลาย้อนหลัง 1 ช่วงเวลา ส่วน  $C_a(t+1)$  คือความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่ทำนาย  $C_s(t), C_s(t-1)$  คือความเข้มข้นไอออนเหล็กที่เวลาปัจจุบัน และเวลาย้อนหลัง 1 ช่วงเวลา ส่วน  $C_s(t+1)$  คือความเข้มข้นไอออนเหล็กที่ทำนาย

5.3.3 โครงสร้างข่ายงานนิวรัล [5-13-13-2]  
สำหรับแลกเปลี่ยนไอออนลบ ช่วง 0-2000 ppm



รูปที่ 5.7 แสดง ลักษณะโครงสร้างข่ายงานนิวรัล [5-13-13-2]

จากรูปที่ 5.7 แสดงลักษณะโครงสร้างข่ายงานนิวรัล [5-13-13-2] ใช้สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกในช่วง 0-3000 ppm ที่ประกอบด้วย ชั้นอินพุต 5 โหนด ชั้นซ่อนแรก 13 โหนด ชั้นซ่อนที่สอง 13 โหนด และเอาต์พุต 2 โหนด โดยชั้นอินพุต ประกอบด้วย  $F$  คืออัตราการไหล ตั้งแต่ 110, 140, 160, 180 และ 200 ลิตรต่อชั่วโมง  $C_a(t), C_a(t-1)$  คือความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่เวลาปัจจุบัน และเวลาย้อนหลัง 1 ช่วงเวลา ส่วน  $C_a(t+1)$  คือความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกที่ทำนาย  $C_s(t), C_s(t-1)$  คือความเข้มข้นไอออนเหล็กที่เวลาปัจจุบัน และเวลาย้อนหลัง 1 ช่วงเวลา ส่วน  $C_s(t+1)$  คือความเข้มข้นไอออนเหล็กที่ทำนาย

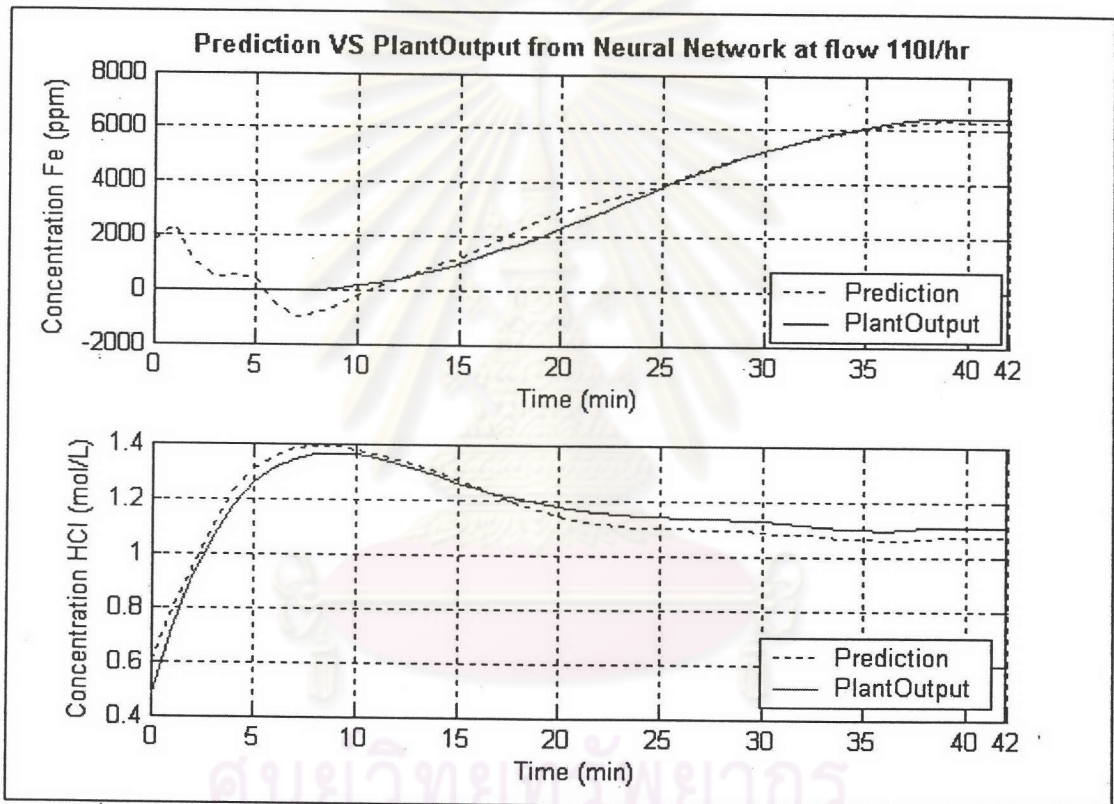


## 5.4 ผลการทำนายพฤติกรรมของการดูดซับตามอัตราการไหลต่างๆ

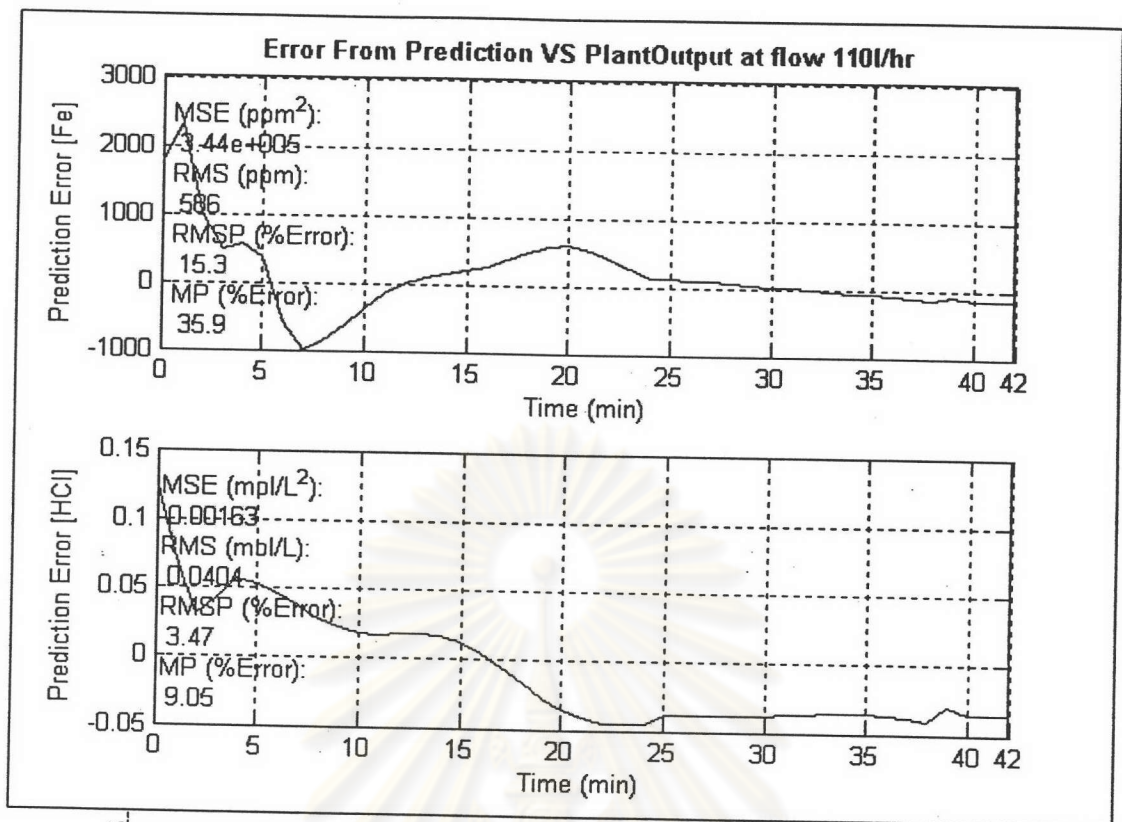
### 5.4.1 ผลการทำนายสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนบวก โดยใช้

แบบจำลองที่ 5-2 [5-11-13-2] / [5-8-9-2]

สำหรับพฤติกรรมของการแลกเปลี่ยนไอออนบวกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง 1. ช่วงความเข้มข้นเหล็กที่ 1 (0-3000 ppm) จะใช้ช่วงงาน [5-11-13-2] แสดงถึง ช่วงงานที่อินพุต 5 โนด ชั้นช้อนแรก 11 โนด ชั้นช้อนที่สอง 13 โนด และเอาท์พุท 2 โนด 2. ช่วงความเข้มข้นเหล็กที่ 2 (3000-6000 ppm) จะใช้ช่วงงาน [5-8-9-2] แสดงถึง ช่วงงานที่อินพุต 5 โนด ชั้นช้อนแรก 8 โนด ชั้นช้อนที่สอง 9 โนด และเอาท์พุท 2 โนด ซึ่งแสดงผลการทำนายได้ดังนี้



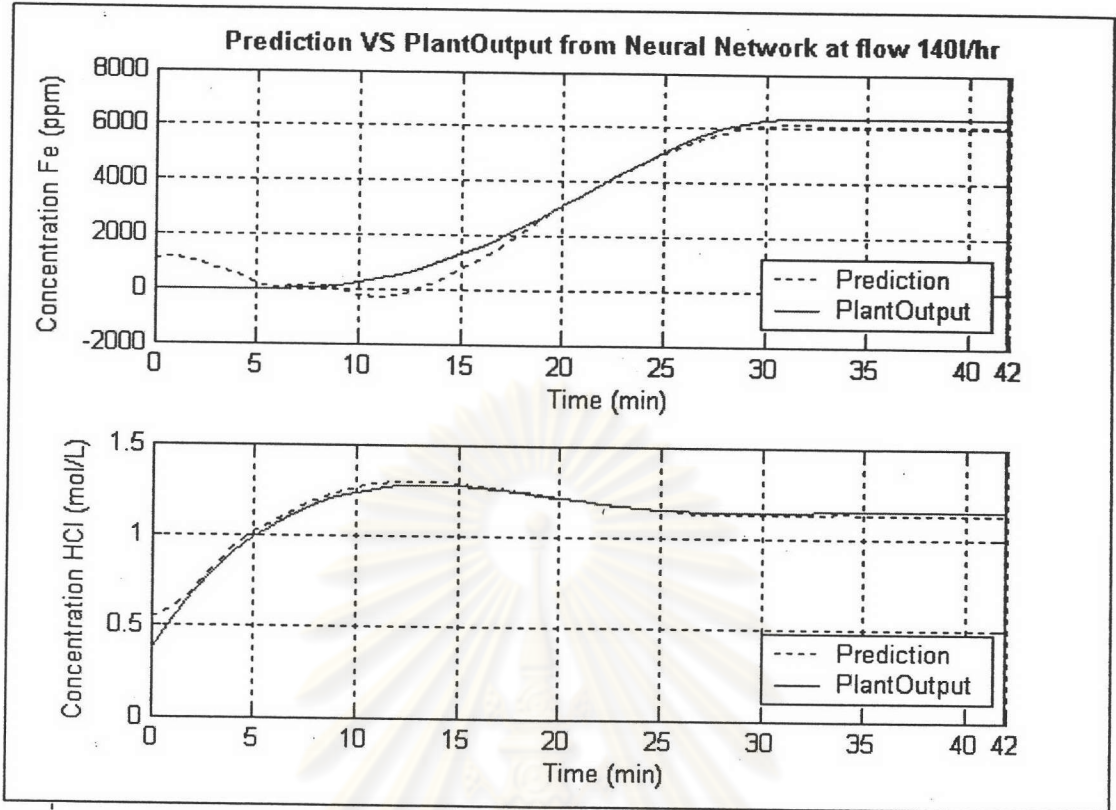
รูปที่ 5.8 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง



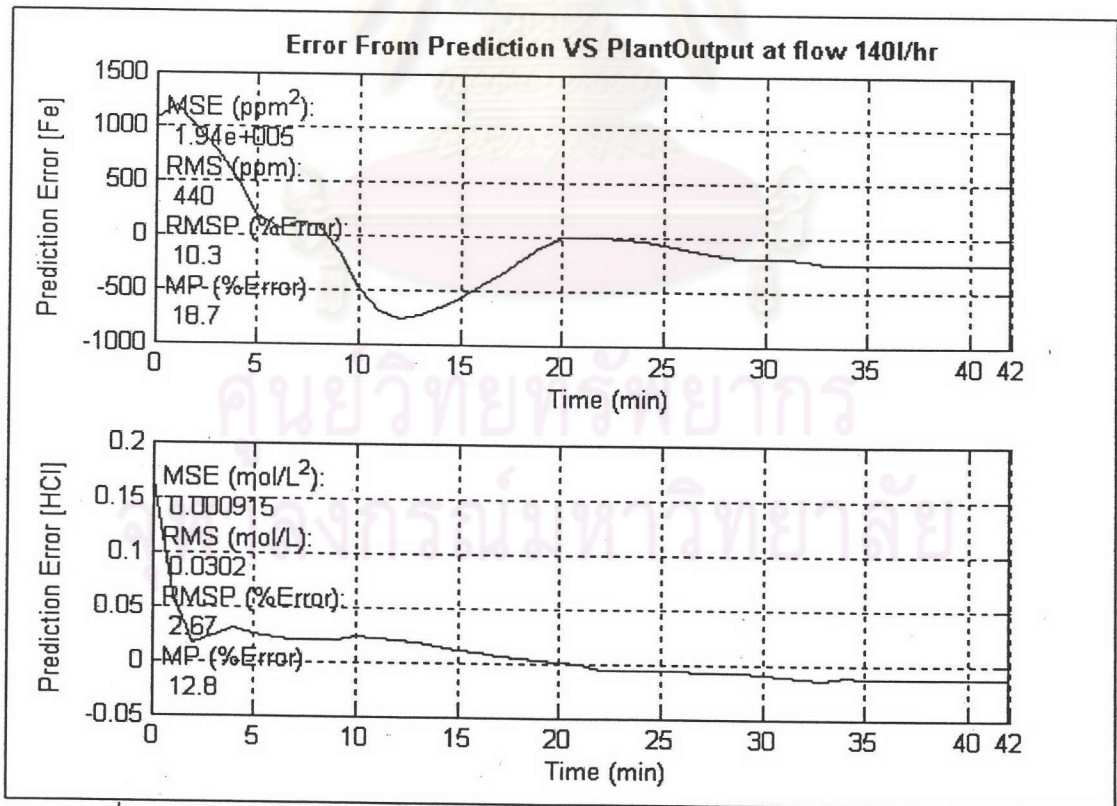
รูปที่ 5.9 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง

สำหรับอัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.8, 5.9 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ในช่วงแรกความเข้มข้นไอออนเหล็ก ตั้งแต่ 0-3000 ppm ช่างงานไม่สามารถทำนายได้ ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) สูงสุด MP = 35.9% ช่วงหลังที่ความเข้มข้นไอออนเหล็กมากกว่า 3000 ppm สามารถทำนายได้ดี ทำให้ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่ RMSP = 15.3%
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ช่างงานนี้สามารถทำนายได้ดีตลอดช่วงของความเข้มข้นไอออนเหล็กที่เปลี่ยนแปลง โดยค่า MP = 9.05% และค่า RMSP = 3.47%



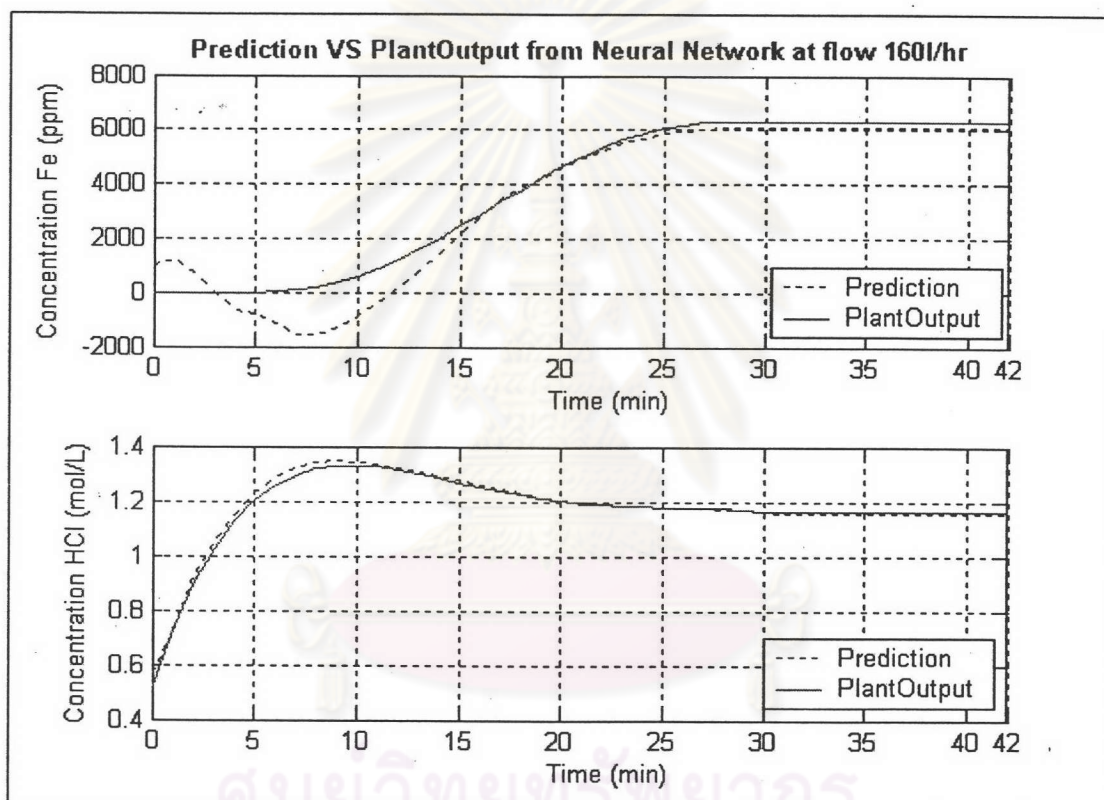
รูปที่ 5.10 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 140 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 5.11 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 140 ลิตรต่อชั่วโมง

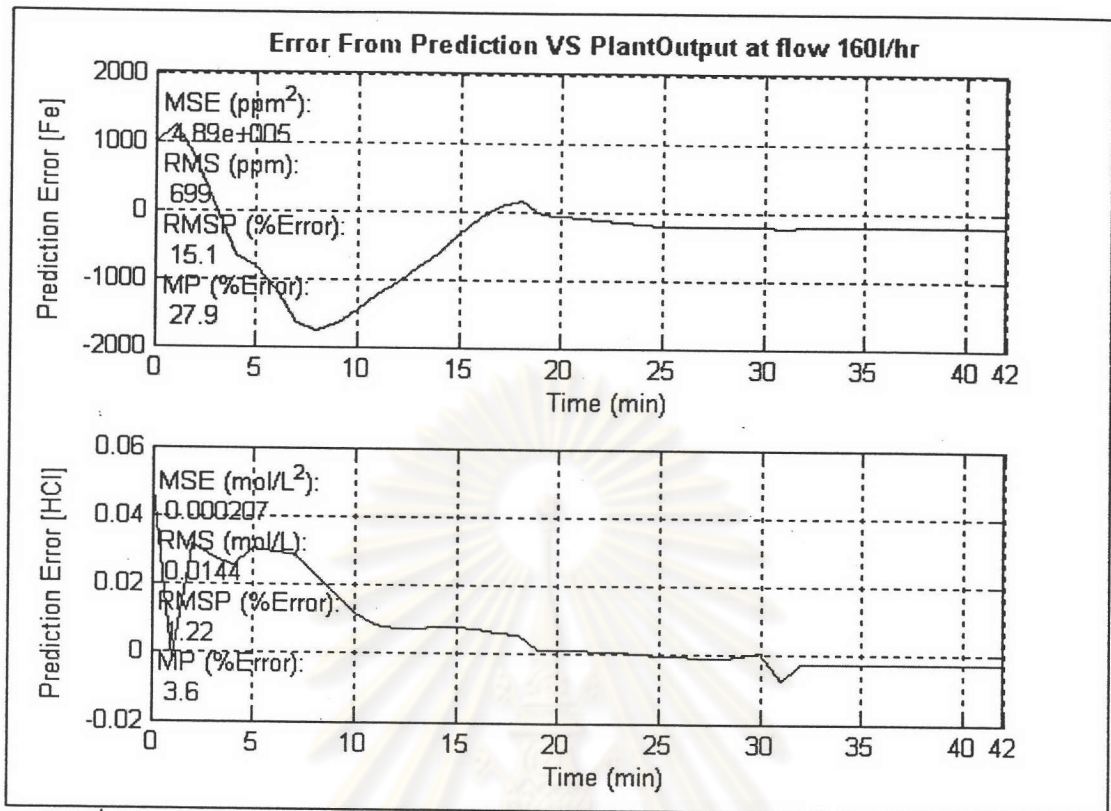
สำหรับอัตราการไหล 140 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.10, 5.11 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ช่วงแรกความเข้มข้นไอออนเหล็ก ตั้งแต่ 0-3000 ppm ข่ายงานไม่สามารถทำนายได้ดี ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) มีค่า MP = 18.7% ช่วงหลังที่ความเข้มข้นไอออนเหล็กมากกว่า 3000 ppm สามารถทำนายได้ดี ทำให้ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่ RMSP = 10.3%
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ข่ายงานนี้สามารถทำนายได้ดีตลอดช่วงของความเข้มข้นไอออนเหล็กที่เปลี่ยนแปลง โดยค่า MP = 12.8% และค่า RMSP = 2.67%



รูปที่ 5.12 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 160 ลิตรต่อชั่วโมง

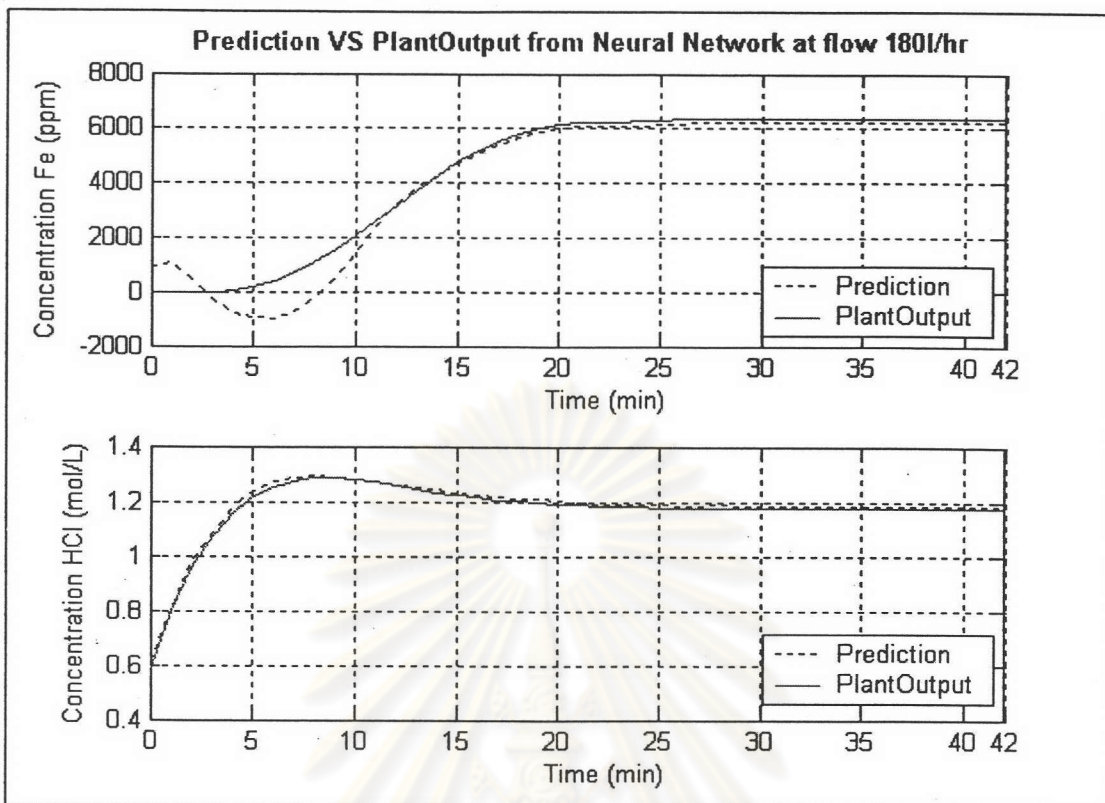
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



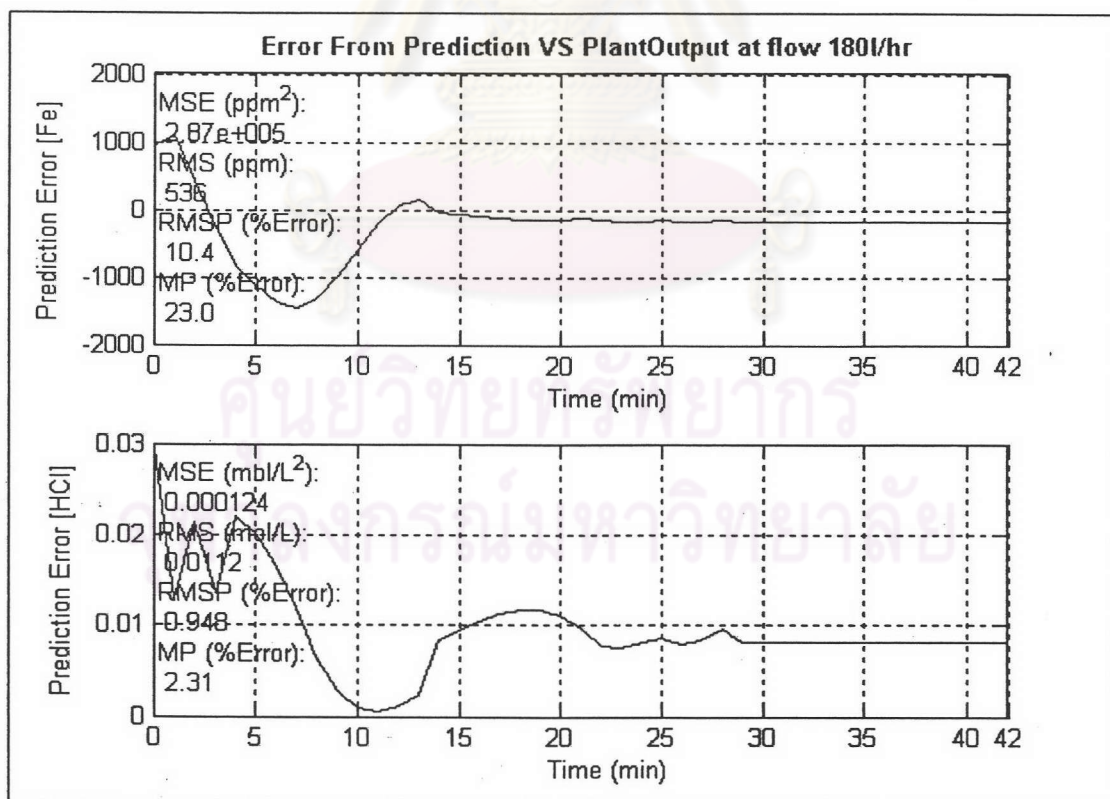
รูปที่ 5.13 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 160 ลิตรต่อชั่วโมง

สำหรับอัตราการไหล 160 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.12, 5.13 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ช่วงแรกความเข้มข้นไอออนเหล็ก ตั้งแต่ 0-3000 ppm ข่ายงานไม่สามารถทำนายได้ดี ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) มีค่า MP = 27.9% ช่วงหลังที่ความเข้มข้นไอออนเหล็กมากกว่า 3000 ppm สามารถทำนายได้ดี ทำให้ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่ RMSP = 15.1%
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ข่ายงานนี้สามารถทำนายได้ดี ตลอดช่วงของความเข้มข้นไอออนเหล็กที่เปลี่ยนแปลง โดยค่า MP = 3.6% และค่า RMSP = 1.22%



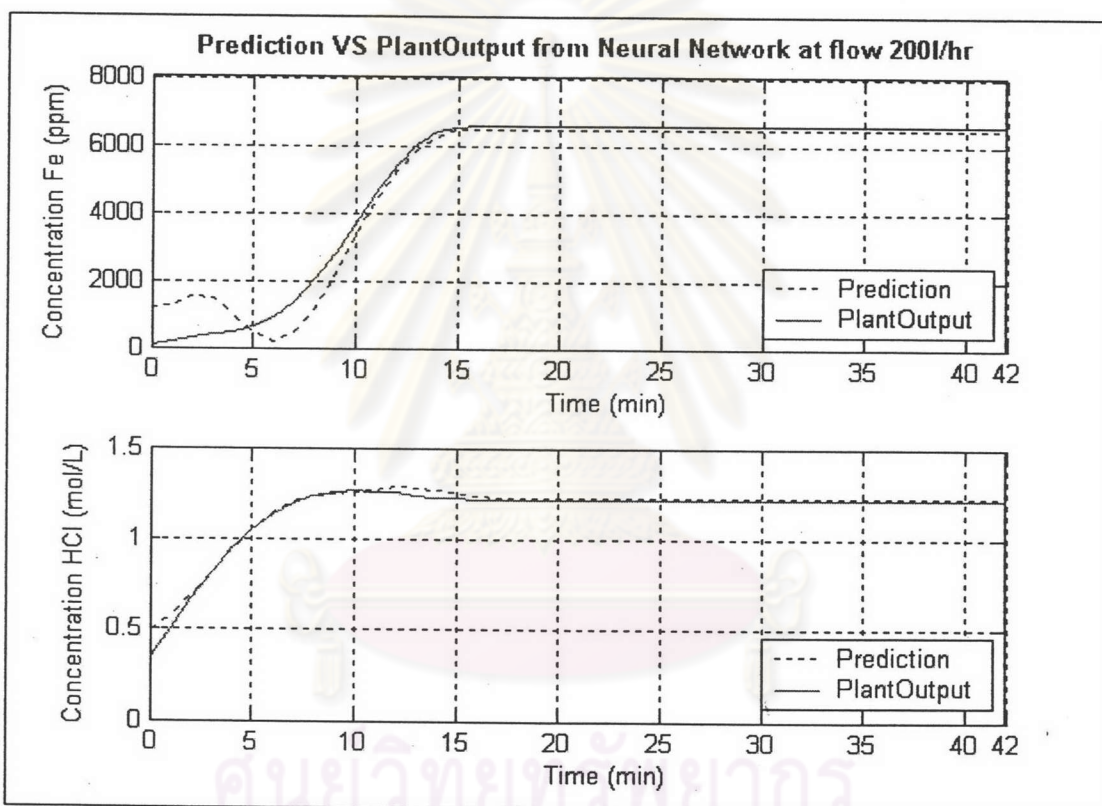
รูปที่ 5.14 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 5.15 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง

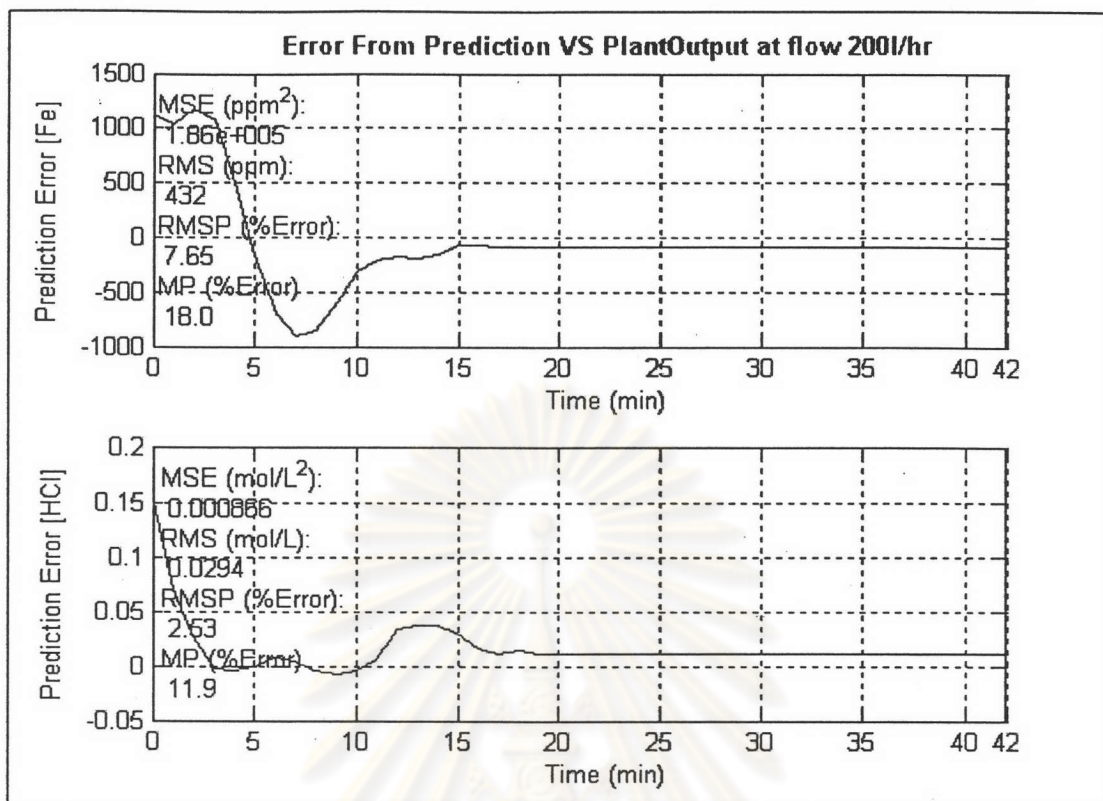
สำหรับอัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.14,5.15 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ช่วงแรกความเข้มข้นไอออนเหล็ก ตั้งแต่ 0-3000 ppm ข่ายงานไม่สามารถทำนายได้ดี ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) มีค่า  $MP = 23.0\%$  ช่วงหลังที่ความเข้มข้นไอออนเหล็กมากกว่า 3000 ppm สามารถทำนายได้ดี ทำให้ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่  $RMSP = 10.4\%$
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ข่ายงานนี้สามารถทำนายได้ดี ตลอดช่วงของความเข้มข้นไอออนเหล็กที่เปลี่ยนแปลง โดยค่า  $MP = 2.31\%$  และค่า  $RMSP = 0.948\%$



รูปที่ 5.16 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 200 ลิตรต่อชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.17 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 200 ลิตรต่อชั่วโมง

สำหรับอัตราการไหล 200 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.16,5.17 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ช่วงแรกความเข้มข้นไอออนเหล็ก ตั้งแต่ 0-3000 ppm หน่วยงานไม่สามารถทำนายได้ดี ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) มีค่า MP = 18.0% ช่วงหลังที่ความเข้มข้นไอออนเหล็กมากกว่า 3000 ppm สามารถทำนายได้ดี ทำให้ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่ RMSP = 7.65%
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก หน่วยงานนี้สามารถทำนายได้ดี ตลอดช่วงของความเข้มข้นไอออนเหล็กที่เปลี่ยนแปลง โดยค่า MP = 11.9% และค่า RMSP = 2.53%



จากการวิเคราะห์โดยภาพรวมสามารถกล่าวได้ว่า แบบจำลองของข่ายงานนิวรัลนี้ที่ใช้ทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ข่ายงานไม่สามารถทำนายได้ดีในช่วงความเข้มข้นไอออนเหล็ก ระหว่าง 0-3000 ppm ส่วนการทำนายในช่วงความเข้มข้นไอออนเหล็กระหว่าง 3000-6000 ppm สามารถทำนายได้ดีมาก สามารถกล่าวได้ว่า ค่า MP อยู่ในช่วง 18.0 – 35.9% ส่วน RMSP อยู่ในช่วง 7.6 – 15.3% และในส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ข่ายงานสามารถทำนายได้ดีมากในช่วงความเข้มข้นไอออนเหล็กระหว่าง 0-2000 ppm และค่า MP อยู่ในช่วง 2.3 – 12.8% และค่า RMSP อยู่ในช่วง 0.9 – 3.4% ตามตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.9 แสดงดัชนีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด MP และ RMSP ของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก

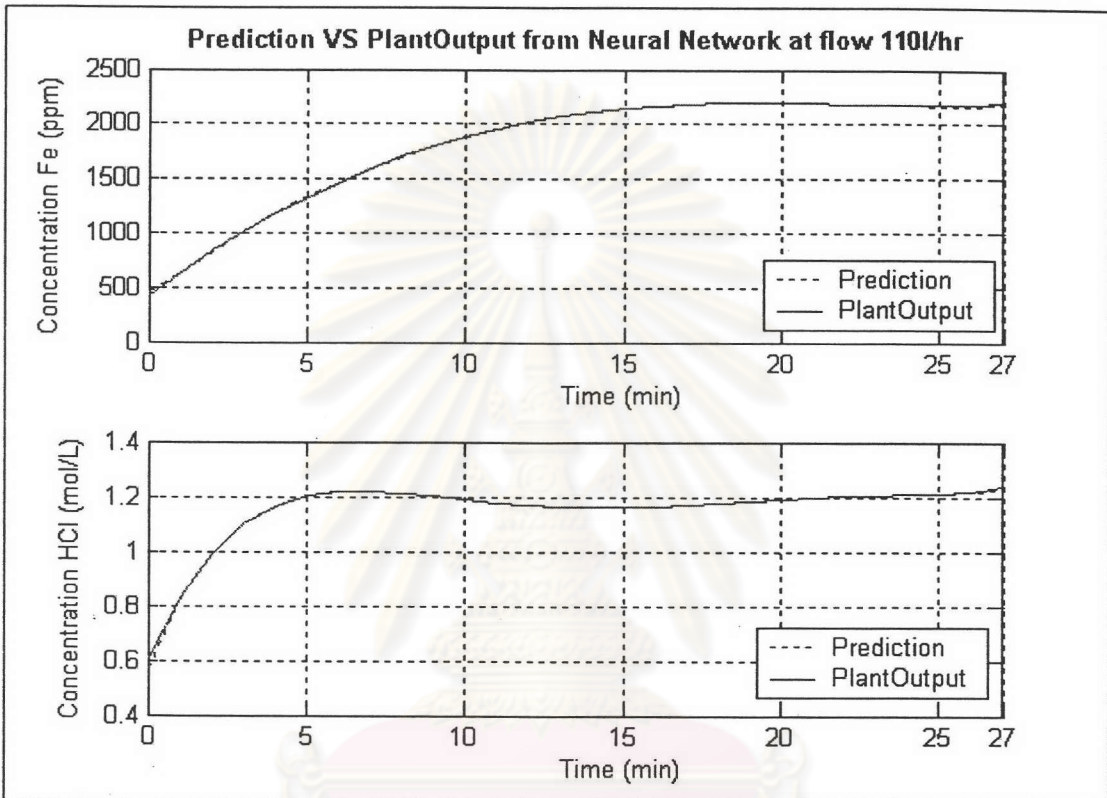
อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ความเข้มข้นไอออนเหล็ก		ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก	
	MP (%Error)	RMSP (%Error)	MP (%Error)	RMSP (%Error)
110	35.90	15.30	9.05	3.47
140	18.70	10.30	12.80	2.67
160	27.90	15.10	3.60	1.22
180	23.00	10.40	2.31	0.95
200	18.00	7.65	11.90	2.53

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 5.4.2 ผลการทำนายสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ โดยให้

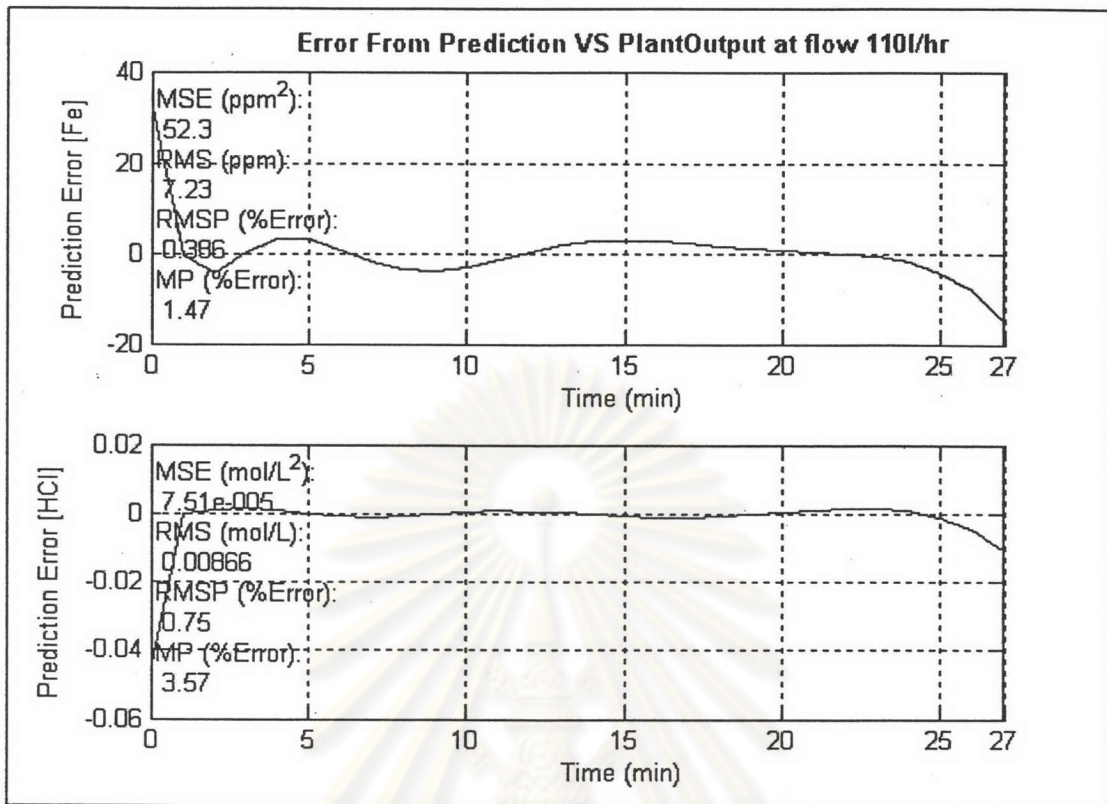
แบบจำลองที่ 7-4 [5-13-13-2]

สำหรับพฤติกรรมของการแลกเปลี่ยนไอออนลบสามารถแสดงได้ดังนี้ โดยแสดงเป็นช่วงความเข้มข้นไอออนเหล็กประมาณ (0-2000 ppm) จะใช้ช่วงงาน [5-13-13-2] คือ ช่วงงานที่มีอินพุต 5 โนด ชั้นซ่อนแรก 13 โนด ชั้นซ่อนที่สอง 13 โนด และเอาต์พุต 2 โนด ซึ่งแสดงผลการทำนายได้ดังนี้



รูปที่ 5.18 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง

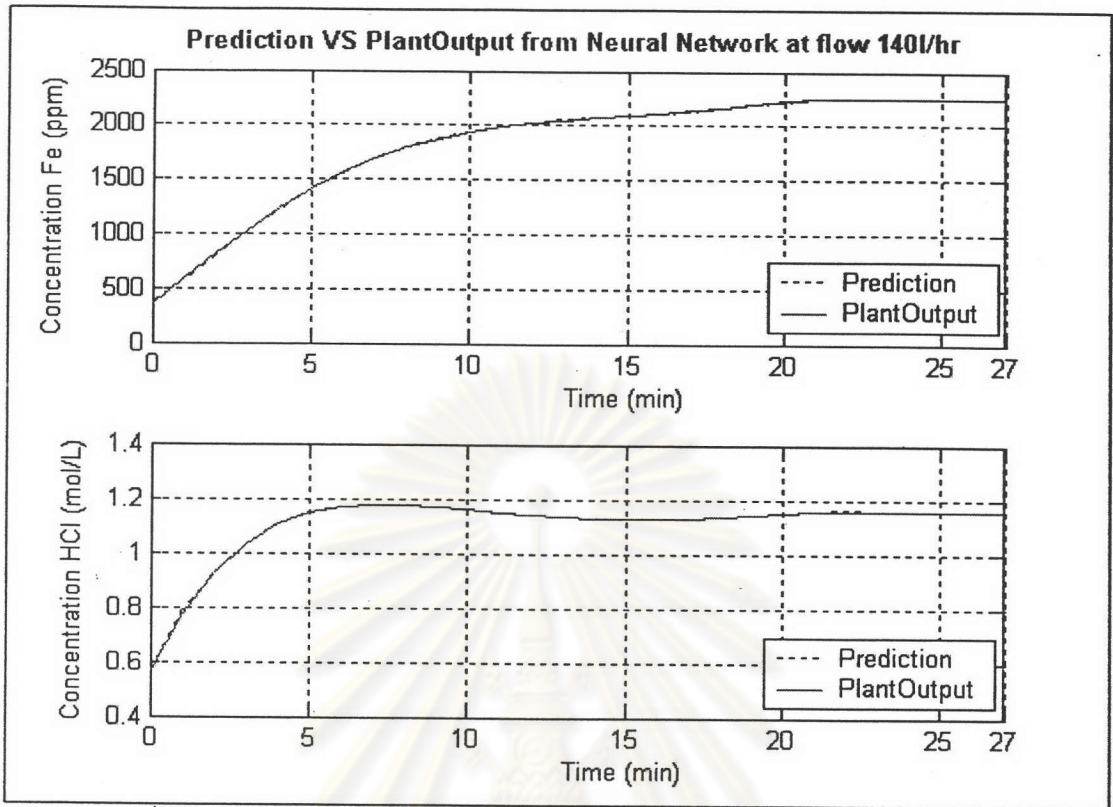
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



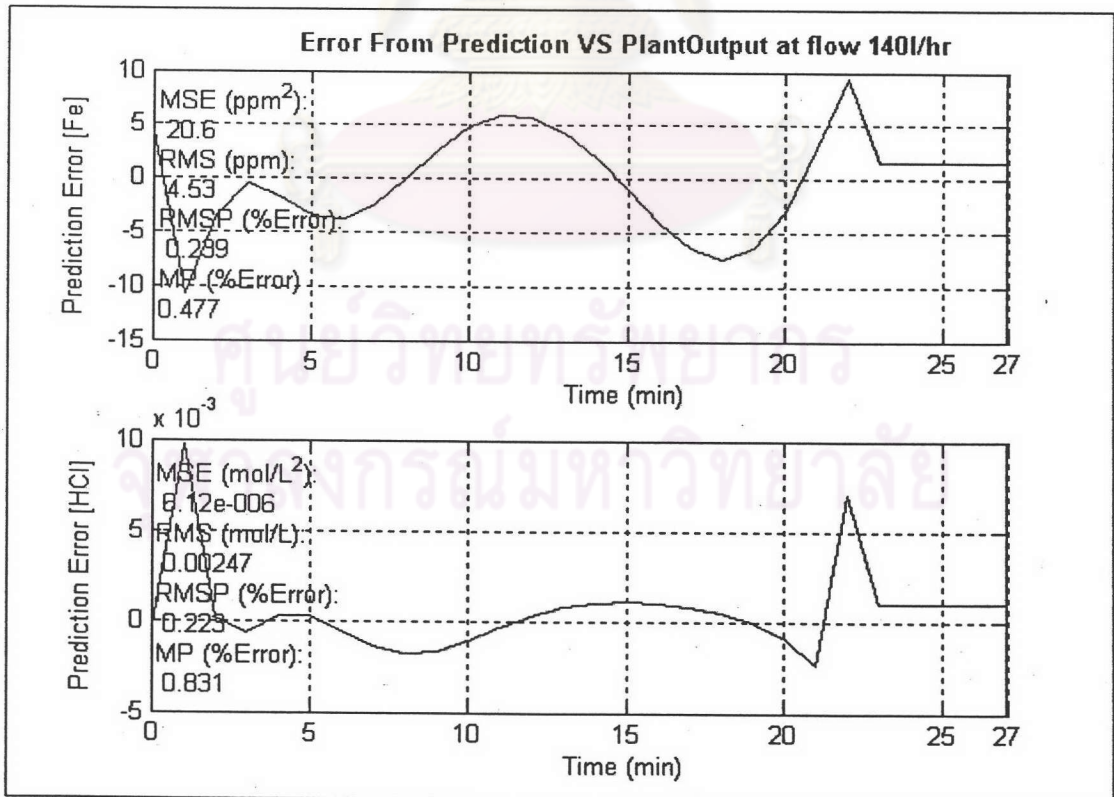
รูปที่ 5.19 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง

สำหรับอัตราการไหล 110 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.18, 5.19 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ที่มีความเข้มข้นไอออนเหล็กตั้งแต่ 0-2000 ppm ช่างงานสามารถทำนายได้ดีมาก ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) สูงสุด MP = 1.47% ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่ RMSP = 0.396%
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ช่างงานนี้สามารถทำนายได้ดี โดยค่า MP = 3.57% และค่า RMSP = 0.75%



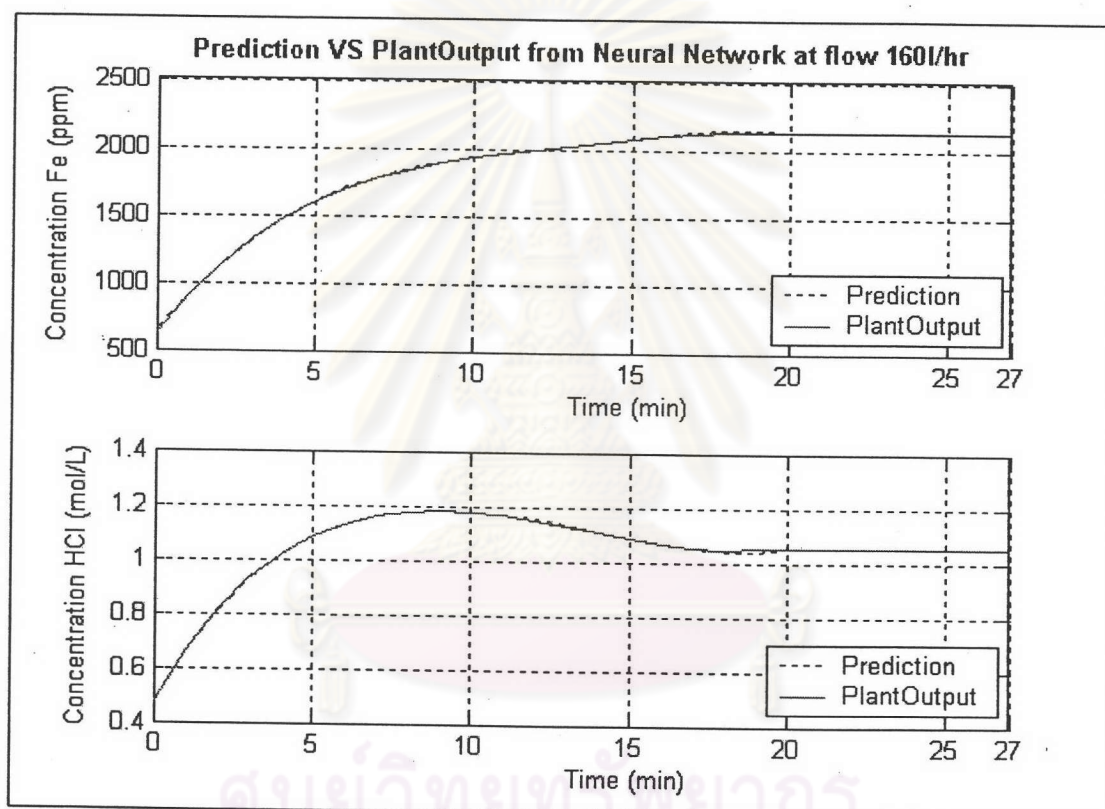
รูปที่ 5.20 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 140 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 5.21 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 140 ลิตรต่อชั่วโมง

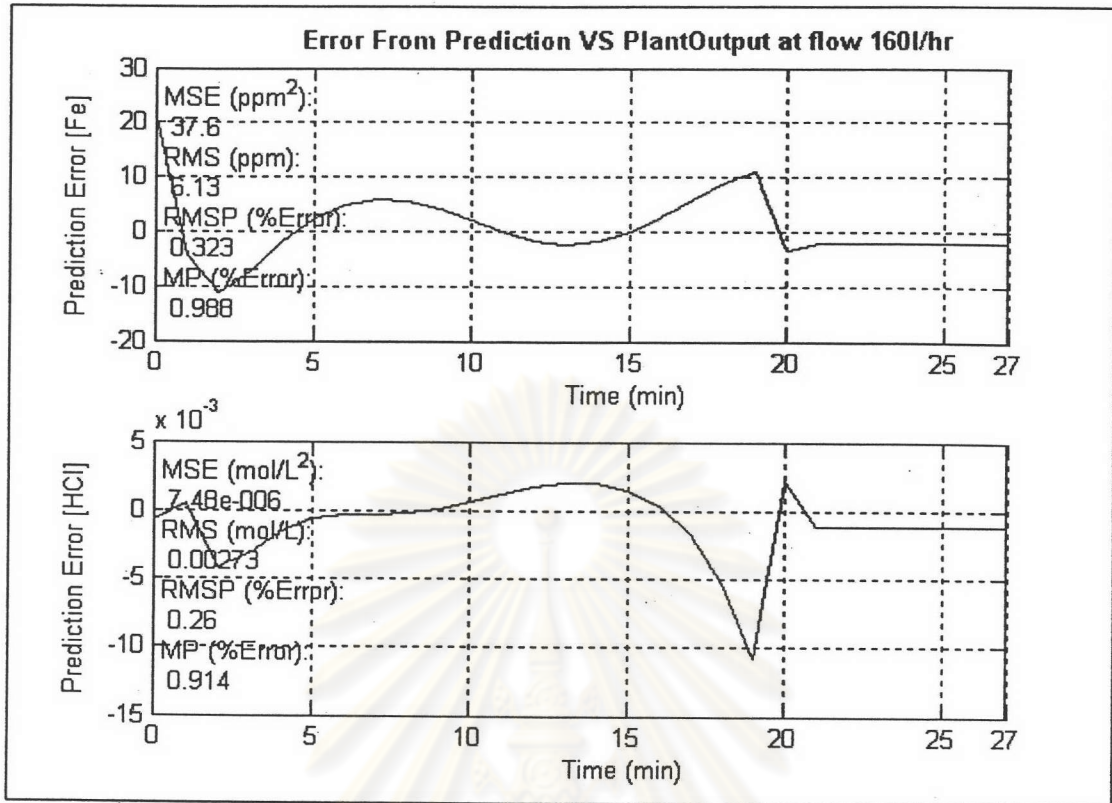
สำหรับอัตราการไหล 140 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.20,5.21 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ที่มีความเข้มข้นไอออนเหล็กตั้งแต่ 0-2000 ppm ช่างงานสามารถทำนายได้ดีมาก ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) สูงสุด  $MP = 0.477\%$  ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่  $RMSP = 0.239\%$
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ช่างงานนี้สามารถทำนายได้ดี โดยค่า  $MP = 0.831\%$  และค่า  $RMSP = 0.223\%$



รูปที่ 5.22 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 160 ลิตรต่อชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

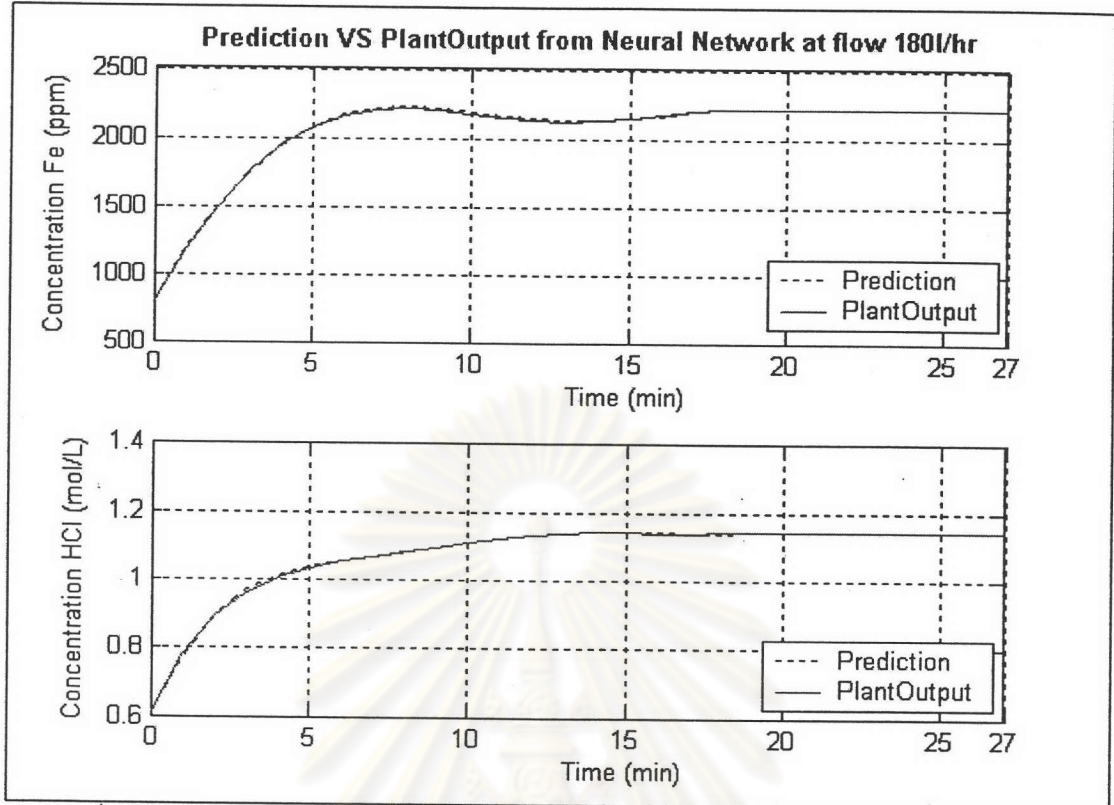


รูปที่ 5.23 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 160 ลิตรต่อชั่วโมง

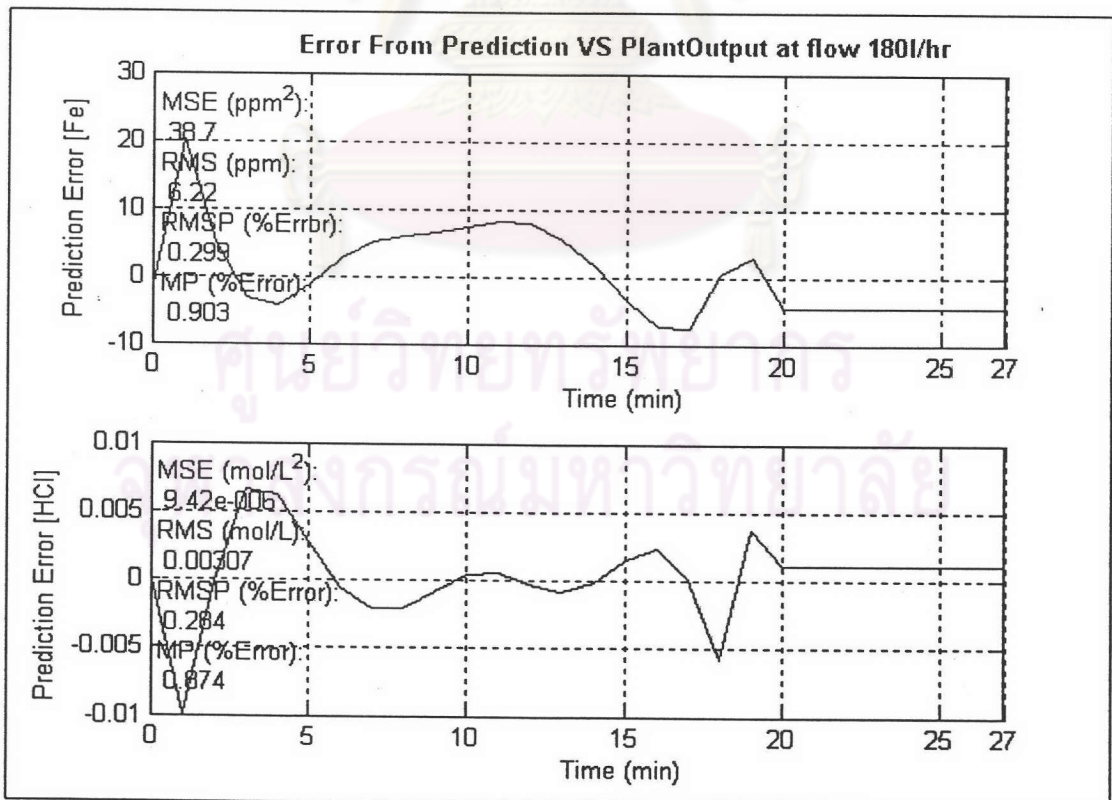
สำหรับอัตราการไหล 160 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.22,5.23 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ที่มีความเข้มข้นไอออนเหล็กตั้งแต่ 0-2000 ppm ข่ายงานสามารถทำนายได้ดีมาก ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) สูงสุด MP = 0.988% ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่ RMSP = 0.323%
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ข่ายงานนี้สามารถทำนายได้ดี โดยค่า MP = 0.914% และค่า RMSP = 0.26%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



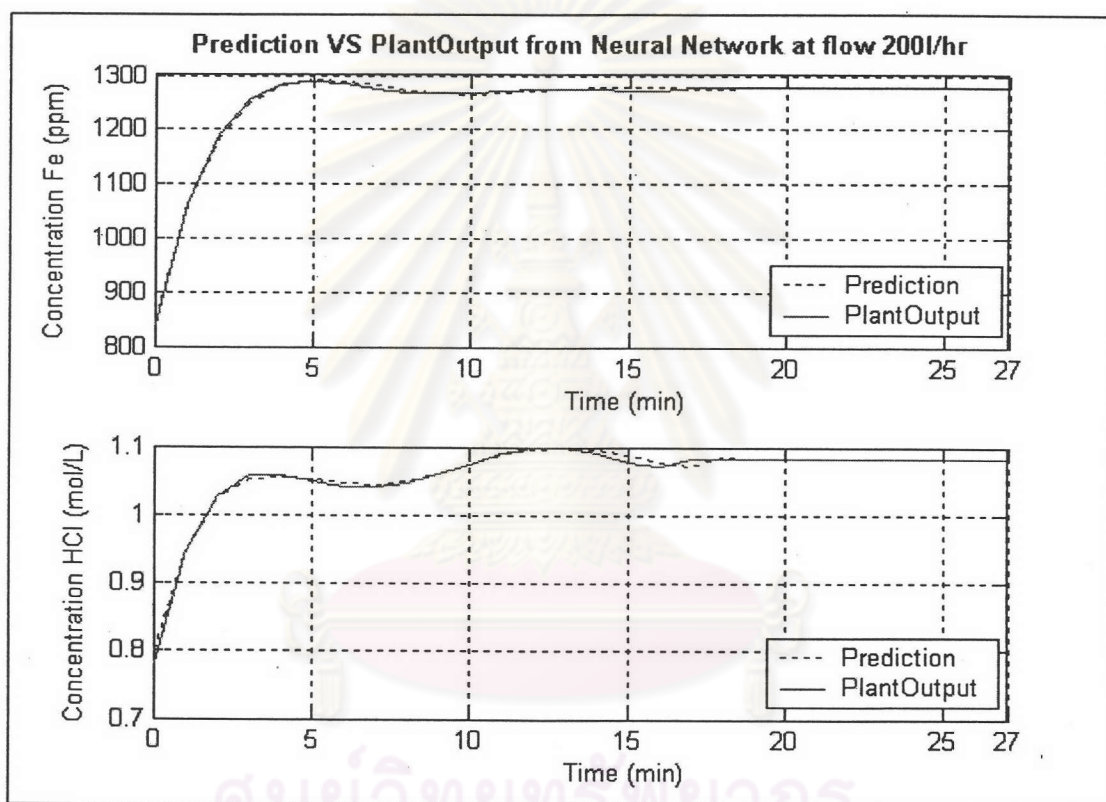
รูปที่ 5.24 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 5.25 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง

สำหรับอัตราการไหล 180 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.24,5.25 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

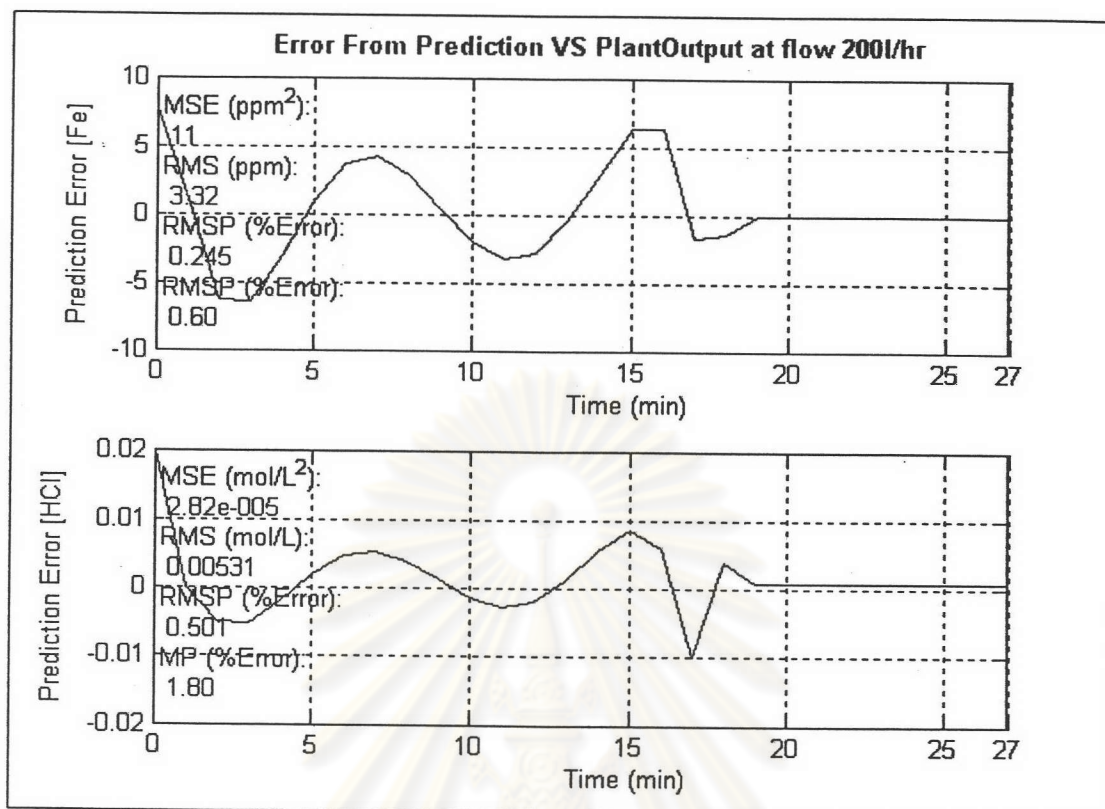
1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ที่มีความเข้มข้นไอออนเหล็กตั้งแต่ 0-2000 ppm ข่ายงานสามารถทำนายได้ดีมาก ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) สูงสุด  $MP = 0.903\%$  ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่  $RMSP = 0.299\%$
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ข่ายงานนี้สามารถทำนายได้ดี โดยค่า  $MP = 0.874\%$  และค่า  $RMSP = 0.284\%$



รูปที่ 5.26 แสดงผลการทำนายความเข้มข้น ณ อัตราการไหล 200 ลิตรต่อชั่วโมง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 5.27 แสดงค่าความผิดพลาดจากการทำนาย ณ อัตราการไหล 200 ลิตรต่อชั่วโมง

สำหรับอัตราการไหล 200 ลิตรต่อชั่วโมง จากรูปที่ 5.26 ,5.27 สามารถพิจารณาได้ดังนี้

1. ส่วนการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ที่มีความเข้มข้นไอออนเหล็กตั้งแต่ 0-2000 ppm หน่วยงานสามารถทำนายได้ดีมาก ซึ่งดัชนีเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดสูง (Maximum Percent Error Index) สูงสุด MP = 0.60% ส่วนเปอร์เซ็นต์รากค่าความผิดพลาด (Root Mean Square Percent Error Index) อยู่ที่ RMSP = 0.245%
2. ส่วนการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก หน่วยงานนี้สามารถทำนายได้ดี โดยค่า MP = 1.80% และค่า RMSP = 0.501%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากการวิเคราะห์โดยภาพรวมสามารถกล่าวได้ว่า แบบจำลองของข่ายงานนิวรัลนี้ที่ใช้ทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก ข่ายงานสามารถทำนายได้ดีตลอดช่วงความเข้มข้นไอออนเหล็ก ระหว่าง 0-2000 ppm ค่า MP อยู่ในช่วง 0.60 – 1.47% ส่วน RMSP อยู่ในช่วง 0.24 – 0.39% และในส่วนของทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก ข่ายงานสามารถทำนายได้ดีมากในช่วงความเข้มข้นไอออนเหล็กระหว่าง 0-2000 ppm และค่า MP อยู่ในช่วง 0.83 – 3.57% และค่า RMSP อยู่ในช่วง 0.22 – 0.75% ตามตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 แสดงดัชนีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด MP และ RMSP ของการแลกเปลี่ยนไอออนลบ

อัตราการไหล (ลิตรต่อชั่วโมง)	ความเข้มข้นไอออนเหล็ก		ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก	
	MP (%Error)	RMSP (%Error)	MP (%Error)	RMSP (%Error)
110	1.47	0.39	3.57	0.75
140	0.48	0.24	0.83	0.22
160	0.98	0.32	0.91	0.26
180	0.90	0.29	0.87	0.28
200	0.60	0.25	1.80	0.50

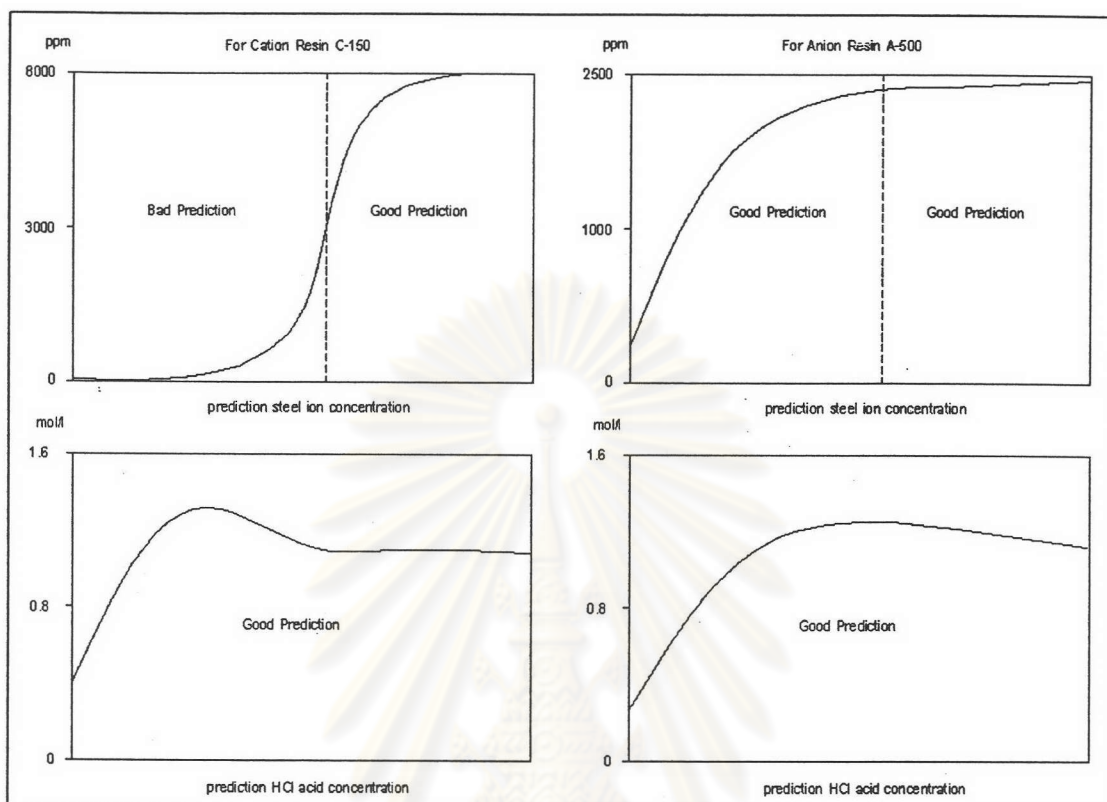
#### 5.4.3 วิเคราะห์การทำนายการแลกเปลี่ยนไอออน โดยแบบจำลองข่ายงานนิวรัล

โดยภาพรวมของการทำนาย ซึ่งสามารถแบ่งได้ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกสำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนบวก จากตารางที่ 5.5 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก 7.65 – 15.30% เมื่อพิจารณาจากรูปผลการทำนายพฤติกรรมของแบบจำลอง [5-11-13-2]/[5-8-9-2] นี้แล้ว ในช่วงแรกที่มีความเข้มข้นไอออนเหล็ก 0-3000ppm แบบจำลองไม่สามารถทำนายได้เลย เนื่องจาก

1. ผลการทดลองจากกระบวนการในช่วงแรกความเข้มข้นไอออนเหล็กซึ่งมีค่าต่ำมากๆ
2. ในขั้นตอนการนำข้อมูลมา Normalize ทำให้ได้ค่าที่แตกต่างกันชัดเจน
3. ข่ายงานยังไม่สามารถจับความสัมพันธ์ของรูปแบบชุดข้อมูลที่มีความแตกต่างกันมากได้

ส่วนการทำนายในช่วงหลังที่ความเข้มข้นไอออนเหล็ก 3000-6000ppm สามารถทำนายได้ดีมาก และการทำนายความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.95 – 3.47% ซึ่งมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมาก และ ส่วนที่สองสำหรับการแลกเปลี่ยนประจุลบ จากตารางที่ 5.6 มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดจากการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก 0.24 – 0.39% และความเข้มข้นกรด

ไฮโดรคลอริก 0.22 – 0.75% เมื่อพิจารณาจากรูปผลการทำนายพฤติกรรมของแบบจำลอง [5-13-13-2] นี้แล้วมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองจริงมาก



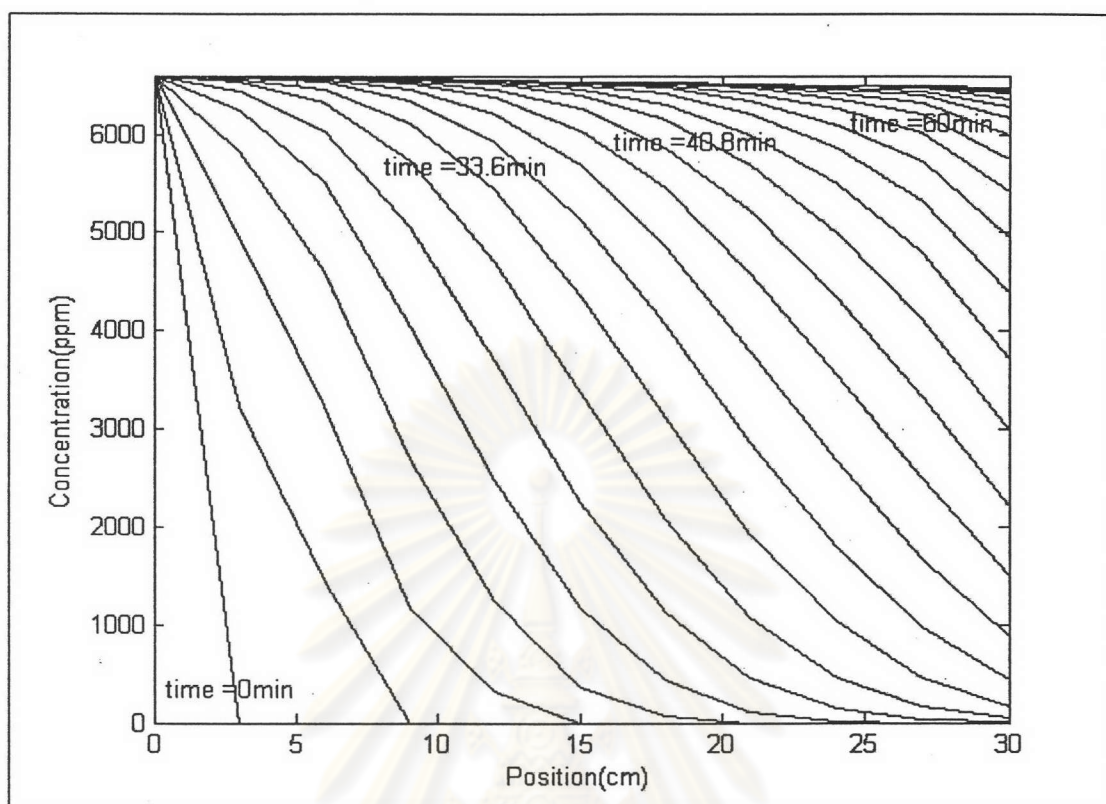
รูปที่ 5.28 แสดงลักษณะกราฟที่ช่างงานนิเวศสามารถทำนายได้

## 5.5 ผลการเปรียบเทียบการทดลองจริง ช่างงานนิเวศ และการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

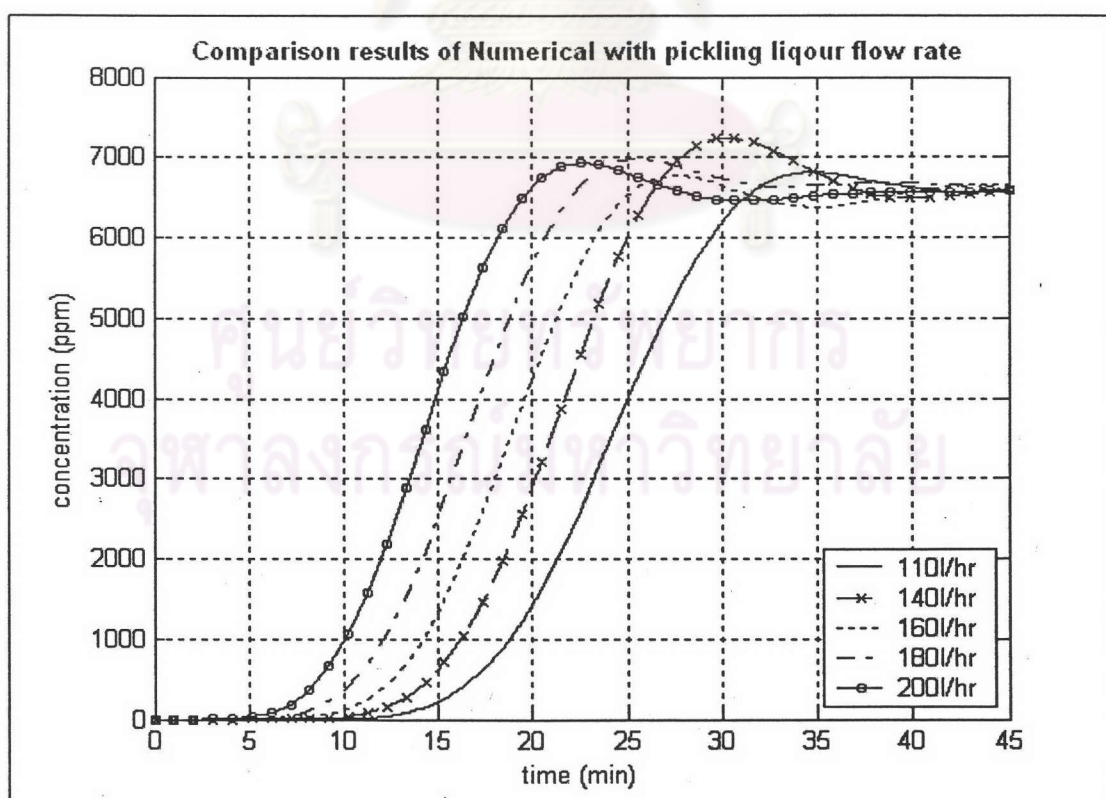
### 5.5.1 การแก้ปัญหาสมการอนุพันธ์ย่อย ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

รูปที่ 5.29 แสดงลักษณะการกระจายความเข้มข้นไอออนเหล็กที่คำนวณได้ตลอดความสูงของหอเรซิน ซึ่งเริ่มต้นจากค่าความเข้มข้นไอออนเหล็กคงที่ 6600 ppm และเรซินเริ่มดูดซับ ทำให้บริเวณปลายหอ ไม่มีความเข้มข้นไอออนเหล็กออกมา หลังจากเวลาผ่านไป เรซินเริ่มอิ่มตัว ทำให้บริเวณปลายหอมีความเข้มข้นไอออนเหล็กค่อยๆ เพิ่มมากขึ้น จนกระทั่ง เรซินไม่สามารถดูดซับความเข้มข้นไอออนเหล็กได้อีก บริเวณปลายหอ ณ เวลาสุดท้ายจึงมีค่าเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้น จึงหยุดการทดลอง

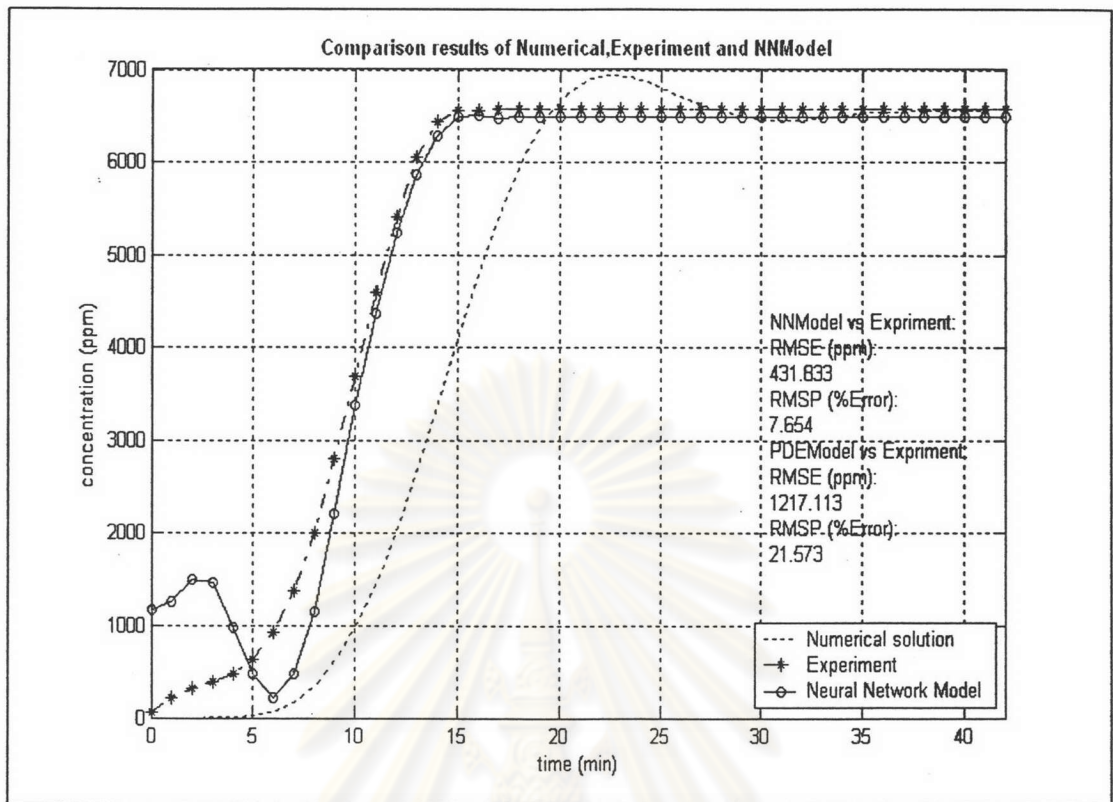
ผลคำตอบของการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย



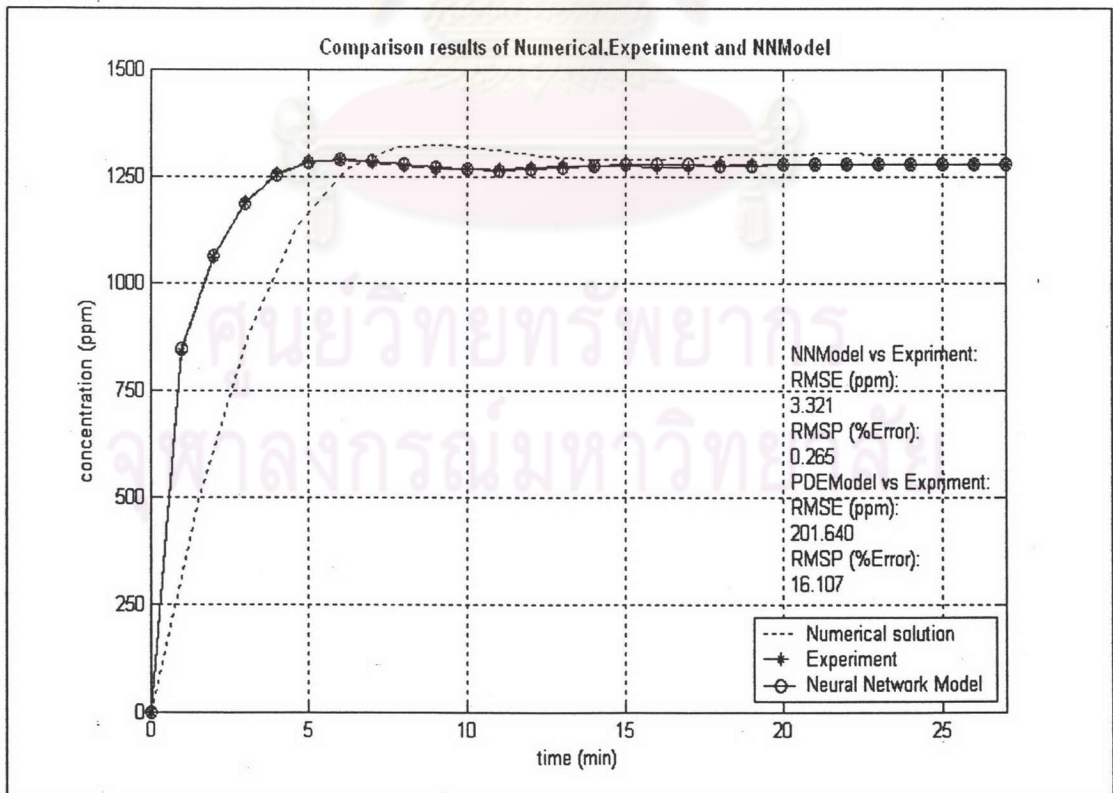
รูปที่ 5.29 แสดงลักษณะการกระจายความเข้มข้นไอออนเหล็ก



รูปที่ 5.30 แสดงไฟล์ผลความเข้มข้นของสมการดูดซับทั่วไป



รูปที่ 5.31 แสดงการเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเข้มข้นของการแลกเปลี่ยนไอออนบวก



รูปที่ 5.32 แสดงการเปรียบเทียบโพรไฟล์ความเข้มข้นของการแลกเปลี่ยนไอออนลบ

## 5.6 สรุปผลการจำลอง

จากผลการจำลองที่ประกอบด้วย การทดลองกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแสดงถึงประสิทธิภาพการดูดซับไอออนเหล็กได้ 70% และประสิทธิภาพการนำกลับกรดมาใช้ใหม่สูงถึง 90% จึงมีความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาระบบการแลกเปลี่ยนไอออนต่อไป การคัดเลือกขบวนการที่พิจารณาจากค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ซึ่งในการค้นหาขบวนการที่เหมาะสมเป็นแบบลองผิดลองถูก ในงานวิจัยจึงมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจำนวนมาก โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดคือ [5-11-13-2]/[5-8-9-2] สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนบวก ผลการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็กผิดพลาด 7.65–15.30% และความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกผิดพลาด 0.95–3.47% และ [5-13-13-2] สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนลบ ผลการทำนายความเข้มข้นไอออนเหล็ก 0.24–0.39% และความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 0.22 – 0.75% ส่วนการเปรียบเทียบผลการทำนายกับวิธีเชิงตัวเลข แบบจำลองขบวนการนิเวศให้ผลที่ดีกว่าเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเพียง 7.65% สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนบวก และ 0.265% สำหรับการแลกเปลี่ยนไอออนลบ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย