

## รายการอ้างอิง

- [1] ชเนศ ศรีวิรุฬห์ชัย. 2541. การรู้จำตัวอักษรพิมพ์ภาษาไทยโดยใช้เทคนิคด้านการวิเคราะห์ตัวประกอบสำคัญและนิเวรอลเน็ตเวิร์ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] ชาญฤทธิ์ สันตินานาเลิศ. 2542. การออกแบบและพัฒนาโปรแกรมโอซีอาร์ภาษาไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] Y. L. Cun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R.E. Howard, W. Hubbard and L.D. Jackel. 1990. Handwritten Digit Recognition with a Back-Propagation Network. Advances in Neural Information Processing Systems 2(ed Touratsky) pp 396-404.
- [4] P. L. Grother. 1992. Karhunen Loeve Feature Extraction for Neural Handwritten Character Recognition . Proceeding Application of Artificial Neural Network III: pp 396-404.
- [5] สุขวสา พิชิตเดช. 2544. การรู้จำตัวอักษรพิมพ์ภาษาไทยโดยการใช้กลุ่มก้อนของนิเวรอลเน็ตเวิร์ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] สุกรี สันธิภิญโญ. 2541. การประยุกต์การโปรแกรมตรรกะเชิงอุปนัยและแบบคพอพทกชันนิเวรอลเน็ตเวิร์กในการรู้จำตัวพิมพ์อักษรไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [7] พัฒนชัย เบศรภิญโญวงศ์. 2545. การรู้จำตัวอักษรไทยโดยใช้ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนและเคอร์เนล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [8] อภิญญา สุพรรณวรรณา. 2544. การประยุกต์ใช้การโปรแกรมตรรกะเชิงอุปนัยในการรู้จำตัวพิมพ์อักษรภาษาไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [9] S-W. Lee and Y-L. Kim. 1995. A New Type of Recurrent Neural Network for Handwritten Character Recognition. The Third International Conference on Document Analysis and Recognition. pp 38-41

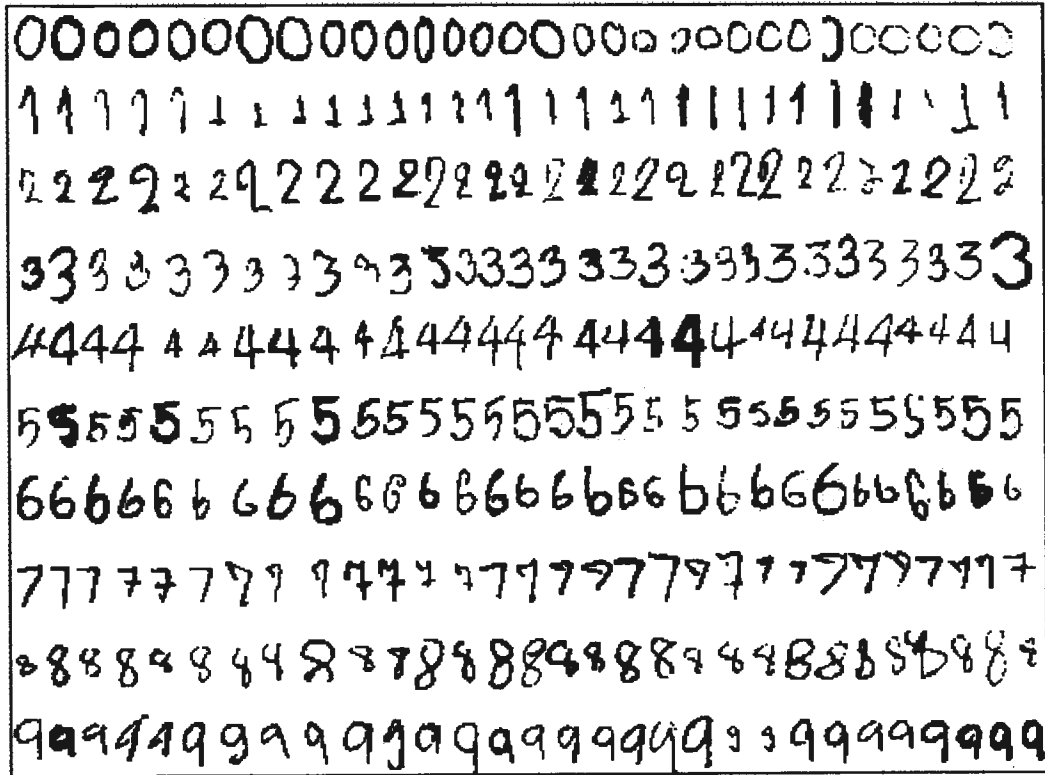
- [10] R. C. Gonzales and R. E. Woods. 2003. Digital Image Processing. Addison Wesley.
- [11] C. M. Bishop. 1995. Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford University Press.
- [12] A. K. Jain, J. Mao and K. Mohiuddin. 1996. Artificial Neural Networks: A Tutorial. IEEE Computer (March 1996) : pp 31-44.
- [13] T.M. Mitchell. 1997. Machine Learning. New York : The McGraw-Hill Companies.
- [14] J. C. Principe, N. R. Euliano and W. C. Lefebvre. 2000. Neural and Adaptive System Fundamentals Through Simulations. New York : John Wiley & Sons.
- [15] M. Jordan. 1986. A Parallel Distributed Processing Approach. Inst Cognitive Sci ICS REP. 8604.
- [16] J. L. Elman. 1990. Finding Structure in Time. Inst Cognitive Sci 14 : 179-211.

ภาคผนวก

123069289

ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างลายมือเขียนตัวเลข 0 - 9 ที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ ก-1 ตัวอย่างลายมือเขียนตัวเลข 0 - 9 ที่ใช้ในการทดลอง

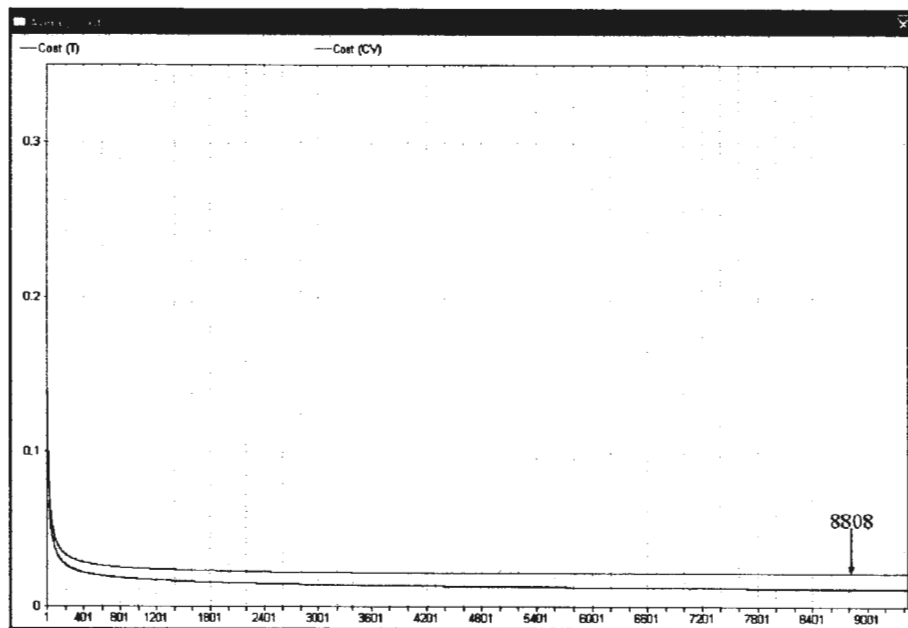
ข้อมูลลายมือเขียนตัวเลขที่ใช้ในการทดลอง เป็นภาพขาวดำ มีขนาดที่แตกต่างกัน โดยมีขนาดตั้งแต่ 21 x 36 จุด (Pixel) ถึง 40 x 36 จุด ซึ่งจะปรับขนาดของรูปภาพให้มีขนาด 32 x 32 จุด เท่ากันทุกรูป และใช้หลักการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบสำคัญในการลดขนาดของรูปภาพให้มีขนาด 250 จุด

## ภาคผนวก ข.

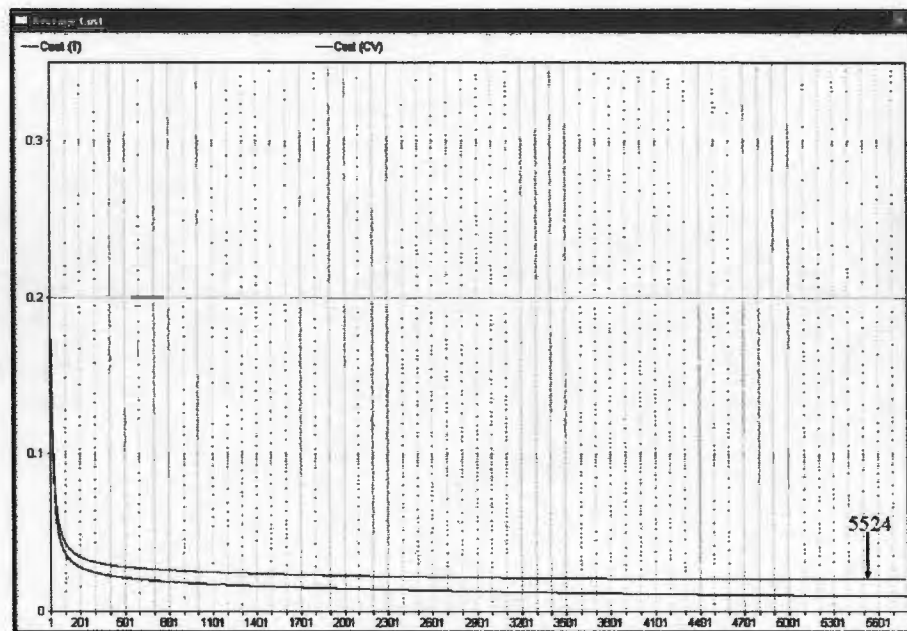
### กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ ของเน็ตเวิร์ก

จากกราฟ แกน x แทนจำนวนรอบในการเรียนรู้ แกน y แทนค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด โดยแสดงกราฟของ  $Cost(T)$  และ  $Cost(CV)$  เมื่อ  $Cost(T)$  แทน กราฟของข้อมูลสอน และ  $Cost(CV)$  แทน กราฟของเซตตรวจสอบ เน็ตเวิร์กจะหยุดการเรียนรู้ภายใต้เงื่อนไข ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดระหว่างเอาต์พุตของเน็ตเวิร์กกับเอาต์พุตของข้อมูลสอนของเซตตรวจสอบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะเวลา โดยมีลูกศรชี้ไปยังกราฟของเซตตรวจสอบ และตัวเลขที่อยู่เหนือลูกศรแสดงรอบที่ให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของเซตตรวจสอบที่น้อยที่สุด

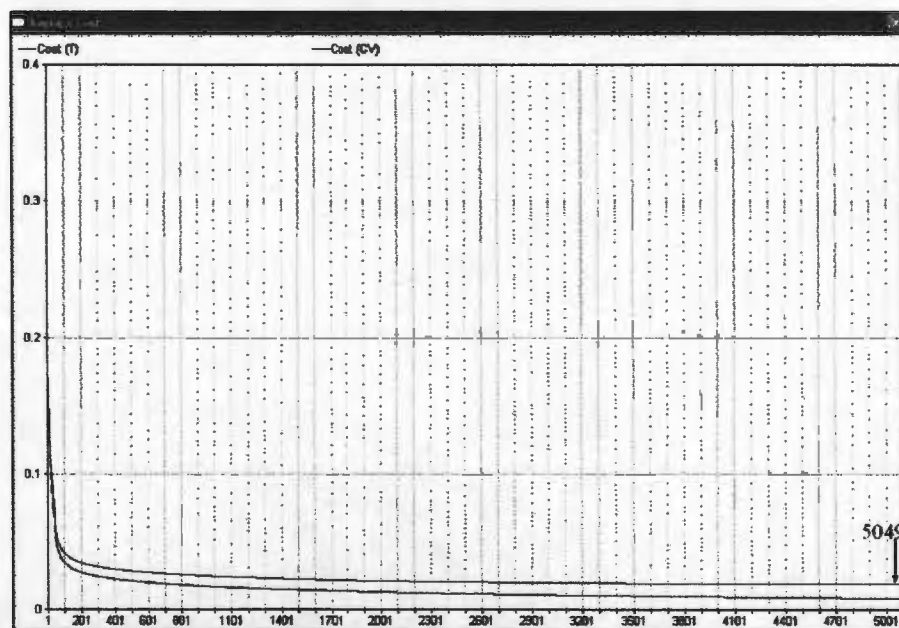
สำหรับนิเวศเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 40 60 125 โหนด จะเรียนรู้ 9,450 5,790 5,100 และ 4,400 รอบ ตามลำดับ



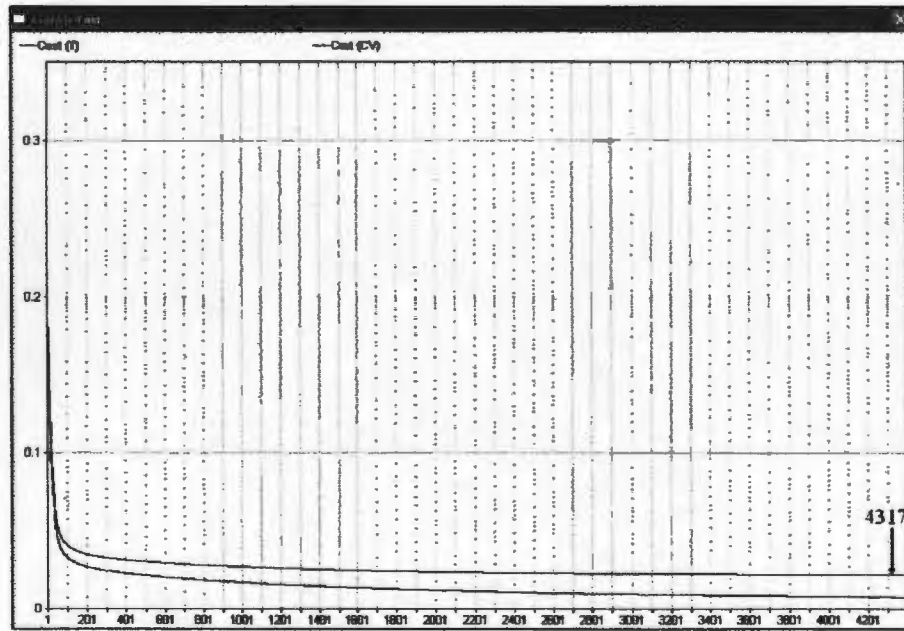
รูปที่ ข-1 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิเวศเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 โหนด



รูปที่ ข-2 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิเวรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด



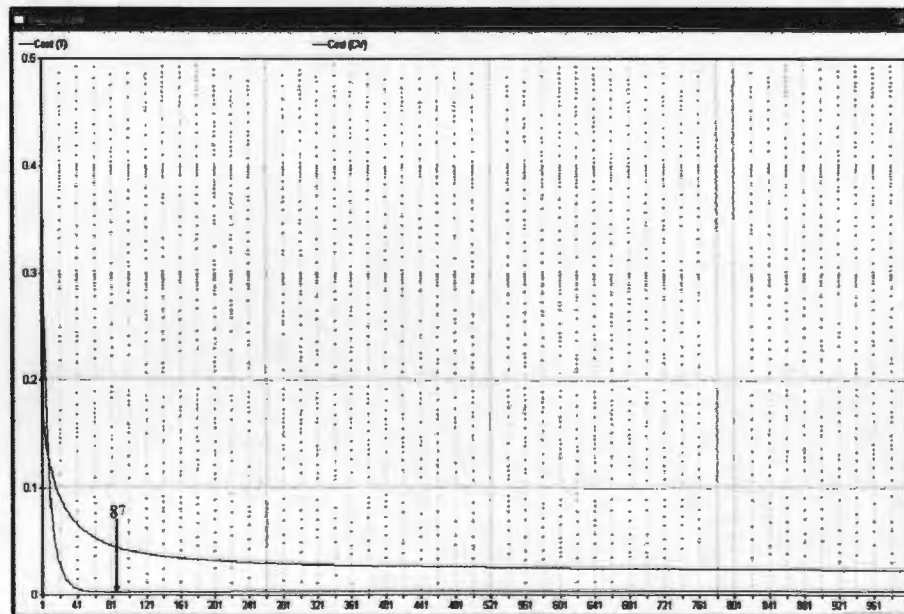
รูปที่ ข-3 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิเวรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 60 โหนด



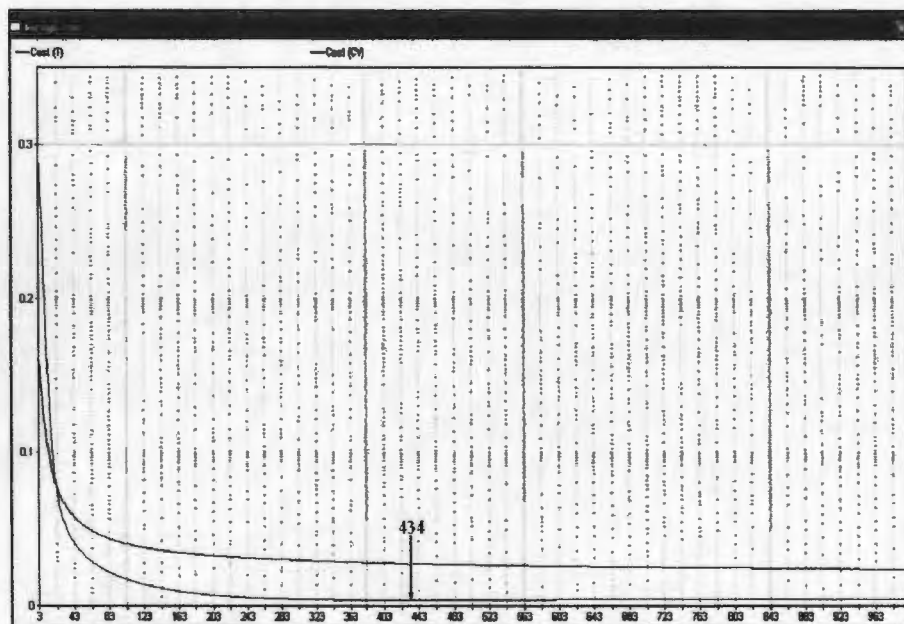
รูปที่ ข-4 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิรอกเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 125 โหนด

จากรูปที่ ข-1 ถึง ข-4 พบว่า ในช่วงแรกของการเรียนรู้กราฟของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบตกลงอย่างรวดเร็ว ค่อยมากกราฟค่อย ๆ ลดลง เมื่อกราฟของเซตตรวจสอบตกลงถึงจุดหนึ่งก็จะไม่ลดลง แต่กราฟของข้อมูลสอนยังคงตกลงต่อไป

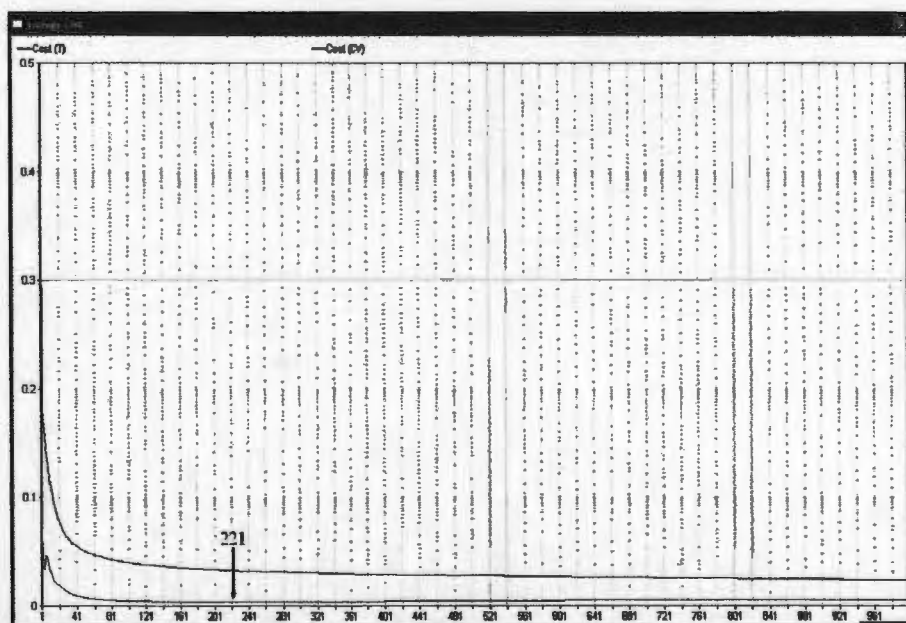
สำหรับนิรอกเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 1 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 40 60 125 โหนด จะเรียนรู้ 1,000 1,002 1,000 และ 1,116 รอบ ตามลำดับ



รูปที่ ข-5 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิรอกเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 โหนด

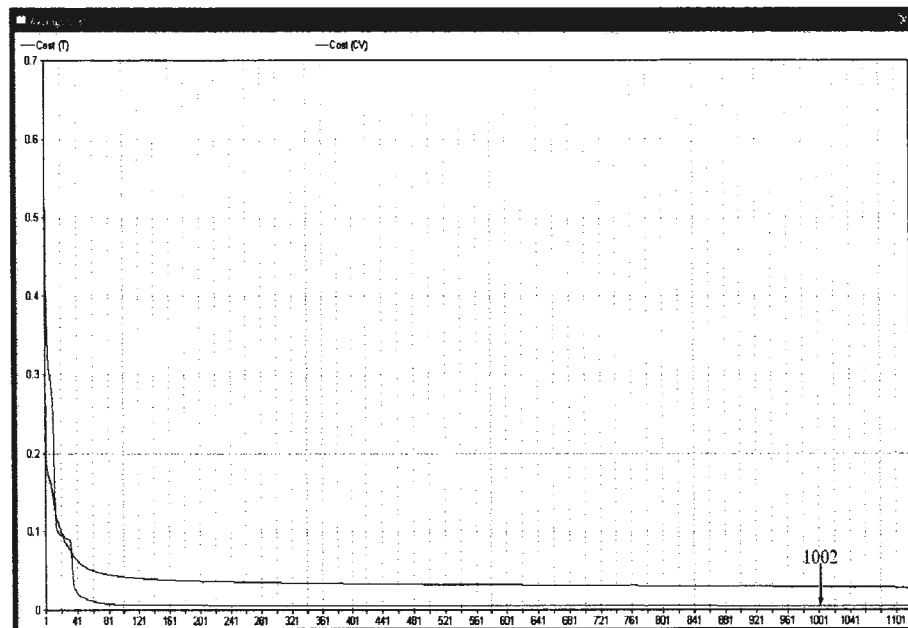


รูปที่ ข-6 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเขตตรวจสอบ  
ของนิรอกเน็คควีร์กแบบวงกตกับ โครงสร้างที่ 1 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด



รูปที่ ข-7 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเขตตรวจสอบ  
ของนิรอกเน็คควีร์กแบบวงกตกับ โครงสร้างที่ 1 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 60 โหนด

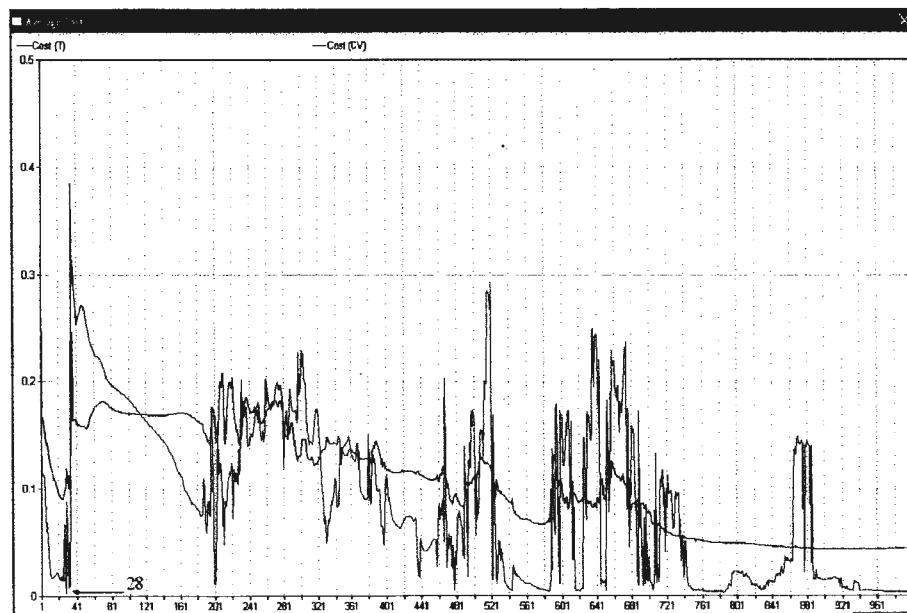




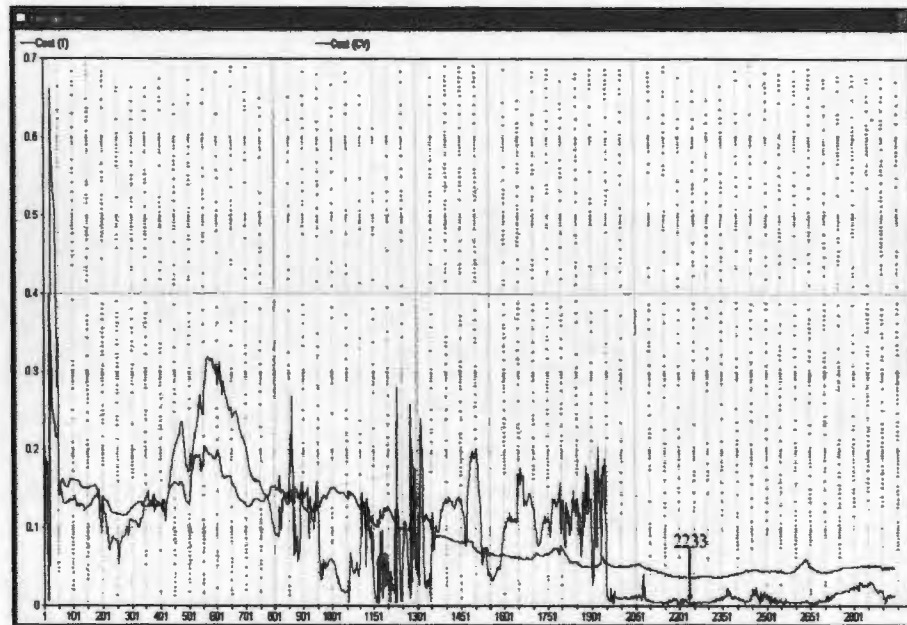
รูปที่ ข-8 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวนกลับ โครงสร้างที่ 1 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 125 โหนด

จากรูปที่ ข-5 ถึง ข-8 พบว่า ในช่วงแรกของการเรียนรู้กราฟของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อมากราฟค่อย ๆ ลดลง เมื่อกราฟของเซตตรวจสอบลดลงถึงจุดหนึ่งก็จะไม่ลดลง แต่กราฟของข้อมูลสอนยังคงลดลงต่อไป

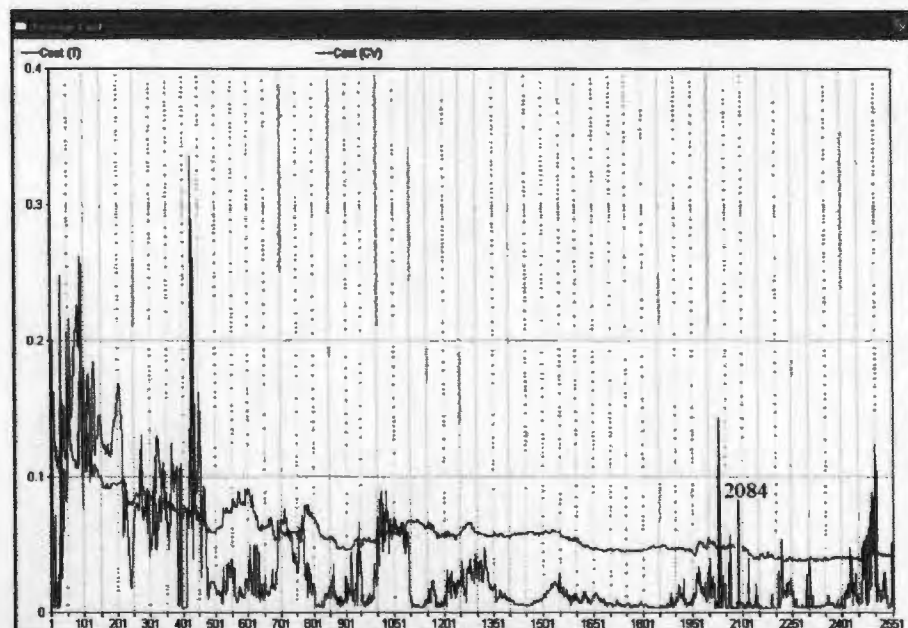
สำหรับนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวนกลับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 40 60 125 โหนด จะเรียนรู้ 1,000 2,940 2,553 และ 1,000 รอบ ตามลำดับ



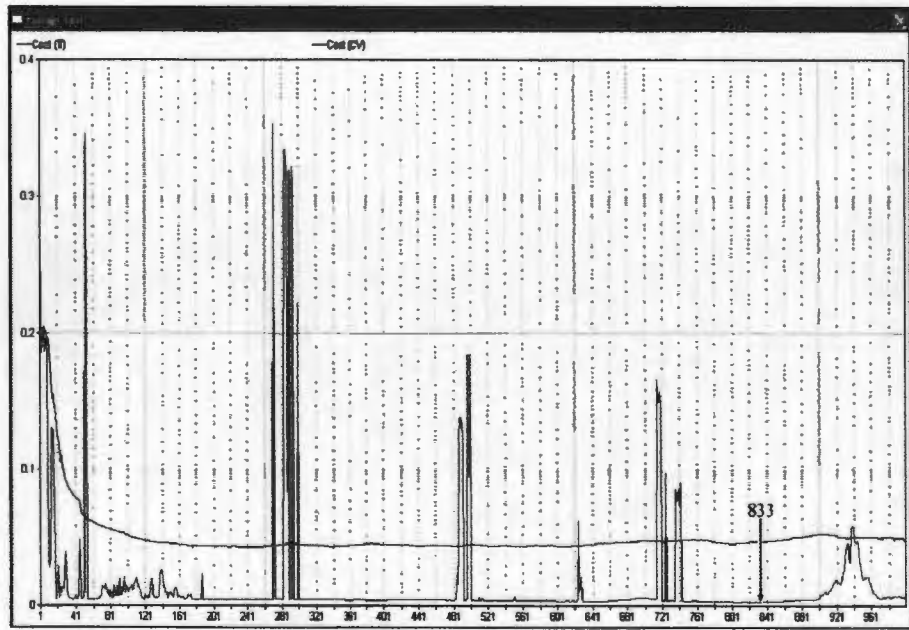
รูปที่ ข-9 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวนกลับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 โหนด



รูปที่ ข-10 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ  
ของนิเวศน์เควิร์กแบบวกกลับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด



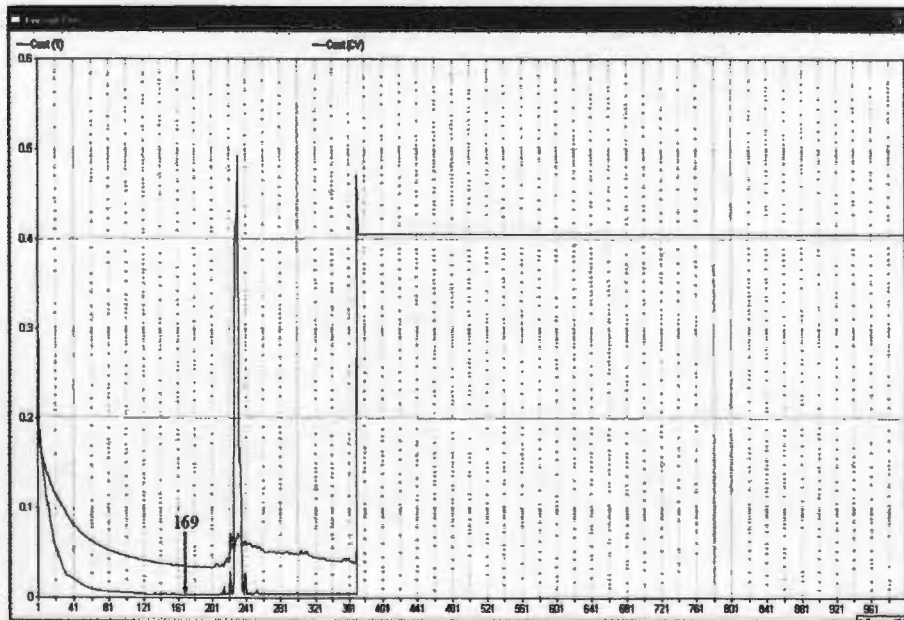
รูปที่ ข-11 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ  
ของนิเวศน์เควิร์กแบบวกกลับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 60 โหนด



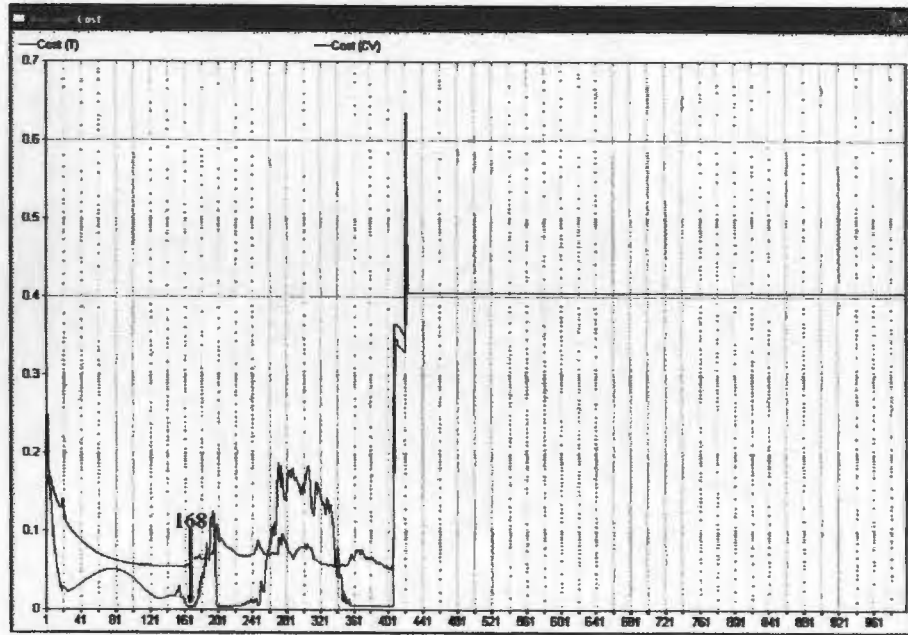
รูปที่ ข-12 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ  
ของนิเวศน์เควีร์กแบบวงกลมกับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 125 โหนด

จากรูปที่ ข-9 ถึง ข-12 พบว่า กราฟของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบจะเพิ่มขึ้น  
และตกลงอย่างรวดเร็ว ในบางช่วงก็มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

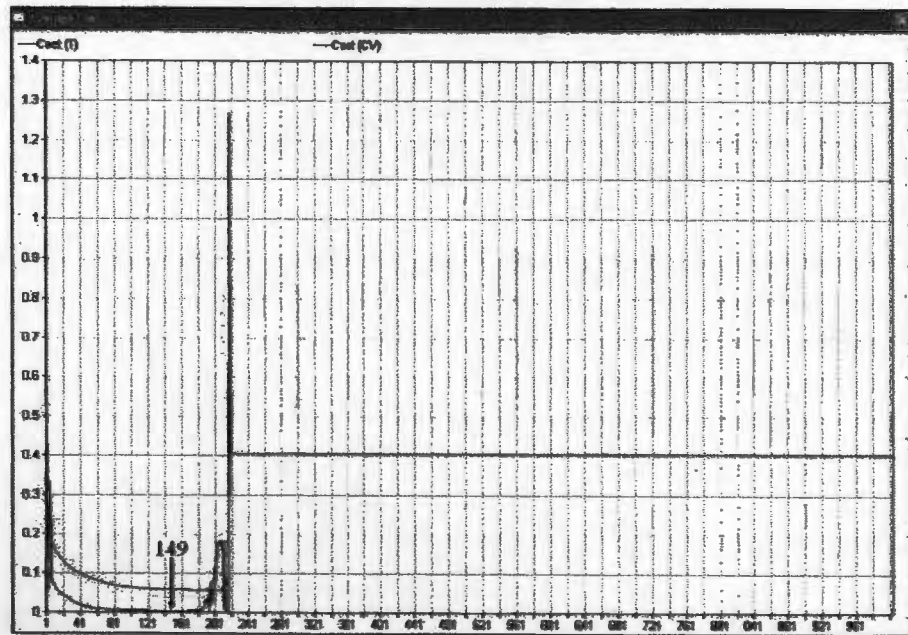
สำหรับนิเวศน์เควีร์กแบบวงกลมกับ โครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อน  
เท่ากับ 20 40 60 125 โหนด จะเรียนรู้ 1,000 1,000 1,002 และ 1,005 รอบ ตามลำดับ



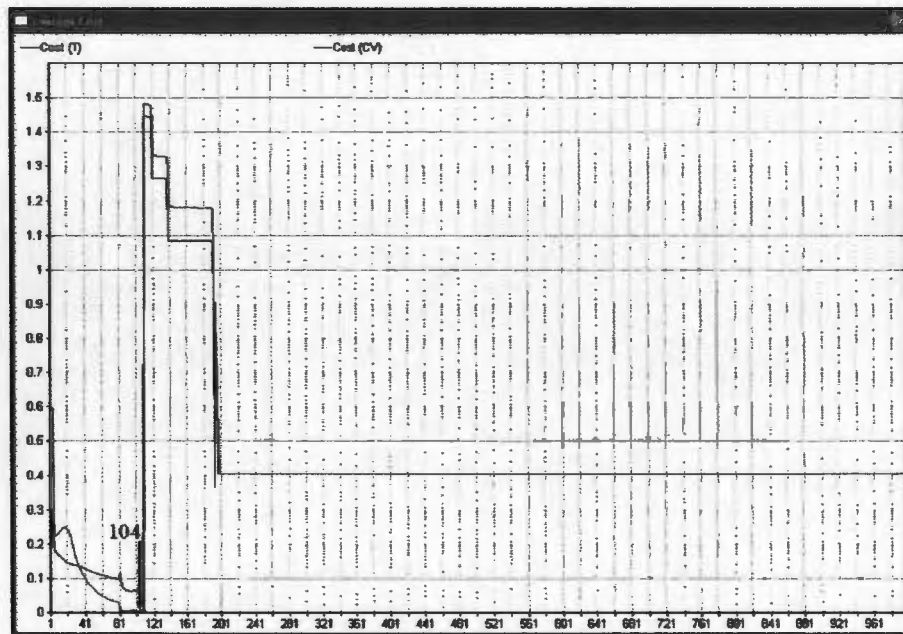
รูปที่ ข-13 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ  
ของนิเวศน์เควีร์กแบบวงกลมกับ โครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 โหนด



รูปที่ ข-14 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิเวศน์เดวีร์กแบบวกกลับ โครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด



รูปที่ ข-15 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิเวศน์เดวีร์กแบบวกกลับ โครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 60 โหนด



รูปที่ ข-16 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิเวศน์เน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 125 โหนด

จากรูปที่ ข-13 ถึง ข-16 พบว่า ช่วงแรกของการเรียนรู้ กราฟของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบจะลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อมากราฟค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งกราฟเพิ่มขึ้นสูงอย่างรวดเร็วและลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน หลังจากนั้นกราฟจะคงที่ที่จุดหนึ่ง โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ภาคผนวก ค.

ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของเน็ตเวิร์กทั้งสี่

ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวน โหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 40 60 และ 125 โหนด ตามลำดับ แสดงดังตาราง ค-1 ถึง ค-4

ตารางที่ ค-1 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวน โหนด ในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,950	0	1	22	6	3	9	3	0	6
1	1	3,843	43	17	26	7	13	21	7	22
2	36	57	3,617	28	28	31	27	34	116	26
3	20	26	16	3,626	13	114	8	53	78	46
4	35	23	109	29	3,630	20	31	31	20	72
5	24	8	9	90	27	3,712	59	28	28	15
6	32	12	17	6	17	38	3,856	1	20	1
7	2	29	17	12	25	18	2	3,801	37	57
8	8	25	62	55	74	69	56	56	3,507	88
9	44	32	8	57	78	26	3	27	54	3,671

จากตาราง ค-1 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนาย ถูกต้อง 3,950 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 98.75% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 3,507 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 87.68% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลข ที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากสุดไปน้อยสุด ได้แก่ เลข 0 6 1 7 5 9 4 3 2 และ 8 ทำนาย ถูกต้อง 3,950 3,856 3,843 3,801 3,712 3,671 3,630 3,626 3,617 และ 3,507 ตัวอย่าง ตามลำดับ

เมื่อมีโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนาย ได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,945 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 98.63% ตัวเลข ที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 3,718 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 92.95% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 1 6 7 5 4 9 3 2 และ 8 ทำนายถูกต้อง 3,945 3,906 3,889 3,838 3,768 3,758 3,718 3,679 3,674 และ 3,567 ตัวอย่าง ตามลำดับ ดังตาราง ค-2

ตารางที่ ค-2 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวนโหนด  
ในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,945	0	4	33	5	0	5	3	1	4
1	0	3,906	30	9	22	0	7	6	6	14
2	35	37	3,674	28	19	32	32	34	82	27
3	16	15	18	3,679	14	108	8	39	53	50
4	12	25	53	15	3,758	7	17	29	20	64
5	19	2	6	79	12	3,768	52	21	28	13
6	17	8	10	10	16	27	3,889	1	20	2
7	2	23	18	5	31	13	1	3,838	25	44
8	5	19	80	53	54	62	38	56	3,567	66
9	34	17	9	40	75	21	2	40	44	3,718

เมื่อมีโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 60 โหนด พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนาย  
ได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,943 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 98.58% ตัวเลข  
ที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 3,604 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น  
90.10% เมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 6 1 7 5 4 3 9  
2 และ 8 ทำนายถูกต้อง 3,943 3,887 3,876 3,829 3,796 3,769 3,716 3,715 3,659 และ 3,604  
ตัวอย่าง ตามลำดับ ดังตาราง ค-3

ตารางที่ ค-3 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่มีจำนวนโหนด  
ในชั้นซ่อนเท่ากับ 60 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,943	0	5	31	3	7	3	1	2	5
1	1	3,876	31	10	31	6	13	8	9	15
2	29	47	3,659	25	38	38	15	32	93	24
3	10	12	17	3,716	11	93	5	41	60	35
4	17	31	39	23	3,769	10	6	31	15	59
5	14	5	9	68	15	3,796	32	22	25	14
6	19	12	11	6	15	23	3,887	0	26	1
7	4	18	24	6	26	14	2	3,829	32	45
8	6	14	54	53	50	67	37	49	3,604	66
9	28	17	9	48	67	21	5	38	52	3,715

ตารางที่ ค-4 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีจำนวนโหนด  
ในชั้นซ่อนเท่ากับ 125 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,935	0	7	30	4	7	5	5	3	4
1	1	3,888	27	9	23	1	10	14	8	19
2	23	33	3,669	13	29	42	25	26	111	29
3	12	18	22	3,678	18	97	2	27	73	53
4	15	27	50	17	3,755	13	13	22	29	59
5	21	3	5	99	16	3,747	37	30	36	6
6	31	11	7	6	16	32	3,860	2	33	2
7	6	24	15	16	27	7	3	3,825	31	46
8	8	22	61	67	55	58	41	53	3,565	70
9	38	25	11	54	82	20	0	37	49	3,684

จากตาราง ค-4 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนาย  
ถูกต้อง 3,935 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 98.38% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ  
เลข 8 ทำนายถูกต้อง 3,565 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 89.13% เมื่อเรียงลำดับตัวเลข  
ที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 1 6 7 4 5 9 3 2 และ 8 ทำนายได้ถูกต้อง 3,935  
3,888 3,860 3,825 3,755 3,747 3,684 3,678 3,669 และ 3,565 ตัวอย่าง ตามลำดับ

การทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้าของเน็ตเวิร์กทั้งสี่  
สรุปได้ว่า เลข 0 เป็นเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด ในขณะที่เลข 8 เป็นเลขที่ถูกทำนายได้ถูกต้อง  
น้อยที่สุด

ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 ที่มี  
จำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 40 60 และ 125 โหนด ตามลำดับ แสดงดังตาราง ค-5 ถึง ค-8

เมื่อมีโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 โหนด พบว่า เลข 7 เป็นตัวเลขที่ทำนาย  
ได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,432 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 85.80% ตัวเลข  
ที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 2,678 ตัวอย่างจาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น  
66.95% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 7 1 0 6 3 2  
5 9 4 และ 8 ทำนายถูกต้อง 3,432 3,421 3,378 3,362 3,158 3,123 3,021 2,912 2,726 และ  
2,678 ตัวอย่าง ตามลำดับ ดังตาราง ค-5



ตารางที่ ค-5 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 1 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,378	9	43	222	8	63	116	70	30	61
1	1	3,421	194	98	62	12	7	96	52	57
2	25	76	3,123	137	25	79	71	186	233	45
3	44	118	55	3,158	12	245	24	161	119	64
4	52	161	114	173	2,726	62	103	250	150	209
5	49	33	34	425	66	3,021	61	120	112	79
6	45	19	90	66	66	176	3,362	11	156	9
7	37	81	37	116	51	85	3	3,432	45	113
8	19	57	168	254	116	185	108	222	2,678	193
9	66	86	21	184	158	84	20	340	129	2,912

เมื่อมีโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือทำนายถูกต้อง 3,784 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 94.60% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 2,976 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 74.40% เมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 7 9 1 8 5 2 6 4 และ 3 ทำนายได้ถูกต้อง 3,784 3,582 3,487 3,468 3,355 3,322 3,263 3,082 3,063 และ 2,976 ตัวอย่าง ตามลำดับ ดังตาราง ค-6

ตารางที่ ค-6 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 1 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,784	0	12	63	7	31	5	11	53	34
1	1	3,468	127	23	18	11	5	71	196	80
2	49	41	3,263	55	24	61	19	64	345	79
3	46	30	42	2,976	7	212	6	131	367	183
4	22	83	98	57	3,063	23	42	77	354	181
5	39	21	27	178	36	3,322	17	63	190	107
6	73	16	49	25	86	151	3,082	6	506	6
7	7	25	18	27	21	43	1	3,582	127	149
8	14	33	84	74	94	58	18	89	3,355	181
9	50	22	14	47	110	25	0	76	169	3,487

ตารางที่ ค-7 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 60 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,893	1	14	44	11	6	13	4	1	13
1	7	3,461	173	88	61	22	5	75	63	45
2	106	46	3,318	77	43	57	62	90	119	82
3	79	27	22	3,422	24	166	26	58	97	79
4	62	97	95	154	2,989	52	80	91	172	208
5	140	11	23	402	51	3,030	79	84	64	116
6	130	11	56	35	25	97	3,585	4	47	10
7	45	42	16	90	61	50	0	3,483	81	132
8	35	37	171	157	152	141	183	110	2,732	282
9	77	39	9	121	93	30	5	95	120	3,411

จากตาราง ค-7 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,893 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 97.33% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 2,732 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 68.30% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 6 7 1 3 9 2 5 4 และ 8 ทำนายได้ถูกต้อง 3,893 3,585 3,483 3,461 3,422 3,411 3,318 3,030 2,989 และ 2,732 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ ค-8 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 125 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,883	0	22	23	7	8	4	5	11	37
1	16	3,601	108	28	24	0	5	28	143	47
2	54	123	3,337	36	25	28	29	32	279	57
3	72	84	66	3,134	14	123	3	45	206	253
4	63	76	135	52	3,130	7	35	84	217	201
5	120	48	42	339	50	2,753	30	84	330	204
6	134	30	111	35	91	83	3,073	14	418	11
7	24	67	34	59	43	22	2	3,415	122	212
8	13	40	142	66	122	50	39	53	3,200	275
9	58	18	27	63	96	26	4	82	130	3,496

จากตาราง ค-8 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือทำนายถูกต้อง 3,883 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 97.08% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 5 ทำนายถูกต้อง 2,753 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 68.83% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 1 9 7 2 8 3 4 6 และ 5 ทำนายได้ถูกต้อง 3,883 3,601 3,496 3,415 3,337 3,200 3,134 3,130 3,073 และ 2,753 ตัวอย่าง ตามลำดับ

สรุปผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอรลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 1 ทั้งสี่เน็ตเวิร์ก พบว่า เลข 0 เป็นเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุดเป็นส่วนใหญ่ ขณะที่สองในสี่เน็ตเวิร์ก เลข 8 เป็นเลขที่ถูกทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด

ตาราง ค-9 ถึง ค-12 แสดงผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอรลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 40 60 และ 125 โหนด ตามลำดับ ตารางที่ ค-9 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอรลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	2,980	15	14	52	37	2	893	0	1	6
1	57	2,770	180	44	859	1	31	9	10	39
2	243	126	2,809	137	162	52	157	22	217	75
3	220	66	11	2,590	151	429	168	102	76	187
4	50	71	34	68	3,558	11	45	12	30	121
5	199	15	21	169	223	2,699	563	17	12	82
6	60	19	0	2	430	2	3,459	0	17	11
7	11	164	80	132	264	377	0	2,742	16	214
8	80	37	167	81	595	178	212	33	2,075	542
9	42	32	21	77	721	410	41	85	136	2,435

จากตาราง ค-9 พบว่า เลข 4 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,558 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 88.95% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 2,075 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 51.88% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 4 6 0 2 1 7 5 3 9 และ 8 ทำนายถูกต้อง 3,558 3,459 2,980 2,809 2,770 2,742 2,699 2,590 2,435 และ 2,075 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ ค-10 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,102	21	33	104	15	3	562	2	3	155
1	0	3,736	55	63	87	0	8	24	2	25
2	7	231	3,483	92	43	4	80	13	20	27
3	9	98	41	3,621	56	52	30	16	8	69
4	3	355	39	246	3,184	1	36	18	15	103
5	6	62	55	1,196	338	2,033	204	28	9	69
6	8	27	88	281	452	109	3,028	1	4	2
7	5	66	107	902	224	25	2	2,407	143	119
8	3	99	165	1,298	614	76	308	59	1,271	107
9	8	60	7	243	369	10	6	25	8	3,264

จากตาราง ค-10 พบว่า เลข 1 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,736 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 93.40% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 1,271 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 31.78% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 1 3 2 9 4 0 6 7 5 และ 8 ทำนายได้ถูกต้อง 3,736 3,621 3,483 3,264 3,184 3,102 3,028 2,407 2,033 และ 1,271 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ ค-11 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 60 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,859	1	3	15	13	133	1,754	0	135	87
1	144	177	54	29	1596	21	546	30	1,154	249
2	246	28	1,009	120	86	257	625	15	1,576	38
3	227	10	14	709	64	933	1,480	12	366	185
4	35	9	26	35	3,102	0	238	1	170	384
5	19	6	6	80	269	2,364	894	45	209	108
6	7	3	12	3	95	18	3,727	0	129	6
7	33	0	7	17	705	883	49	1,859	124	323
8	11	2	14	91	336	121	805	26	2,538	56
9	54	0	1	10	509	137	170	9	822	2,288

จากตาราง ค-11 พบว่า เลข 6 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,727 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 93.18% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 1 ทำนายถูกต้อง 177 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 4.43% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 6 4 8 5 9 0 7 2 3 และ 1 ทำนายถูกต้อง 3,727 3,102 2,538 2,364 2,288 1,859 1,859 1,009 709 และ 177 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ ค-12 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 2 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 125 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,089	20	216	84	23	62	503	0	3	0
1	12	3,778	24	3	132	19	27	1	4	0
2	98	702	2,658	19	116	90	265	7	44	1
3	50	718	282	1,308	229	1,143	193	16	56	5
4	65	652	68	23	3,005	39	105	21	21	1
5	55	319	172	46	256	2,891	220	4	36	1
6	52	84	32	3	193	137	3,482	0	17	0
7	77	1,018	267	30	549	623	4	1,398	29	5
8	40	639	297	30	833	410	426	11	1,307	7
9	206	702	390	40	813	745	29	43	129	903

จากตาราง ค-12 พบว่า เลข 1 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,778 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 94.45% ส่วนตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 903 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 22.58% เมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 1 6 0 4 5 2 7 3 8 และ 9 ทำนายถูกต้อง 3,778 3,482 3,089 3,005 2,891 2,658 1,398 1,308 1,307 และ 903 ตัวอย่าง ตามลำดับ

สรุปผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 2 ทั้งสี่เน็ตเวิร์ก พบว่าสองในสี่เน็ตเวิร์กเลข 1 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด ในขณะที่เลข 8 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด

ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 40 60 และ 125 โหนด ตามลำดับ แสดงดังตาราง ค-13 ถึง ค-16

ตารางที่ ค-13 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 20 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,836	0	20	112	2	2	21	6	0	1
1	8	3,859	40	11	4	2	8	14	12	42
2	138	193	3,355	73	10	49	46	87	42	7
3	101	109	63	3,490	3	56	15	98	54	11
4	159	133	112	53	3,018	36	110	110	44	225
5	246	37	24	1,055	7	2,433	84	52	56	6
6	185	28	33	45	16	89	3,570	4	30	0
7	103	59	19	44	7	14	3	3,681	19	51
8	110	91	224	425	24	183	115	138	2,632	58
9	410	71	44	339	22	31	18	115	78	2,872

จากตาราง ค-13 พบว่า เลข 1 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,859 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 96.48% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 5 ทำนายถูกต้อง 2433 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 60.83% เมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 1 0 7 6 3 2 4 9 8 และ 5 ทำนายถูกต้อง 3,859 3,836 3,681 3,570 3,490 3,355 3,018 2,872 2,632 และ 2,433 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ ค-14 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 40 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,934	17	24	3	8	5	1	5	0	3
1	3	3,864	67	1	3	3	9	5	1	44
2	58	536	3,261	0	10	25	55	29	9	17
3	258	1,606	476	924	20	160	43	205	46	262
4	47	935	120	0	2,532	17	138	33	3	175
5	138	269	115	15	41	3,208	103	64	18	29
6	120	214	102	0	53	263	3,228	2	16	2
7	41	322	49	0	34	6	2	3,484	3	59
8	73	1,115	764	1	125	134	244	146	1,164	234
9	211	344	52	0	98	12	1	137	14	3,131

จากตาราง ค-14 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,934 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 98.35% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 3 ทำนายถูกต้อง 924 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 23.10% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 1 7 2 6 5 9 4 8 และ 3 ทำนายถูกต้อง 3,934 3,864 3,484 3,261 3,228 3,208 3,131 2,532 1,164 และ 924 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ ค-15 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 60 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,966	0	5	6	9	1	8	0	0	5
1	38	2,149	167	2	1,500	10	28	3	5	98
2	479	43	3,101	0	120	32	77	23	27	98
3	1,133	54	232	1,245	201	455	31	53	41	555
4	123	14	116	14	3,439	17	104	5	4	164
5	304	15	26	46	196	3,194	93	14	4	108
6	275	6	6	3	65	40	3,595	1	6	3
7	294	9	64	1	595	57	4	2,481	4	491
8	280	16	316	13	637	248	179	40	1,733	538
9	238	8	6	9	253	22	1	7	2	3,454

จากตาราง ค-15 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 3,966 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 99.15% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 3 ทำนายถูกต้อง 1245 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 31.13% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 6 9 4 5 2 7 1 8 และ 3 ทำนายถูกต้อง 3,966 3,595 3,454 3,439 3,194 3,101 2,481 2,149 1,733 และ 1,245 ตัวอย่าง ตามลำดับ

เมื่อมีโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 125 โหนด เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนาย ถูกต้อง 3,881 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 97.03% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 1 ทำนายถูกต้อง 643 ตัวอย่าง จาก 4,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 16.08% เมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อยได้แก่เลข 0 2 9 6 4 7 5 3 8 และ 1 ทำนายถูกต้อง 3,881 3,654 3,595 3,560 3,014 2,864 2,829 2,559 2,029 และ 643 ตัวอย่าง ตามลำดับ ดังตาราง ค-16

ตารางที่ ค-16 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 3 ที่มีจำนวนโหนดในชั้นซ้อนเท่ากับ 125 โหนด

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	3,881	3	52	12	10	4	12	4	1	21
1	119	643	964	43	2,001	2	7	20	3	198
2	112	34	3,654	10	42	11	28	15	14	80
3	282	80	325	2,559	58	153	11	51	60	421
4	70	181	235	25	3,014	5	48	23	12	387
5	237	79	115	192	94	2,829	138	54	20	242
6	150	17	131	8	78	25	3,560	2	11	18
7	106	98	266	14	174	15	1	2,864	18	444
8	88	139	544	100	231	52	137	46	2,029	634
9	144	37	36	52	80	8	5	22	21	3,595

สรุปผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 3 ทั้งสี่เน็ตเวิร์ก ส่วนใหญ่แล้วเลข 0 เป็นเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด ในขณะที่สองในสี่เน็ตเวิร์ก เลข 3 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด

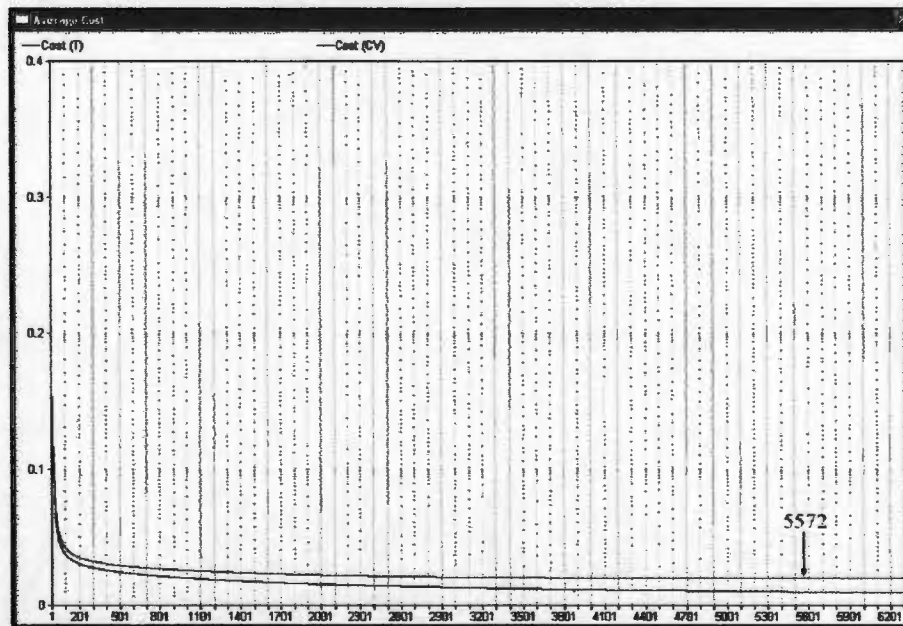


ภาคผนวก ง.

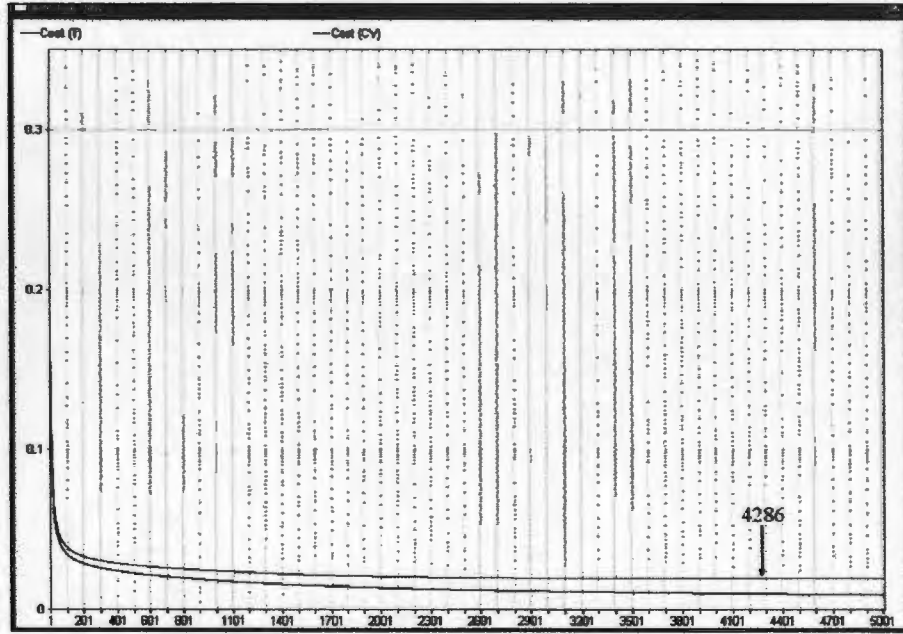
กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ  
ของเน็ตเวิร์กที่ทดลองแบบการตรวจสอบไขว้ 5 พับ

จากกราฟ แกน x แทนจำนวนรอบในการเรียนรู้ แกน y แทนค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด โดยแสดงกราฟของ  $Cost(T)$  และ  $Cost(CV)$  เมื่อ  $Cost(T)$  แทน กราฟของข้อมูลสอน และ  $Cost(CV)$  แทน กราฟของเซตตรวจสอบ เน็ตเวิร์กหยุดการเรียนรู้ภายใต้เงื่อนไขค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดระหว่างเอาท์พุทของเน็ตเวิร์กกับเอาท์พุทของข้อมูลสอนของเซตตรวจสอบมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะเวลา โดยมีลูกศรชี้ไปยังกราฟของเซตตรวจสอบ และตัวเลขที่อยู่เหนือลูกศรแสดงรอบที่ให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของเซตตรวจสอบที่น้อยที่สุด

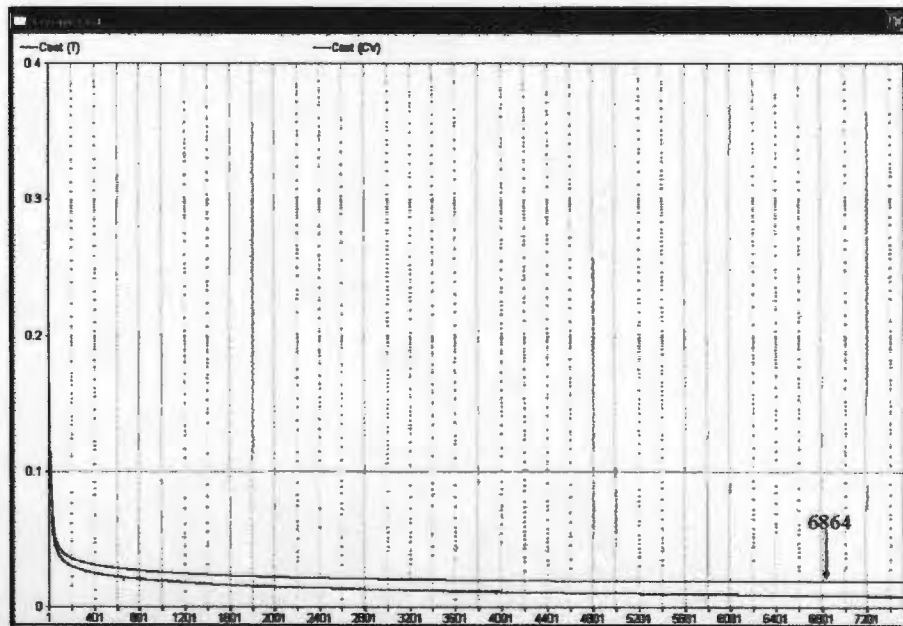
สำหรับนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ที่ทดลองแบบการตรวจสอบไขว้ 5 พับ ในพับที่ 1 2 3 4 และ 5 จะเรียนรู้ 6,330 5,003 7,525 6,482 และ 5,210 รอบ ตามลำดับ



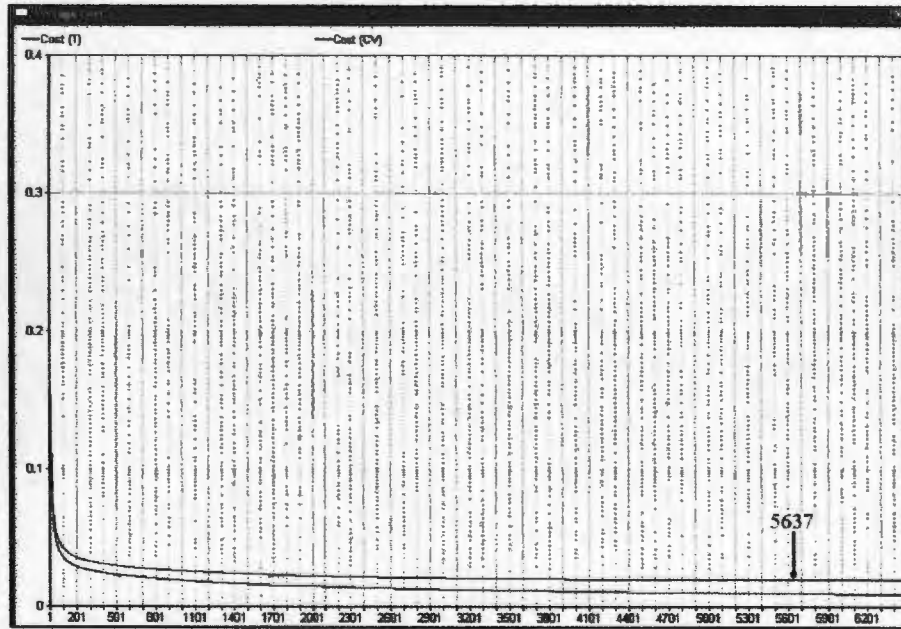
รูปที่ ง-1 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า พับที่ 1 (Fold 1)



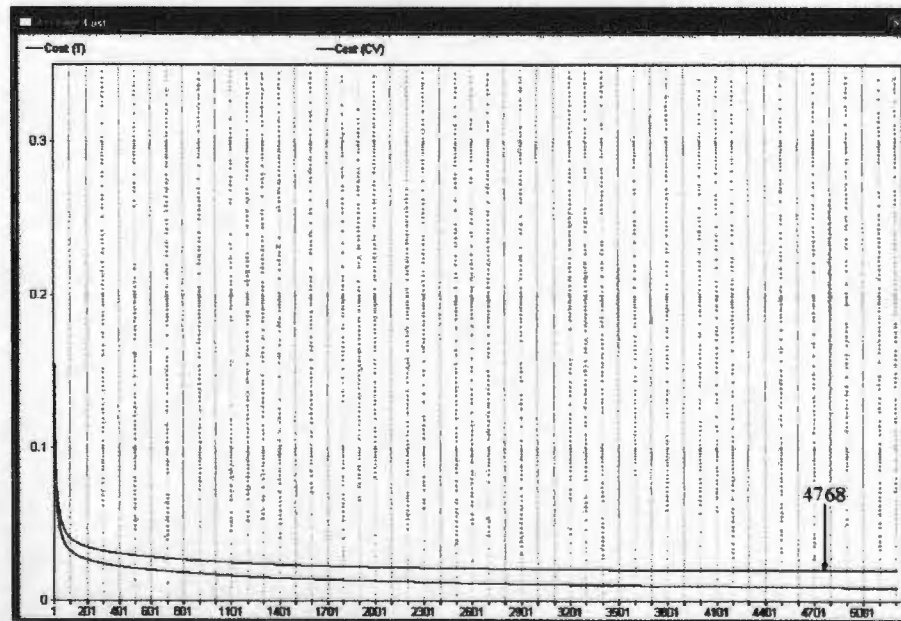
รูปที่ ง-2 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ทับที่ 2



รูปที่ ง-3 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ทับที่ 3



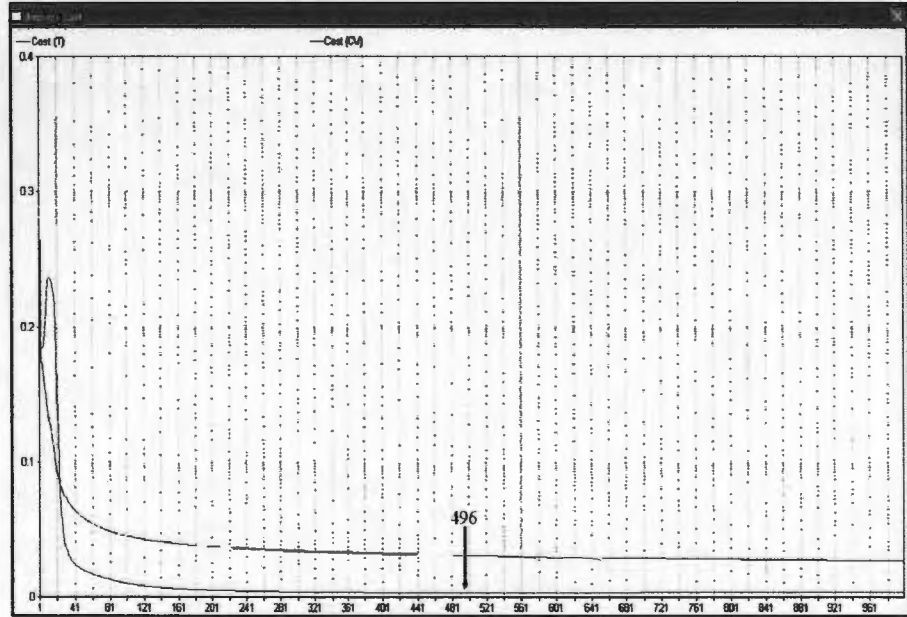
รูปที่ ง-4 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิวรอนเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า พับที่ 4



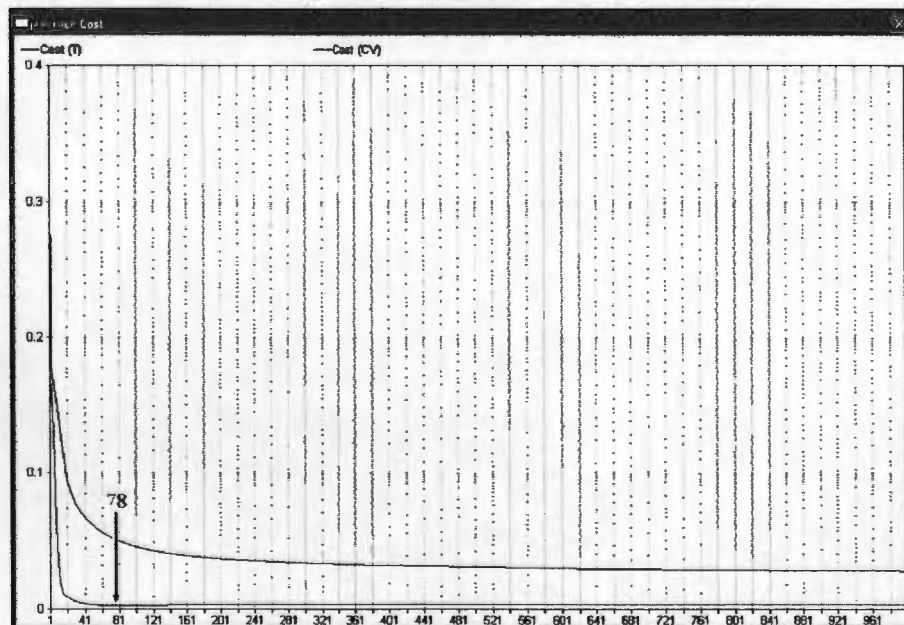
รูปที่ ง-5 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิวรอนเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า พับที่ 5

จากรูป ง-1 ถึง ง-5 พบว่า ในช่วงแรกของการเรียนรู้กราฟของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ ลดลงอย่างรวดเร็ว ค่อนข้างกราฟคือข ๆ ลดลง เมื่อกราฟของเซตตรวจสอบลดลงถึงจุดหนึ่งก็จะไม่ลดลง แต่กราฟของข้อมูลสอนยังคงลดลงต่อไป

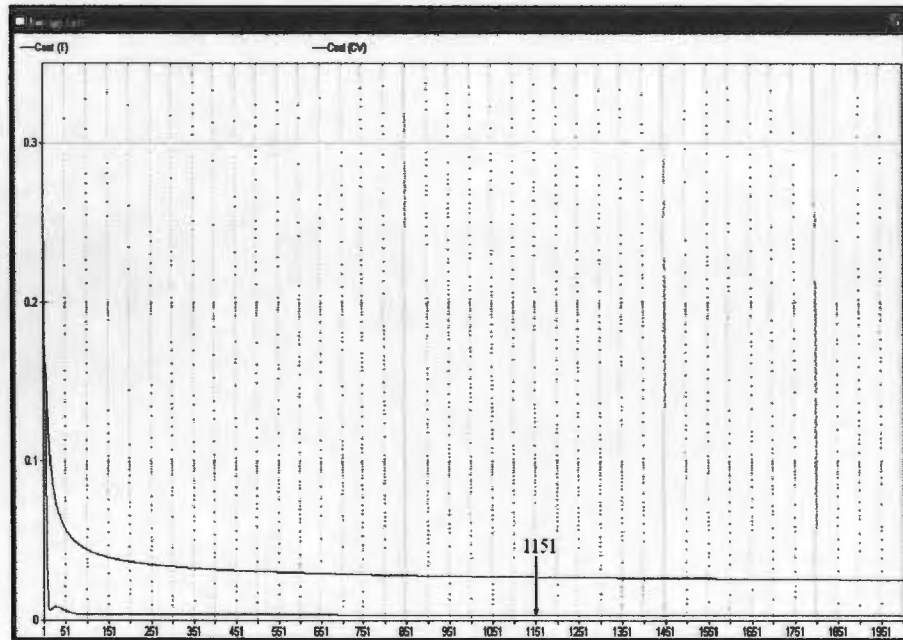
สำหรับนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 ที่ทดลองแบบการตรวจสอบ  
ไขว้ 5 พับ ในพับที่ 1 2 3 4 และ 5 จะเรียนรู้ 1,000 1,000 2,000 1,000 และ 1,000 รอบ  
ตามลำดับ



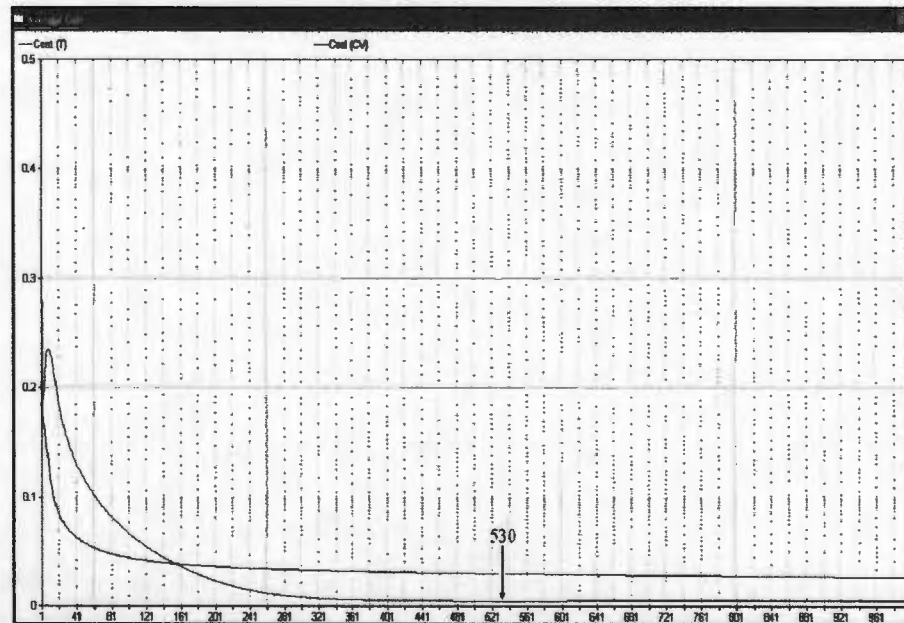
รูปที่ ง-6 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ  
ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 พับที่ 1



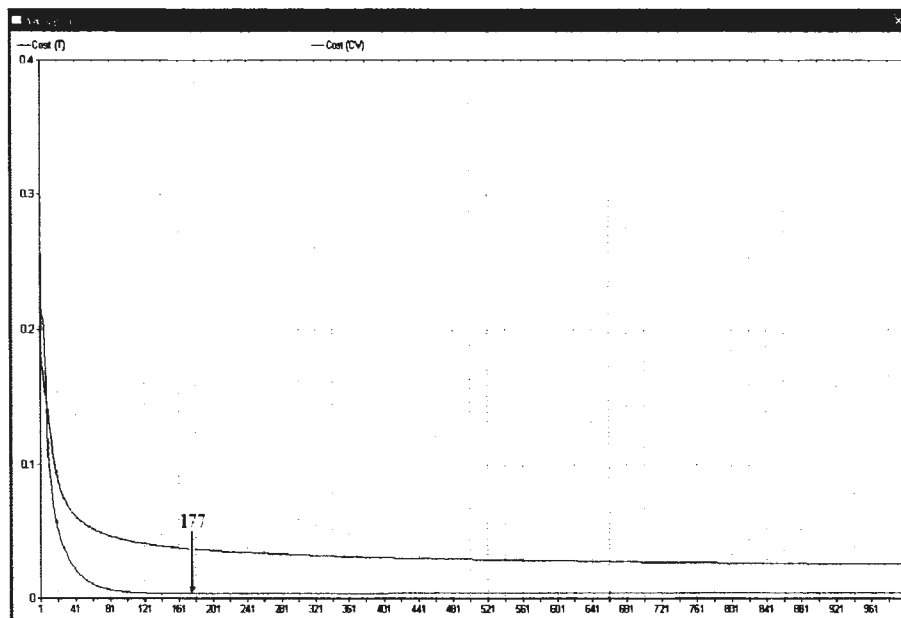
รูปที่ ง-7 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ  
ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 พับที่ 2



รูปที่ ง-8 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ  
ของนิเวศน์เคเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 พับที่ 3



รูปที่ ง-9 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบ  
ของนิเวศน์เคเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 พับที่ 4



รูปที่ ง-10 กราฟค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบของนิเวศน์เน็ตเวิร์กแบบวนกลับโครงสร้างที่ 1 พับที่ 5

จากรูป ง-6 ถึง ง-10 พบว่า ในช่วงแรกของการเรียนรู้กราฟของข้อมูลสอนและเซตตรวจสอบลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อมากกราฟค่อย ๆ ลดลง เมื่อกราฟของเซตตรวจสอบลดลงถึงจุดหนึ่งก็จะไม่ลดลง แต่กราฟของข้อมูลสอนยังคงลดลงต่อไป

ภาคผนวก จ.

ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ที่ทดลองแบบการตรวจสอบไขว้ 5 พับ

ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า พับที่ 1-5 แสดงดังตาราง จ-1 ถึง จ-5

ตารางที่ จ-1 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า พับที่ 1

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,976	2	3	5	0	1	8	3	2	0
1	2	1,953	13	2	9	2	2	9	2	6
2	2	3	1,937	7	4	2	1	10	28	3
3	7	1	5	1,930	0	12	0	4	31	10
4	3	11	6	3	1,926	1	8	12	11	19
5	5	3	2	30	1	1,928	13	0	13	5
6	6	2	3	0	1	6	1,964	0	18	0
7	0	3	5	1	4	2	3	1,972	2	8
8	1	4	12	14	8	5	6	6	1,935	9
9	8	9	5	24	17	6	0	10	21	1,900

จากตารางที่ จ-1 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,976 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 98.80% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 9 ทำนายถูกต้อง 1,900 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 95.00% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 7 6 1 2 8 3 5 4 และ 9 ทำนายถูกต้อง 1,976 1,972 1,964 1,953 1,937 1,935 1,930 1,928 1,926 และ 1,900 ตัวอย่าง ตามลำดับ

พับที่ 2 พบว่า เลข 1 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,976 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 98.80% ส่วนตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 1,877 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 93.85% เมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 1 2 4 0 6 7 5 3 9 และ 8 ทำนายถูกต้อง 1,976 1,973 1,967 1,961 1,956 1,942 1,924 1,911 1,891 และ 1,877 ตัวอย่าง ตามลำดับ ดังตาราง จ-2

ตารางที่ จ-2 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า พับที่ 2

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,961	1	8	4	3	7	7	0	4	5
1	0	1,976	2	5	4	0	1	8	2	2
2	0	2	1,973	2	3	0	6	2	10	2
3	9	4	7	1,911	3	28	1	7	20	10
4	0	10	3	1	1,967	2	2	5	3	7
5	7	0	4	29	5	1,924	11	5	14	1
6	9	2	1	0	4	13	1,956	0	15	0
7	2	9	3	2	11	3	0	1,942	8	20
8	3	5	21	25	7	13	17	15	1,877	17
9	16	8	3	16	14	7	0	21	24	1,891

พับที่ 3 พบว่า เลข 1 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,990 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 99.50% ส่วนตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 1,832 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 91.60% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 1 0 6 7 4 2 5 9 3 และ 8 ทำนายถูกต้อง 1,990 1,966 1,955 1,944 1,940 1,926 1,918 1,908 1,876 และ 1,832 ตัวอย่าง ตามลำดับ ดังตาราง จ-3

ตารางที่ จ-3 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของ นิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า พับที่ 3

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,966	0	3	4	4	3	10	0	4	6
1	0	1,990	5	0	3	0	0	1	0	1
2	1	6	1,926	4	4	5	9	2	33	10
3	12	9	7	1,876	8	33	2	12	23	18
4	1	9	10	0	1,940	2	7	7	3	21
5	10	2	6	24	5	1,918	17	3	12	3
6	5	5	3	4	7	7	1,955	1	13	0
7	3	6	9	1	4	6	1	1,944	6	20
8	6	4	34	17	24	16	25	18	1,832	24
9	14	6	6	25	11	10	0	9	11	1,908



ตารางที่ จ-4 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า พับที่ 4

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,979	0	4	11	0	0	3	0	0	3
1	3	1,954	11	5	12	0	4	5	6	0
2	2	10	1,898	7	13	5	10	12	36	7
3	9	7	6	1,856	5	44	1	15	42	15
4	12	9	29	12	1,877	2	9	10	6	34
5	5	2	0	27	10	1,922	15	8	10	1
6	8	3	2	6	7	16	1,955	0	3	0
7	1	10	10	8	12	12	0	1,906	14	27
8	0	3	51	27	21	19	23	19	1,802	35
9	17	9	4	40	14	8	2	13	17	1,876

จากตาราง จ-4 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,979 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 98.95% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 1,802 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 90.10% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 6 1 5 7 2 4 9 3 และ 8 ทำนายถูกต้อง 1,979 1,955 1,954 1,922 1,906 1,898 1,877 1,876 1,856 และ 1,802 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ จ-5 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า พับที่ 5

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,969	0	3	19	3	1	2	1	1	1
1	0	1,945	21	8	6	0	4	7	3	6
2	13	22	1,840	11	12	16	11	12	49	14
3	10	1	11	1,855	6	51	3	13	30	20
4	11	8	22	9	1,884	6	7	11	13	29
5	5	0	5	30	4	1,915	20	5	11	5
6	11	0	6	0	9	9	1,946	1	18	0
7	1	10	7	0	11	4	1	1,931	13	22
8	5	7	21	31	12	28	13	26	1,832	25
9	19	10	1	15	53	11	0	8	28	1,855

พื้ที่ 5 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,969 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 98.45% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายถูกต้อง 1,832 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 91.60% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 6 1 7 5 4 3 9 2 และ 8 ทำนายถูกต้อง 1,969 1,946 1,945 1,931 1,915 1,884 1,855 1,855 1,840 และ 1,832 ตัวอย่าง ตามลำดับ

สรุปผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบป้อนไปข้างหน้า ซึ่งทดลองแบบการตรวจสอบไขว้ 5 พื้ ทั้งห้าเน็ตเวิร์ก พบว่า โดยส่วนใหญ่เลข 0 เป็นเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด และเลข 8 เป็นเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด

ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวกกลับโครงสร้างที่ 1 พื้ที่ 1-5 แสดงดังตาราง จ-6 ถึง จ-10

ตารางที่ จ-6 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวกกลับโครงสร้างที่ 1 พื้ที่ 1

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,915	1	7	2	16	11	7	17	3	21
1	1	1,720	25	15	95	0	2	101	27	14
2	11	32	1,712	11	33	1	14	67	108	11
3	35	7	19	1,676	10	66	3	62	91	31
4	4	15	18	12	1,787	2	22	22	83	35
5	29	5	14	76	19	1,732	22	28	59	16
6	55	3	2	2	51	47	1,687	2	147	4
7	1	4	6	5	37	2	0	1,901	11	33
8	1	9	20	27	30	23	13	55	1,792	30
9	13	8	8	50	79	10	1	70	79	1,682

จากตาราง จ-6 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,915 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 95.75% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 3 ทำนายถูกต้อง 1,676 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 83.80% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 7 8 4 5 1 2 6 9 และ 3 ทำนายถูกต้อง 1,915 1,901 1,792 1,787 1,732 1,720 1,712 1,687 1,682 และ 1,676 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ จ-7 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 พับที่ 2

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,750	4	21	24	18	46	60	11	34	32
1	1	1,769	17	5	119	10	5	27	28	19
2	8	28	1,653	31	26	8	32	20	177	17
3	77	57	30	1,336	54	242	18	35	130	21
4	0	58	5	5	1,648	28	43	7	158	51
5	41	24	12	127	49	1,565	61	18	88	15
6	52	12	6	24	47	60	1,655	0	137	7
7	16	44	4	27	149	44	5	1,567	67	77
8	11	40	43	75	102	59	43	24	1,545	58
9	32	24	11	59	99	27	3	43	190	1,512

จากตาราง จ-7 พบว่า เลข 1 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,769 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 88.45% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 3 ทำนายถูกต้อง 1,336 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 66.80% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 1 0 6 2 4 7 5 8 9 และ 3 ทำนายถูกต้อง 1,769 1,750 1,655 1,653 1,648 1,567 1,565 1,545 1,512 และ 1,336 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ จ-8 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 พับที่ 3

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,934	0	1	1	10	18	13	1	9	13
1	1	1,569	22	15	28	21	2	5	317	20
2	8	4	1,689	4	13	34	21	12	199	16
3	58	6	33	1,277	8	256	3	13	270	76
4	7	2	12	5	1,643	13	33	4	212	69
5	35	2	6	48	15	1,775	25	3	77	14
6	19	0	7	2	38	110	1,696	3	124	1
7	14	5	21	12	13	84	2	1,655	105	89
8	3	5	22	13	25	36	22	15	1,799	60
9	31	5	9	19	24	50	0	16	120	1,726

จากตาราง จ-8 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,934 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 96.70% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 3 ทำนายถูกต้อง 1,277 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 63.85% และเมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 8 5 9 6 2 7 4 1 และ 3 ทำนายถูกต้อง 1,934 1,799 1,775 1,726 1,696 1,689 1,655 1,643 1,569 และ 1,277 ตัวอย่าง ตามลำดับ

ตารางที่ จ-9 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของ นิวรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับโครงสร้างที่ 1 พับที่ 4

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,923	0	4	19	5	12	7	6	9	15
1	4	1,716	47	30	69	17	3	58	27	29
2	27	10	1,632	18	22	38	18	43	174	18
3	32	24	16	1,516	16	165	2	85	77	67
4	27	19	61	17	1,683	13	26	52	34	68
5	35	11	13	52	39	1,735	20	29	41	25
6	34	2	3	11	43	77	1,780	2	47	1
7	18	8	7	19	26	32	0	1,737	46	107
8	22	8	43	42	80	83	60	79	1,505	78
9	30	6	3	59	67	22	1	55	58	1,699

จากตาราง จ-9 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,934 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 96.70% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 8 ทำนายได้ถูกต้อง 1,505 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 75.25% เมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 6 7 5 1 9 4 2 3 และ 8 ทำนายถูกต้อง 1,923 1,780 1,737 1,735 1,716 1,699 1,683 1,632 1,516 และ 1,505 ตัวอย่าง ตามลำดับ

พับที่ 5 พบว่า เลข 0 เป็นตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด คือ ทำนายถูกต้อง 1,884 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 94.20% ตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด คือ เลข 5 ทำนายถูกต้อง 1,428 ตัวอย่าง จาก 2,000 ตัวอย่าง คิดเป็น 71.40% เมื่อเรียงลำดับตัวเลขที่ทำนายได้ถูกต้องจากมากไปน้อย ได้แก่ เลข 0 1 6 7 9 8 4 3 2 และ 5 ทำนายถูกต้อง 1,884 1,767 1,739 1,640 1,621 1,584 1,580 1,550 1,483 และ 1,428 ตัวอย่าง ตามลำดับ ดังตาราง จ-10

ตารางที่ จ-10 ผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 1 พับที่ 5

ตัวเลขที่ทำนายได้ ตัวเลขที่แท้จริง	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,884	0	6	23	13	5	28	2	14	25
1	2	1,776	52	15	68	2	10	22	37	25
2	49	62	1,483	24	24	24	35	28	205	66
3	47	43	26	1,550	18	69	20	39	87	101
4	28	88	29	33	1,580	4	56	32	107	43
5	53	20	26	154	38	1,428	86	29	109	57
6	44	11	13	3	21	22	1,739	0	138	9
7	9	44	15	43	58	6	0	1,640	90	95
8	5	21	37	51	93	33	40	47	1,584	89
9	28	22	3	36	146	5	4	35	100	1,621

สรุปผลการทำนายตัวเลข 0-9 ของนิรอลเน็ตเวิร์กแบบวงกลับ โครงสร้างที่ 1 ซึ่งทดลองแบบการตรวจสอบไขว้ 5 พับ ทั้งห้าเน็ตเวิร์ก พบว่า ส่วนใหญ่เลข 0 เป็นเลขที่ทำนายได้ถูกต้องมากที่สุด และเลข 3 เป็นเลขที่ทำนายได้ถูกต้องน้อยที่สุด

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสมปอง เสนออำพรชัย สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาคณิตศาสตร์ จากภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2546