

บทที่ 3

การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลแบบปรับตัวได้โดยใช้เครือข่ายประสาทเทียม

3.1 บทนำ

จากความต้องการหลักของการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลทั้งด้านคุณภาพของภาพหลังฝังสัญญาณลายน้ำ และความทนทานของภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลต่อการโจมตีในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นความต้องการที่มีความขัดแย้งกันในตัว ดังนั้นจึงต้องค้นหาวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลที่จะสนองความต้องการทั้งสองข้างต้นได้เท่า ๆ กัน ทำให้มีการพัฒนาวิธีการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลออกมาหลายรูปแบบต่าง ๆ กันไป ซึ่งในบทนี้ จะกล่าวถึงการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลโดยการฝังสัญญาณลายน้ำลงบนภาพที่ได้จากกล้อง SEM (Scanning electron microscope) โดยเป็นภาพของสารเฟอร์ริคลอไรด์ (FeCl_2) และภาพของสารเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ซึ่งเป็นสารประกอบแร่เหล็กที่มีในน้ำธรรมชาติ บทนี้จะนำเสนอวิธีการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยวิธีการกระจายการฝังสัญญาณลายน้ำบนสเปกตรัมความถี่ [5] โดยใช้การแปลงสัญญาณโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่อง DCT (Discrete cosine transforms) และได้้นำเครือข่ายประสาทเทียมที่อาศัยระบบการมองเห็นของมนุษย์ (Human visual system) มาใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำบนภาพด้วย เพื่อตอบสนองความต้องการข้างต้น และในบทนี้ยังกล่าวถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง การอภิปรายถึงผลลัพธ์ที่ได้ รวมทั้งบทสรุปที่ได้รับจากงานวิจัยในบทนี้

3.2 วิธีการฝังสัญญาณลายน้ำ

การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลที่นำเสนอในบทนี้ ใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอโดย Cox.et.al. [5] ซึ่งใช้เทคนิคการฝังสัญญาณลายน้ำแบบการกระจายแถบความถี่ (Spread spectrum) โดยอัลกอริทึมการฝังสัญญาณลายน้ำมีดังนี้

1. ทำการแปลงสัญญาณภาพต้นฉบับด้วยการแปลงสัญญาณโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่อง (DCT)
2. ทำการฝังสัญญาณลายน้ำลงไปในสัมประสิทธิ์การแปลง DCT ตามสมการที่ (3.1)

$$v'_i = v_i(1 + \alpha_k x_i) \quad (3.1)$$

เมื่อ v_i คือ สัมประสิทธิ์การแปลง DCT ลำดับที่ i ของภาพต้นฉบับ

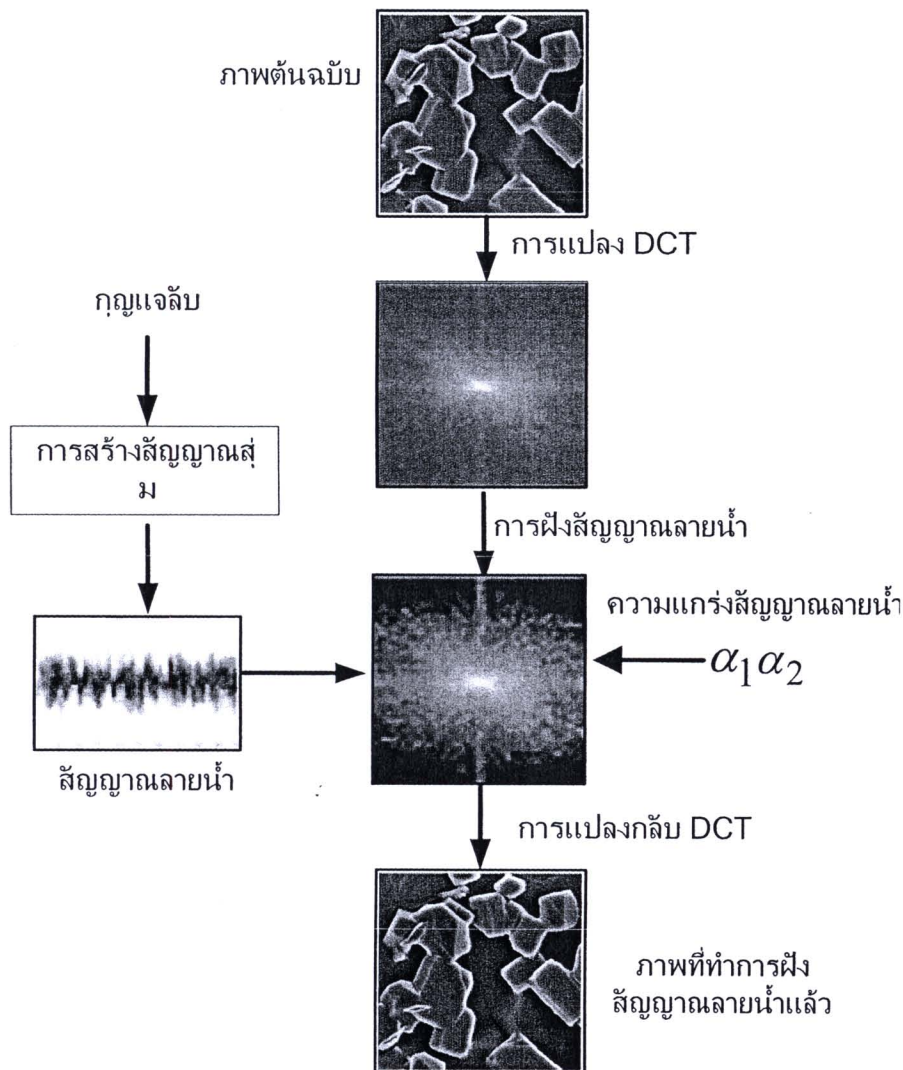
v_i' คือ สัมประสิทธิ์การแปลง DCT ลำดับที่ i ที่ถูกฝังลายน้ำ

x_i คือ สัญญาณลายน้ำที่ทำการฝังที่ตำแหน่ง i เมื่อ $i = 1, 2, \dots, 1,000$

และ α_k คือค่าความแรงของสัญญาณลายน้ำ (Watermark strength) เมื่อ $k = 1, 2$ โดยที่ α_1 จะใช้สำหรับสัมประสิทธิ์การแปลง DCT 500 ตำแหน่งแรกและ α_2 จะใช้สำหรับสัมประสิทธิ์การแปลง DCT ตำแหน่งอีก 500 ที่เหลือ โดยที่ค่าความแรงของสัญญาณลายน้ำทั้งสองค่าจะได้มาจากการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยเครือข่ายประสาทเทียมในหัวข้อที่ 3.4

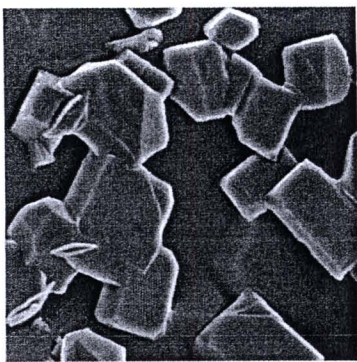
3. ทำการแปลงกลับสัมประสิทธิ์การแปลง DCT เพื่อให้ได้ ภาพที่ฝังสัญญาณลายน้ำดิจิทัลเรียบร้อยแล้ว

โดยแผนภาพการฝังสัญญาณลายน้ำแสดงไว้ในรูปที่ 3.1

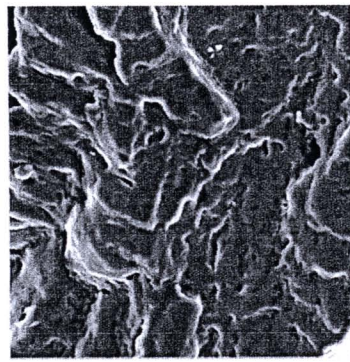


รูปที่ 3.1 แผนภาพการฝังสัญญาณลายน้ำ

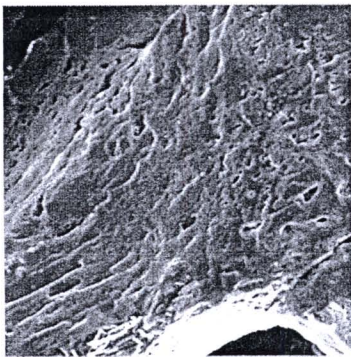
ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบอัลกอริทึมการฝังลายน้ำตามสมการ (3.1) เพื่อทดสอบคุณภาพของภาพเอาต์พุตและความทนทานของลายน้ำโดยใช้ภาพต้นฉบับที่ได้จากกล้อง SEM (Scanning electron microscope) ทั้งหมด 4 ภาพโดยเป็นภาพของสารเฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) ซึ่งเป็นเหล็กที่มีในน้ำธรรมชาติและภาพสารเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) ขนาด 512×512 พิกเซล ดังรูปที่ 3.2(ก), (ข), (ค) และ (ง)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.2 ภาพต้นฉบับที่ใช้ในการฝังสัญญาณลายน้ำ

งานวิจัยได้ใช้ค่า $PSNR$ (Peak signal-to-noise ratio) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐาน ที่นักวิจัยทั่วไปใช้ในการเปรียบเทียบคุณภาพของภาพดิจิทัลที่ผ่านกระบวนการประมวลผลทางสัญญาณใด ๆ กับรูปภาพต้นฉบับ ค่า $PSNR$ ที่สูงจะชี้ให้เห็นถึงคุณภาพของรูปที่ใกล้เคียงกับรูปภาพต้นฉบับ ค่า $PSNR$ นี้ได้ถูกนำมาใช้ในการประเมินคุณภาพของรูปภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำมาแล้ว ค่า $PSNR$ สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.2) และ (3.3)

$$MSE = \frac{1}{N \times N} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I_{org}(i,j) - I_w(i,j))^2 \quad (3.2)$$

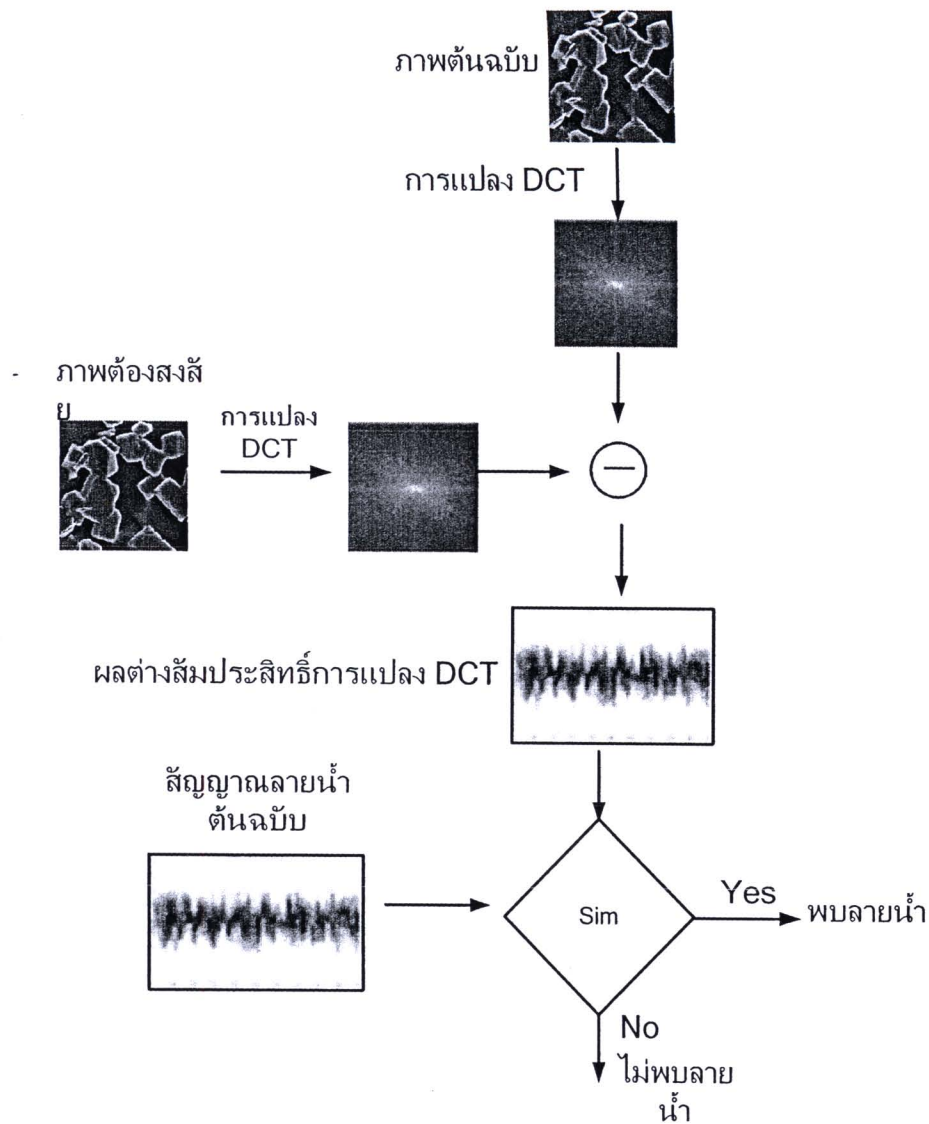
$$PSNR = 10 \log_{10} \left[\frac{255^2}{MSE} \right] \quad (3.3)$$

เมื่อ I_{org} คือ ค่าพิกเซลของภาพต้นฉบับ, I_w คือ ค่าพิกเซลของภาพที่ฝังสัญญาณลายน้ำ และ $N \times N$ คือขนาดของรูปภาพ โดยที่ค่า MSE (Mean square error) สมการที่ (3.2) จะได้จากการคำนวณในทุก ๆ ตำแหน่งของพิกเซลภายในรูปภาพ ทั้งนี้คุณภาพของรูปภาพภายหลังกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำจะวัดได้จาก $PSNR$ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่า $PSNR$ ที่ยอมรับได้สำหรับการใช้งานจริงในทางปฏิบัติควรจะอยู่ระหว่าง 30 - 40 dB [22]

3.3 การตรวจจับสัญญาณลายน้ำ

การตรวจจับสัญญาณลายน้ำเป็นการตรวจหาสัญญาณลายน้ำจากภาพที่อาจจะมีสัญญาณลายน้ำแล้วนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณลายน้ำต้นฉบับ โดยอัลกอริทึมการกู้คืนสัญญาณลายน้ำมีดังนี้

1. ทำการแปลงสัญญาณภาพต้องสงสัยที่อาจมีสัญญาณลายน้ำด้วยการแปลงภาพด้วยสัญญาณโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่อง
2. ทำการแปลงสัญญาณภาพต้นฉบับด้วยการแปลงสัญญาณโคไซน์แบบไม่ต่อเนื่อง
3. นำค่าสัมประสิทธิ์ของการแปลงจากภาพจากข้อที่ 1 และข้อที่ 2 มาทำการลบกันจะได้ค่าผลต่างของสัมประสิทธิ์การแปลง DCT ที่อาจมีสัญญาณลายน้ำในภาพต้องสงสัย
4. นำสัญญาณลายน้ำต้นฉบับและสัญญาณลายน้ำที่ตรวจจับได้มาทำการเปรียบเทียบกันซึ่งขั้นตอนการตรวจจับสัญญาณลายน้ำแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพการตรวจจับสัญญาณลายน้ำ

จากนั้นจะทำการคำนวณหาค่าความเหมือนกัน (Similarity) ของสัญญาณลายน้ำต้นฉบับกับสัญญาณลายน้ำที่ตรวจจับมาได้ด้วยสมการที่ (3.4)

$$sim(X, X^*) = \frac{X^* \cdot X}{\sqrt{X^* \cdot X^*}} \quad (3.4)$$

เมื่อ X^* คือสัญญาณลายน้ำที่ถูกกู้คืนมา และ X คือลายน้ำต้นฉบับ

3.4 การทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลแบบปรับตัวได้

จากความต้องการหลักของการทำภาพพิมพ์ลายน้ำดิจิทัลที่มีความขัดแย้งกันระหว่างคุณภาพของภาพเอาต์พุตและความทนทานของสัญญาณลายน้ำการที่จะทำให้ได้ความต้องการทั้งสองอย่างพร้อมกันนั้น ผู้วิจัยได้นำเครือข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการหาค่าความแรงของสัญญาณลายน้ำสำหรับภาพแต่ละภาพ ซึ่งมีลักษณะเฉพาะของภาพที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ได้ภาพพิมพ์ลายน้ำที่มีคุณภาพของภาพที่สูงและมีความทนทานที่สุด เครือข่ายประสาทเทียมที่เลือกใช้มีสถาปัตยกรรมเป็นแบบมีการเชื่อมโยงไปข้างหน้า คือ Multi-layer feed forward network ซึ่งเป็นเครือข่ายประสาทเทียมที่นิยมใช้คู่กับอัลกอริทึมแบบแพร่กลับ (Back propagation) จำนวนโหนดในชั้นแรกจะถูกกำหนดโดยจำนวนตัวแปรพยากรณ์หรืออินพุตในโมเดล ในขณะที่จำนวนโหนดในชั้นผลลัพธ์หรือเอาต์พุตเท่ากับจำนวนผลลัพธ์ที่ต้องการในโมเดล สิ่งสำคัญในการสร้างโมเดลคือการเลือกจำนวนโหนดและฟังก์ชันการแปลง (Transfer function) โดยโครงสร้างของประสาทเทียมที่ใช้จะมีทั้งหมด 4 เลเยอร์ประกอบด้วยเลเยอร์อินพุต (Input Layer) 1 เลเยอร์ เลเยอร์ซ่อน (Hidden Layer) 2 เลเยอร์ และเลเยอร์เอาต์พุต (Output Layer) 1 เลเยอร์ โดยฟังก์ชันการแปลงของเลเยอร์ซ่อน คือ Tan-sigmoid function และสำหรับฟังก์ชันการแปลงของเลเยอร์เอาต์พุต คือ Log-sigmoid function โดยอินพุตของเครือข่ายประสาทเทียมคือค่าโครงสร้างลักษณะเฉพาะของภาพ โดยโครงสร้างเฉพาะของภาพทั้ง 5 ได้แก่

- (1) ค่าเชิงมุมที่สองของภาพ (Q_1) (Angular second moment) คำนวณได้ตามสมการที่ (3.5) ดังนี้

$$Q_1 = \sum_{i,j} (Co(i,j))^2 \quad (3.5)$$

- (2) ค่าความแปรปรวนต่างของภาพ (Q_2) (Contrast) คำนวณได้ตามสมการที่ (3.6) ดังนี้

$$Q_2 = \sum_{i,j} (i-j)^2 \cdot Co(i,j) \quad (3.6)$$

- (3) ค่าความสัมพันธ์กันของภาพ (Q_3) (Correlation) คำนวณได้ตามสมการที่ (3.7) ดังนี้

$$Q_3 = \frac{\sum_{i,j} ijCo(i,j) - m_x \cdot m_y}{S_x \cdot S_y} \quad (3.7)$$

$$\text{เมื่อ } m_x = \sum_i i \sum_j Co(i, j), \quad m_y = \sum_j j \sum_i Co(i, j),$$

$$S_x^2 = \sum_i i^2 \sum_j Co(i, j) - m_x^2, \quad S_y^2 = \sum_j j^2 \sum_i Co(i, j) - m_y^2$$

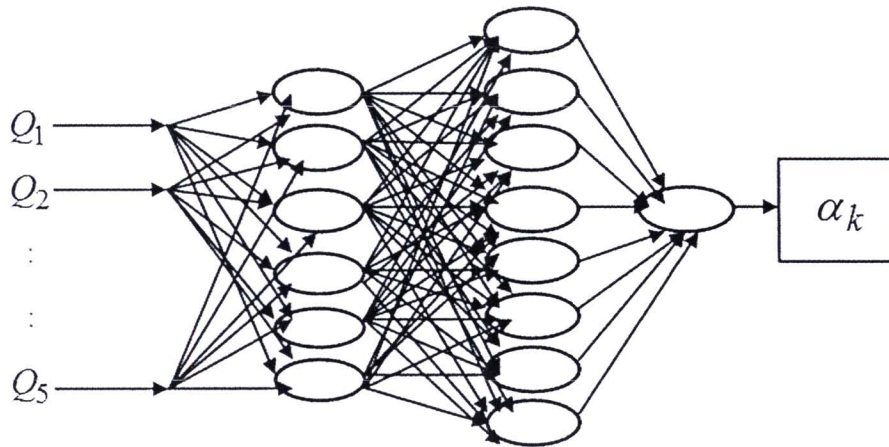
(4) ค่าเอนโทรปีของภาพ (Q_4) (Entropy) คำนวณได้ตามสมการที่ (3.8) ดังนี้

$$Q_4 = - \sum_{i,j} Co(i, j) \cdot \log(Co(i, j)) \quad (3.8)$$

(5) ค่าเฉลี่ยของภาพ (Q_5) (Mean) คำนวณได้ตามสมการที่ (3.9) ดังนี้

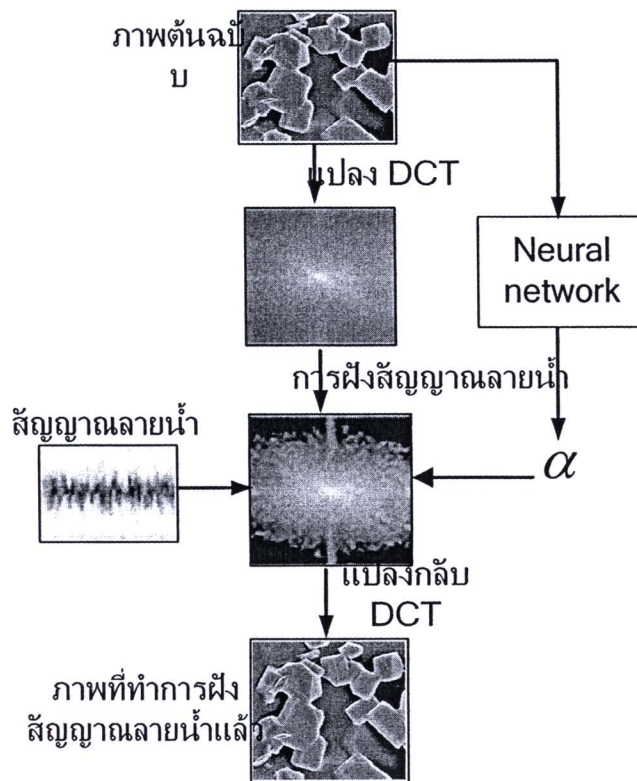
$$Q_5 = \frac{\sum_{i,j} Co(i, j)}{i \times j} \quad (3.9)$$

เอาต์พุตที่ได้คือ ค่าความแรงของสัญญาณลายน้ำ ที่มีความเหมาะสมที่สุดโดยโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ทดลองใช้แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างโครงข่ายประสาทเทียม

ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมจะนำไปใช้ในขั้นตอนของการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยก่อนที่จะทำการฝังสัญญาณลายน้ำจะนำภาพที่เป็นภาพต้นฉบับ ส่งไปให้โครงข่ายประสาทเทียมหาค่าความแรงของสัญญาณลายน้ำที่เหมาะสมที่สุดต่อรูปภาพนั้น ๆ เมื่อได้ค่าความแรงสัญญาณลายน้ำแล้วก็ทำการฝังสัญญาณลายน้ำตามขั้นตอนต่อไป ซึ่งกระบวนการฝังสัญญาณลายน้ำที่ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียม แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



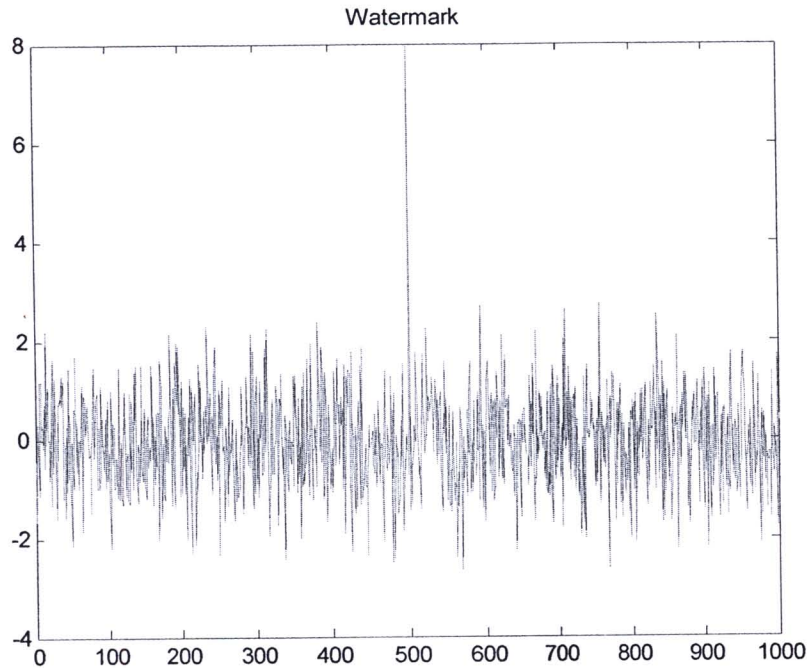
รูปที่ 3.5 แผนภาพการฝังสัญญาณลายน้ำที่ประยุกต์ใช้เครือข่ายประสาทเทียม

3.5 ผลการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอ จะทำการทดสอบคุณภาพของภาพที่ถูกฝังสัญญาณลายน้ำโดยการคำนวณค่า *PSNR* ตามสมการที่ (3.2) และทำการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำโดยทำการคำนวณค่า *sim* ตามสมการที่ (3.4) การโจมตีสัญญาณลายน้ำภายหลังการฝังสัญญาณลายน้ำโดยวิธีการต่าง ๆ เช่น Median filter, Gaussian noise, Low pass filter และ JPEG compression

ข้อมูลภาพดิจิทัลที่ใช้ในการทดสอบเป็นภาพระดับเทาจากกล้อง SEM (Scanning electron microscope) โดยมีขนาด 512×512 พิกเซล จำนวน 4 ภาพ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.1 สัญญาณลายน้ำที่ใช้ในการทดสอบ เป็นสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการสุ่มจากการแจกแจงปกติ (Normal distribution) $N(0,1)$ ด้วยค่าเฉลี่ย 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ 1 ทั้งหมดจำนวน 1,000 ค่า ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบจะนำมาทำการเปรียบเทียบกับวิธีที่นำเสนอโดย Cox et al. (1997) [5] โดยวิธีการของ Cox et al. ใช้ค่าความแรงแ้งสัญญาณลายน้ำคงที่เท่ากับ 0.1 แต่วิธีการที่นำเสนอจะมีค่า

ความแรงสัญญาณลายน้ำ (α_k) ปรับเปลี่ยนตามคุณลักษณะเฉพาะของภาพ SEM ที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.6 สัญญาณลายน้ำ

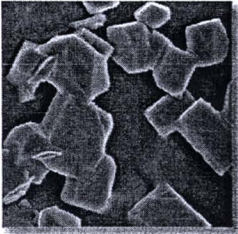
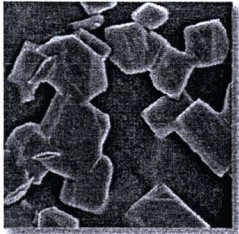
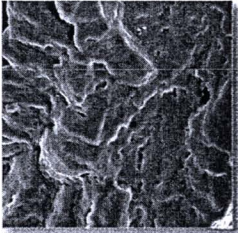
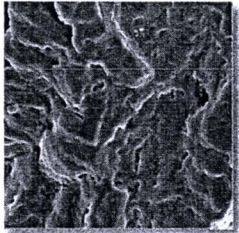
3.5.1 ผลการทดสอบคุณภาพของภาพที่ฝังสัญญาณลายน้ำ

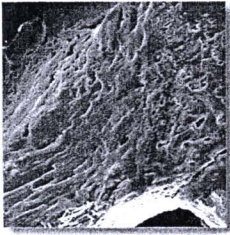
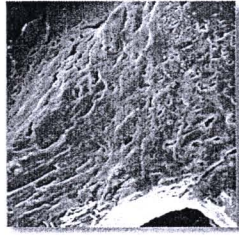
ในขั้นตอนการทดสอบได้ทำการฝังสัญญาณลายน้ำบนภาพ SEM ทั้งสี่ภาพ จากนั้นทำการคำนวณค่า $PSNR$ ของทั้งสี่ภาพตามสมการที่ (3.2) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของภาพหลังจากฝังสัญญาณลายน้ำ จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับค่า $PSNR$ จากงานวิจัยของ Cox et al.[5] ที่ใช้ค่า α คงที่เท่ากับ 0.1 ผลการเปรียบเทียบได้แสดงในตารางที่ 3.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า $PSNR$ ของวิธีการที่นำเสนอสูงกว่างานวิจัยที่นำมาเปรียบเทียบโดยมีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 6 dB ภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำของวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Cox et al.[5] แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ค่า PSNR ของภาพที่ฝังสัญญาณลายน้ำแล้ว

ภาพ	วิธีการที่นำเสนอ			วิธีการ Cox et al. [5]	
	α_1	α_2	PSNR (dB)	α	PSNR (dB)
SEM_image1	0.05	0.09	39.95	0.1	34.43
SEM_image2	0.05	0.08	39.37	0.1	33.61
SEM_image3	0.05	0.09	36.70	0.1	30.78
SEM_image4	0.05	0.08	40.07	0.1	34.23
ค่าเฉลี่ย PSNR		39.02		33.26	

ตารางที่ 3.2 ภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำของวิธีการที่นำเสนอเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Cox et al.

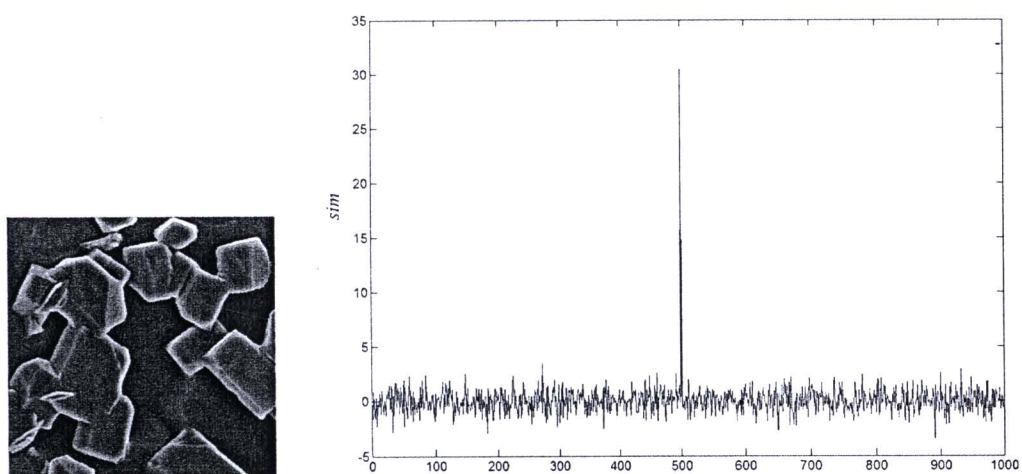
ภาพ	ภาพที่ฝังสัญญาณลายน้ำ	
	วิธีการที่นำเสนอ	วิธีการ Cox et al. [5]
SEM_image1	 PSNR = 39.95 (dB)	 PSNR = 34.43 (dB)
SEM_image2	 PSNR = 39.37 (dB)	 PSNR = 33.61 (dB)

SEM_image3	 $PSNR = 36.70$ (dB)	 $PSNR = 30.78$ (dB)
SEM_image4	 $PSNR = 40.07$ (dB)	 $PSNR = 34.23$ (dB)

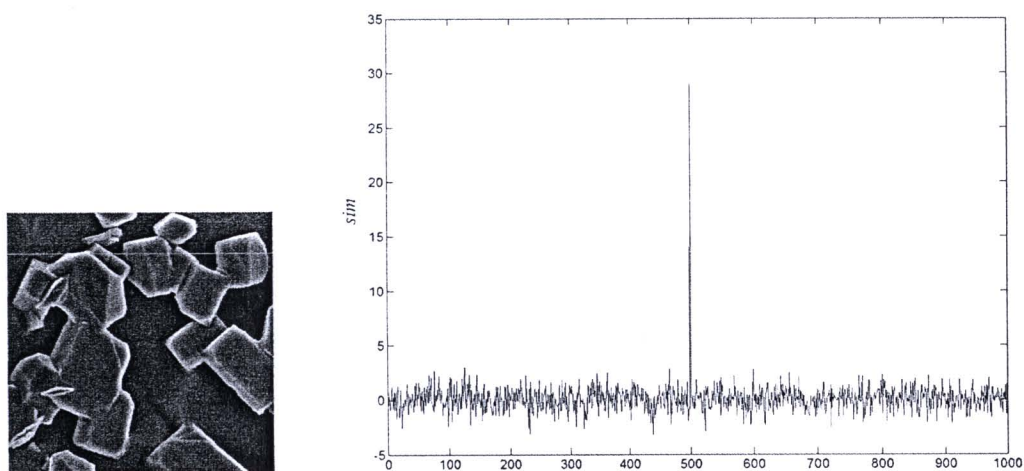
3.5.2 ผลการทดสอบความทนทานของสัญญาณลายน้ำ

เพื่อที่จะตรวจสอบว่าสัญญาณลายน้ำมีความทนทานมากหรือน้อยเพียงใดต่อการโจมตี ผู้วิจัยจึงได้กำหนดวิธีการ โจมตีรูปภาพที่ผ่านการฝังสัญญาณลายน้ำ โดยใช้วิธีการต่าง ๆ เช่น ตัวกรองข้อมูลภาพโดยใช้ค่ามัธยฐาน (Median filter) การเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน (Gaussian noise) เป็นต้น รูปที่ 3.7 แสดงภาพ SEM_image1 ภายหลังจากถูกโจมตีด้วยวิธีต่าง ๆ และกราฟแสดงผลการคำนวณค่า *sim* ของการโจมตี โดยตำแหน่งที่ 500 แสดงการคำนวณค่า *sim* ของสัญญาณลายน้ำที่ตรวจจับได้กับสัญญาณลายน้ำต้นฉบับ ส่วนตำแหน่งอื่น ๆ แสดงผลการคำนวณค่า *sim* ของสัญญาณลายน้ำต้นฉบับกับสัญญาณลายน้ำจากการสุ่มโดยใช้รหัสลับที่ไม่ตรงกับรหัสในการสุ่มของระบบ ซึ่งจะพบว่าให้ค่า *sim* ที่ต่ำมาก ในขณะที่ตำแหน่งที่ 500 ให้ค่า *sim* ที่สูงกว่ามาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีของตัวตรวจจับสัญญาณลายน้ำ

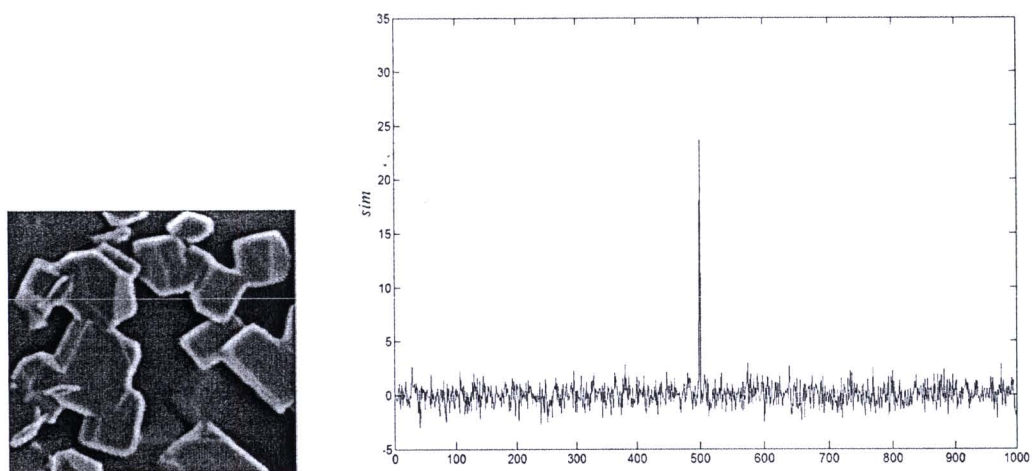




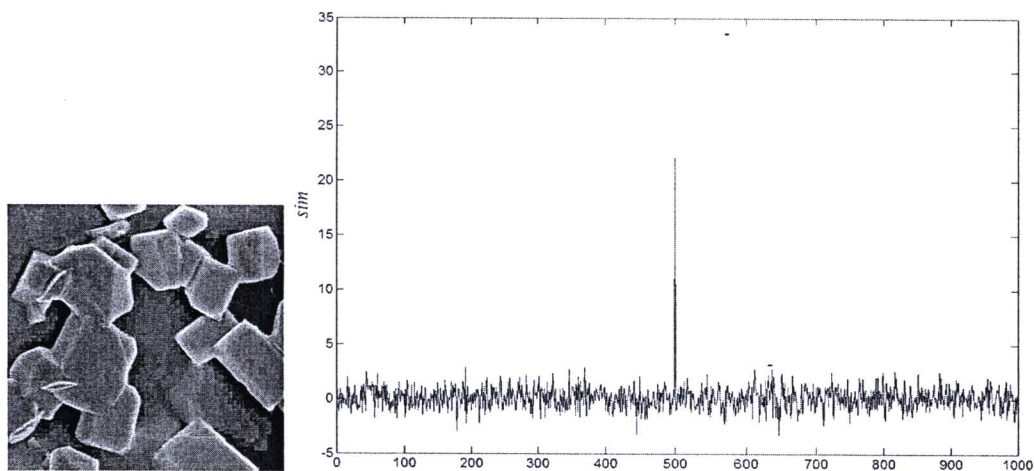
(ก) ภาพและกราฟค่า *sim* ที่ผ่านการโจมตีด้วยตัวกรองข้อมูลภาพโดยใช้ค่ามัธยฐาน



(ข) ภาพและกราฟค่า *sim* ที่ผ่านการโจมตีด้วยการเพิ่มสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน



(ค) ภาพและกราฟค่า *sim* ที่ผ่านการโจมตีด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน



(ง) ภาพและค่า *sim* ที่ผ่านการโจมตีด้วย JPEG lossy compression ที่ 10%

รูปที่ 3.7 ภาพและกราฟค่า *sim* ที่ผ่านการโจมตีด้วยวิธีการ (ก) Median filter (ข) Gaussian noise (ค) Low pass filter (ง) JPEG lossy compression ที่ 10%

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อภาพผ่านการโจมตีด้วยวิธีการต่าง ๆ แล้วคุณภาพของภาพจะถูกลดทอนลงแตกต่างกันตามชนิดของการโจมตีแต่สัญญาณลายน้ำยังสามารถตรวจจับได้ ตารางที่ 3.3 แสดงการเปรียบเทียบค่า *sim* ของภาพ SEM_image1 ที่ไม่ผ่านการโจมตีและผ่านการโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณภาพด้วย JPEG compression ที่ค่าคุณภาพ 10% โดยแสดงค่า *sim* เฉลี่ยของสัญญาณลายน้ำที่ได้จากการใช้ α_1 เท่ากับ 0.05 และ α_2 เท่ากับ 0.08 และ 0.09 จากนั้นทำการโจมตีด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.4

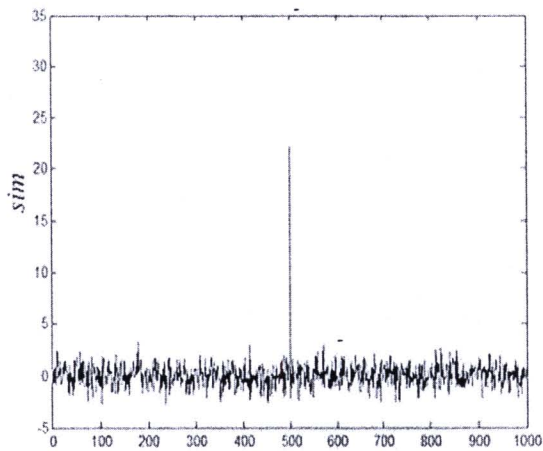
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่า *sim* ของภาพ SEM_image1 ที่ไม่ผ่านการโจมตีและผ่านการโจมตีด้วยการบีบอัดสัญญาณด้วย JPEG compression ที่ค่าคุณภาพ 10%

ภาพ	วิธีการโจมตี	<i>sim</i>	
		วิธีการที่นำเสนอ	วิธีการ Cox <i>et al.</i> [5]
SEM_image1 $\alpha_1 = 0.05$ $\alpha_2 = 0.09$	No Attack	30.91	30.91
	JPEG compression10%	22.43	24.76

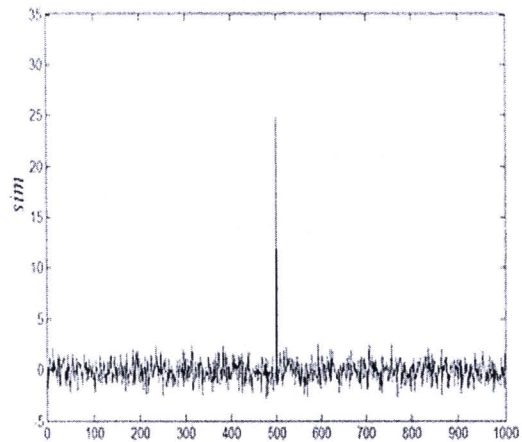
ตารางที่ 3.4 ค่า sim เฉลี่ยของภาพ 4 ภาพที่ได้จากการใช้ค่า α_1 เท่ากับ 0.05 และ α_2 เท่ากับ 0.08 และ 0.09 เมื่อผ่านการ โจมตีแบบต่าง ๆ

วิธีการ โจมตี	sim	
	วิธีการที่นำเสนอ	วิธีการ Cox <i>et al.</i> [8]
ไม่มีการ โจมตี	30.91	30.91
Median filter 3×3	30.40	30.65
Gaussian noise 0.001	28.93	29.58
Low pass filter 3×3	23.64	23.69
JPEG 10%	22.06	24.76
JPEG 25%	28.54	29.67
JPEG 50%	30.25	30.51
JPEG 75%	30.72	30.71
JPEG 90%	30.85	30.77

จากรูปที่ 3.8 แสดงกราฟการเปรียบเทียบค่า sim ของสัญญาณลายน้ำที่ผ่านการบีบอัดสัญญาณด้วย JPEG compression 10% ของวิธีการที่นำเสนอและวิธีการของ Cox *et al.* ซึ่งจะเห็นว่าค่า sim ของสัญญาณลายน้ำที่ตำแหน่ง 500 ยังคงสามารถตรวจจับได้ทั้งสองวิธี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งสองวิธีมีความทนทานต่อการ โจมตีด้วย JPEG compression ที่ใกล้เคียงกัน



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.8 เปรียบเทียบค่า *sim* ระหว่าง (ก) ภาพที่ผ่านการ โจมตีด้วย JPEG compression 10% ของวิธีการที่นำเสนอ และ (ข) ภาพที่ผ่านการ โจมตีด้วย JPEG compression 10% ของวิธีการ Cox *et al.*[5]

3.6 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอการฝังสัญญาณลายน้ำสำหรับภาพจากกล้อง SEM ด้วยเทคนิคการฝังสัญญาณลายน้ำแบบกระจายแถบความถี่โดยใช้การแปลง DCT เพื่อทำการแปลงภาพจากโดเมนเชิงพื้นที่เป็นโดเมนความถี่และได้นำทฤษฎีระบบการมองเห็นของมนุษย์มาใช้เป็นตัวคัดแยกความแตกต่างของภาพอินพุตให้กับเครือข่ายประสาทเทียมเพื่อทำการเรียนรู้และปรับค่าความแรงของสัญญาณลายน้ำให้เหมาะสมที่สุดกับภาพนั้น ๆ ผลจากการทดลองฝังลายน้ำลงบนภาพ SEM ที่แตกต่างกันทั้งสี่ภาพพบว่าวิธีการที่นำเสนอมี *PSNR* ที่สูงขึ้นและมีความทนทานต่อการถูกโจมตีต่าง ๆ ใกล้เคียงกับวิธีการเดิม