บทที่ 4
ผลการทดสอบความทนทานของลายน้ำ

เมื่อทราบช่วงสัมประสิทธิ์ที่จะใส่ลายน้ำและความเข้มของลายน้ำแล้ว ต่อไปจะนำภาพที่ใส่ลายน้ำไปทดสอบความทนทาน (Robustness) ต่อการประมวลผลภาพแบบต่าง ๆ ซึ่งเป็นความต้องการพื้นฐานหนึ่งของการใส่ลายน้ำ ได้แก่ การบีบอัดภาพแบบ JPEG, การนำไปผ่าน Median filter, การใส่สัญญาณรบกวนแบบเกาส์, Histogram Equalization, การตัดรูปออก (Cropping) และการบีบอัดภาพแบบ JPEG แล้วตัดรูปออก เพื่อหาจำนวนบิตข้อมูลลิขสิทธิ์ที่มากที่สุดที่สามารถฝังลงไปในรูปทดสอบได้เมื่อผ่านการประมวลผลภาพแต่ละวิธี ทั้งนี้โดยใช้เกณฑ์ว่าต้องมีค่า Bit Error Rate ในการตรวจจับลายน้ำไม่เกิน $1x10^{-3}$ ลายน้ำซึ่งเป็นข้อมูลลิขสิทธิ์นี้จะถูกใส่ลงในรูปภาพด้วยวิธีการใส่ลายน้ำแบบไม่บอดในช่วงสัมประสิทธิ์ที่หาไว้สำหรับแต่ละรูปทดสอบ โดยที่ในรูปนั้นมี hash ของรูปต้นฉบับซึ่งถูกฝังแบบบอดอยู่ด้วย บิตของลายน้ำจะถูกนำไปเข้ารหัสเทอร์โบแล้วเรียงซ้ำไปทั้งช่วงสัมประสิทธิ์การแปลงโคไซน์ จำนวนบิตจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยเปลี่ยนค่า spreading factor cr_2 ไปทีละหนึ่งซึ่งจะทำให้จำนวนบิตที่ใส่ลงไปเปลี่ยนแปลงลดลงเป็นขั้นไม่ต่อเนื่อง ในแต่ละค่า cr_2 ตรวจจับลายน้ำแล้วหา Bit Error Rate จนกว่าจะได้ BER ไม่เกิน $1x10^{-3}$

ถ้าบิตข้อมูลมีความยาว m และถูกนำไปเข้ารหัสเทอร์โบที่มีอัตราการเข้ารหัสเป็น 1/3 รหัสเทอร์โบจะมีการเติมบิตส่วนหางออกไป 18 บิตเพื่อทำให้สถานะสุดท้ายเป็นศูนย์ จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

จำนวนสัมประสิทธิ์ที่ถูกฝังลายน้ำ = (3m+18) x cr2 (4.1)

ในการทดสอบจะหาจำนวนบิตที่มากที่สุดในแต่ละค่า spreading factor cr2 โดยจำนวนสัมประสิทธิ์ที่ถูกฝังลายน้ำนี้ต้องมีค่าไม่เกินจำนวนสัมประสิทธิ์ในช่วงที่ได้หาไว้สำหรับแต่ละรูป ยกตัวอย่างสำหรับรูปทดสอบ Lena ซึ่งมีช่วงสัมประสิทธิ์การฝังลายน้ำ 1 – 41500 เมื่อใช้ spreading factor cr2 = 6 จะได้ว่าจำนวนบิตที่มากที่สุด m = ((41500/6) –18)/3 = 2299 บิต และถ้า cr2 = 7,8 จะได้ m เท่ากับ 1970 และ 1723 บิต ตามลำดับ

4.1 การทดสอบความทนทานโดยการทำ JPEG ที่ Quality Factor 80

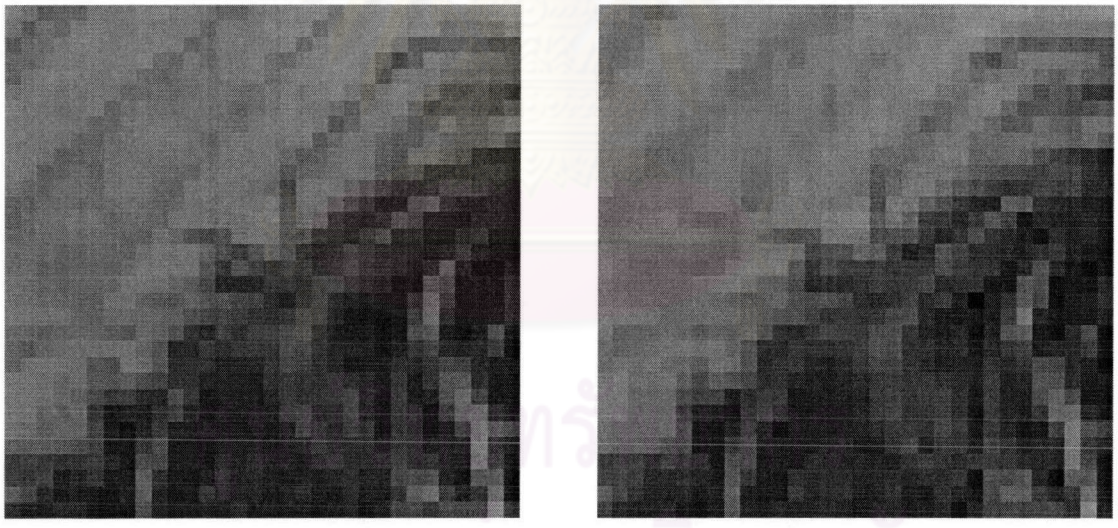
ภาพที่ฝังลายน้ำแล้วจะถูกนำไปบีบอัดแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 แล้วนำไปตรวจจับหาลายน้ำเพื่อหาจำนวนบิตที่ฝังลงในภาพได้มากที่สุดเมื่อกำหนดให้ Bit Error Rate มีค่าไม่เกิน 10^{-3} เนื่องจาก JPEG เป็นการบีบอัดภาพแบบสูญเสีย (lossy compression) คือ การบีบอัดนั้นจะทำให้ข้อมูลสูญหายไป โดยส่วนที่ถูกกำจัดนั้นเป็นส่วนที่ไม่มีความสำคัญต่อการมองเห็นหรือส่วนประกอบความถี่สูงของภาพ ดังนั้นหากวิธีการใส่ลายน้ำที่เสนอมีความทนทานต่อ JPEG ก็สามารถสรุปได้ว่าลายน้ำนั้นอยู่ในบริเวณที่มีความสำคัญของสเปกตรัม

ตารางที่ 4.1 จำนวนบิตที่ฝังในภาพและ Bit Error Rate เมื่อทำการบีบอัดด้วย JPEG ที่ Quality Factor 80 ก่อนตรวจจับลายน้ำ

ภาพ	บิตที่ฝังได้	Spreading factor	BER
Lena	1970	7	0
	2299	**6**	**4.35×10^{-5}**
	2760	5	2.54×10^{-2}
Boat	1753	9	0
	1973	**8**	**1.13×10^{-4}**
	2255	7	2.81×10^{-3}
Baboon	1403	11	1.03×10^{-5}
	1544	**10**	**5.34×10^{-5}**
	1716	9	1.02×10^{-3}
Cameraman	3119	4	0
	4160	**3**	**7.11×10^{-4}**
	6244	2	2.19×10^{-1}

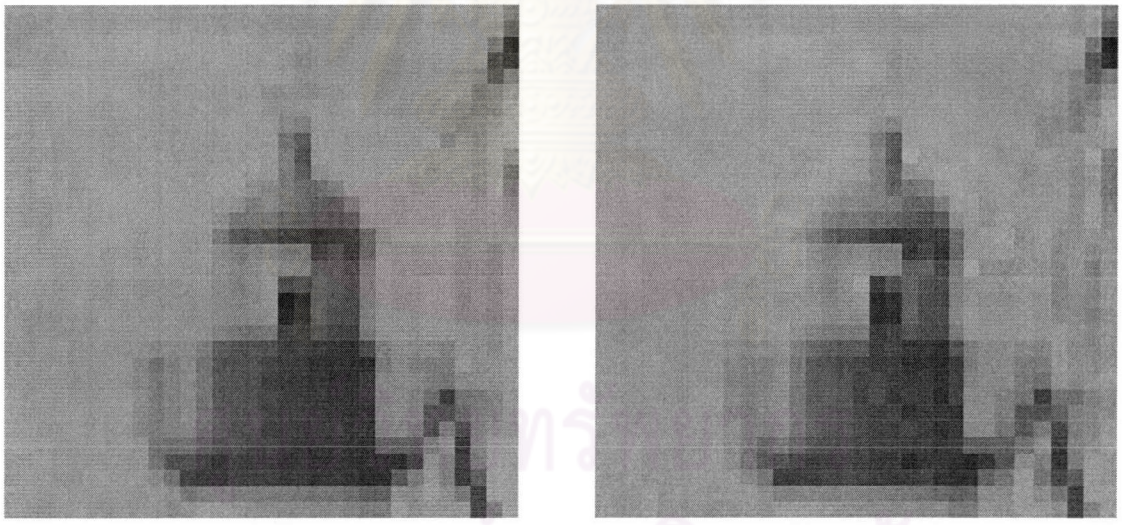
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ฝังลายน้ำ 2299 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำและทำการบีบอัดแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 (ขวา)



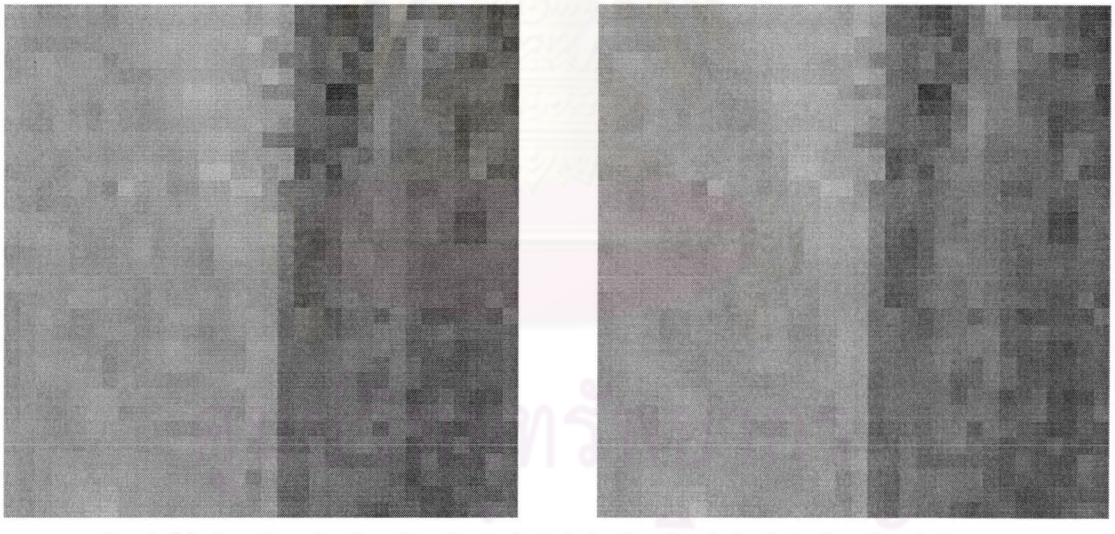
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ขยายในส่วนล้อมกรอบที่ฝังลายน้ำ 2299 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำและทำการบีบอัดแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 (ขวา)

รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบภาพ Boat ที่ฝังลายน้ำ 1973 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำและทำการบีบอัดแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 (ขวา)

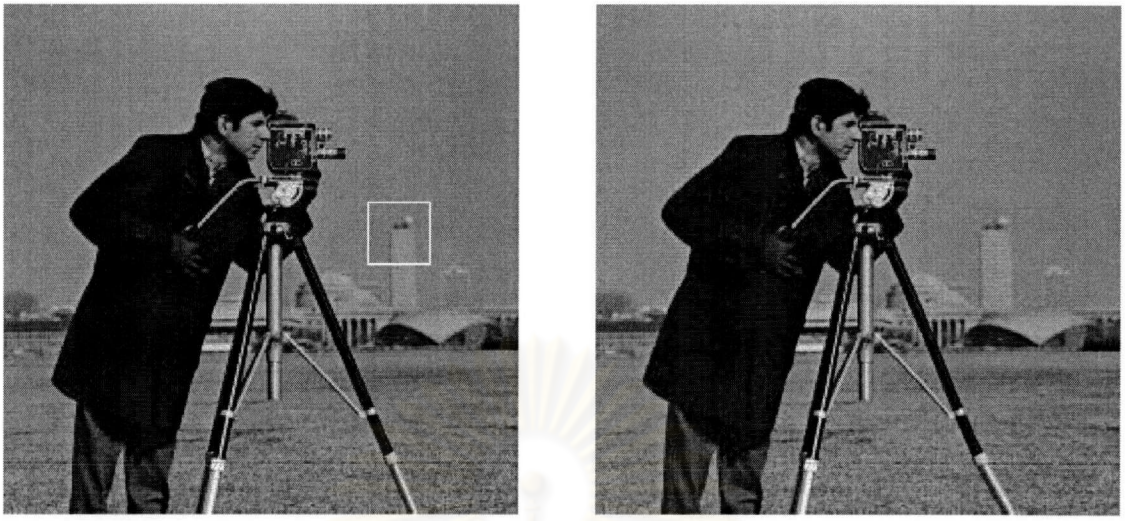


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบภาพ Boat ที่ขยายในส่วนล้อมกรอบที่ฝังลายน้ำ 1973 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำและทำการบีบอัดแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 (ขวา)

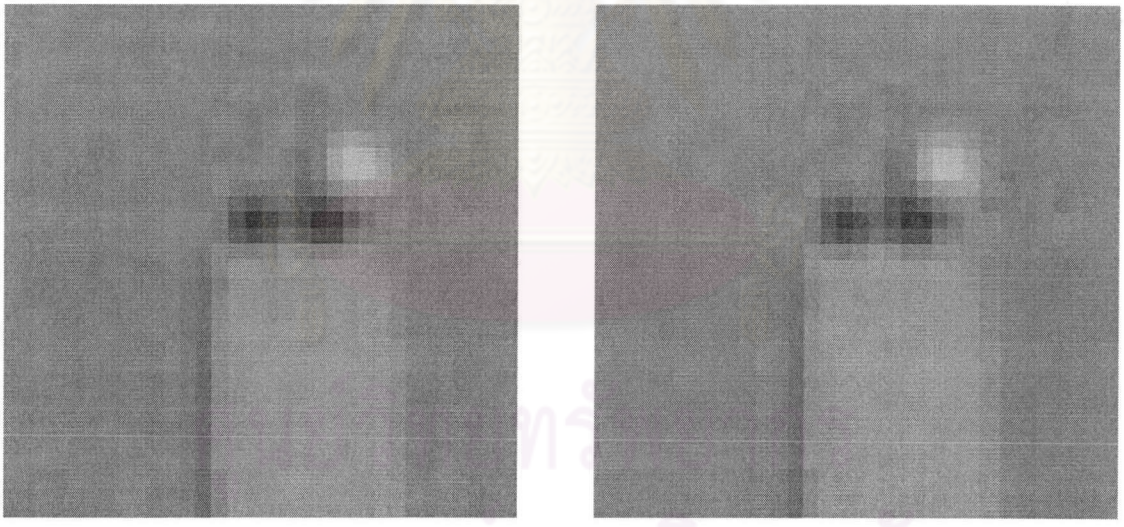
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบภาพ Baboon ที่ฝังลายน้ำ 1544 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำและทำการบีบอัดแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 (ขวา)



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบภาพ Baboon ที่ขยายในส่วนล้อมกรอบที่ฝังลายน้ำ 1544 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำและทำการบีบอัดแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 (ขวา)

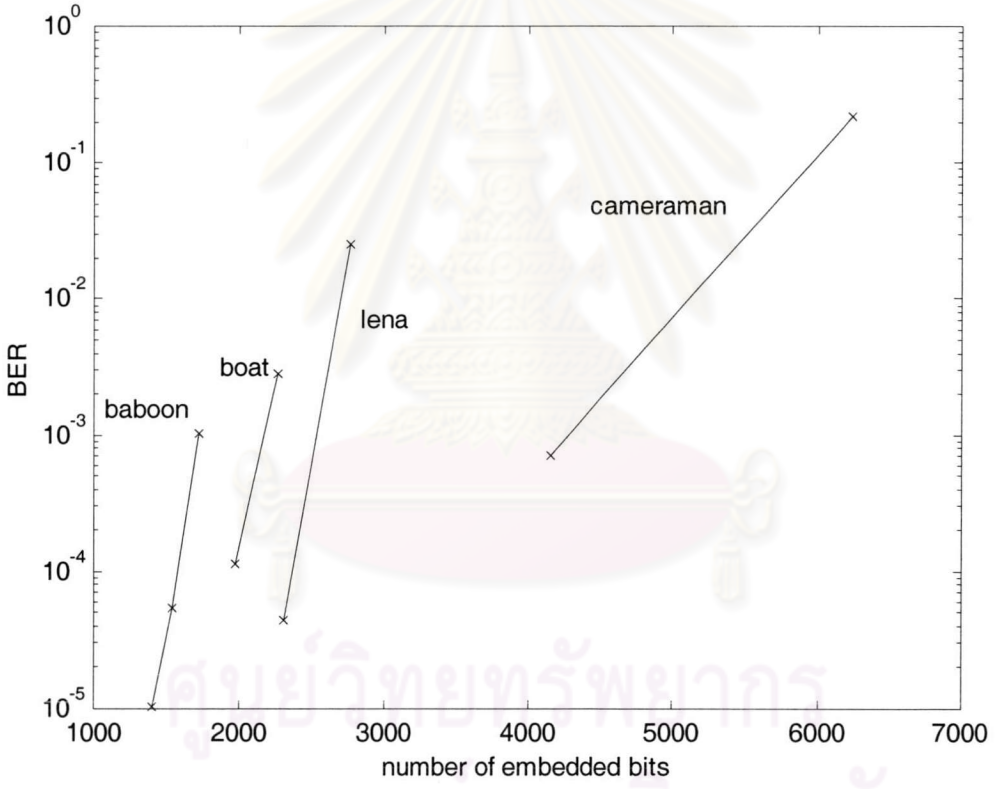


รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบภาพ Cameraman ที่ฝังลายน้ำ 4160 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำและทำการบีบอัดแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 (ขวา)



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบภาพ Cameraman ที่ขยายในส่วนล้อมกรอบที่ฝังลายน้ำ 4160 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำและทำการบีบอัดแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 (ขวา)

จากตารางสรุปและกราฟด้านล่างสรุปได้ว่า เมื่อทำการบีบอัดภาพด้วย JPEG ที่ Quality Factor 80 ภาพ Lena, ภาพ Boat, ภาพ Baboon และภาพ Cameraman สามารถฝังข้อมูลลิขสิทธิ์ได้มากที่สุด 2299, 1973, 1544, และ 4160 บิต ตามลำดับ เนื่องจากหากทดลองให้จำนวนบิตที่ฝังได้ในภาพมีค่ามากขึ้นโดยลด spreading factor cr2 ลง จะทำให้ค่า BER เกินเกณฑ์ที่กำหนดคือ 1×10^{-3} ส่วนการที่ภาพ Baboon สามารถฝังข้อมูลได้น้อยมากเมื่อเทียบกับภาพอื่นเนื่องจากว่าภาพ Baboon มีส่วนประกอบสำคัญของภาพส่วนใหญ่อยู่ในความถี่สูงซึ่งจะทำให้รายละเอียดของภาพหายไปมากกว่าภาพอื่นเมื่อทำการบีบอัดภาพแบบ JPEG



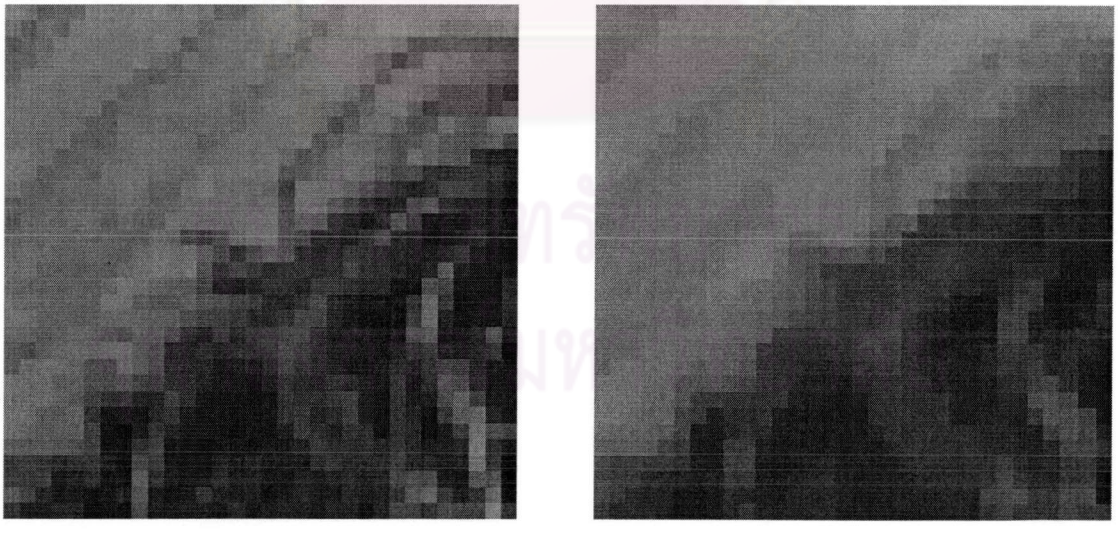
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนบิตของข้อมูลที่ฝังกับ BER ที่ได้ของภาพ Lena, Boat, Baboon, Cameraman เมื่อทำการทดสอบความทนทานโดยการบีบอัดด้วย JPEG ที่ Quality Factor 80

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 การทดสอบความทนทานโดยการทำ Median Filtering

ภาพที่ฝังลายน้ำแล้วจะถูกนำไปผ่าน Median Filter ที่มีขนาดหน้าต่าง 3x3 แล้วนำไปตรวจจับหาลายน้ำเพื่อหาจำนวนบิตที่ฝังลงในภาพได้มากที่สุดเมื่อกำหนดให้ Bit Error Rate มีค่าไม่เกิน 10^{-3}

รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ฝังลายน้ำ 141 บิต (ซ้าย) กับภาพที่ฝังลายน้ำบิตแล้วทำ Median Filtering ขนาด 3 x 3 (ขวา)



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ขยายในส่วนล้อมกรอบที่ฝังลายน้ำ 141 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำแล้วทำ Median Filtering ขนาด 3 x 3 (ขวา)

ตารางที่ 4.2 จำนวนบิตที่ฝังในภาพ Lena และ Bit Error Rate เมื่อทำ Median Filtering ขนาด 3 x 3 ก่อนตรวจจับลายน้ำ

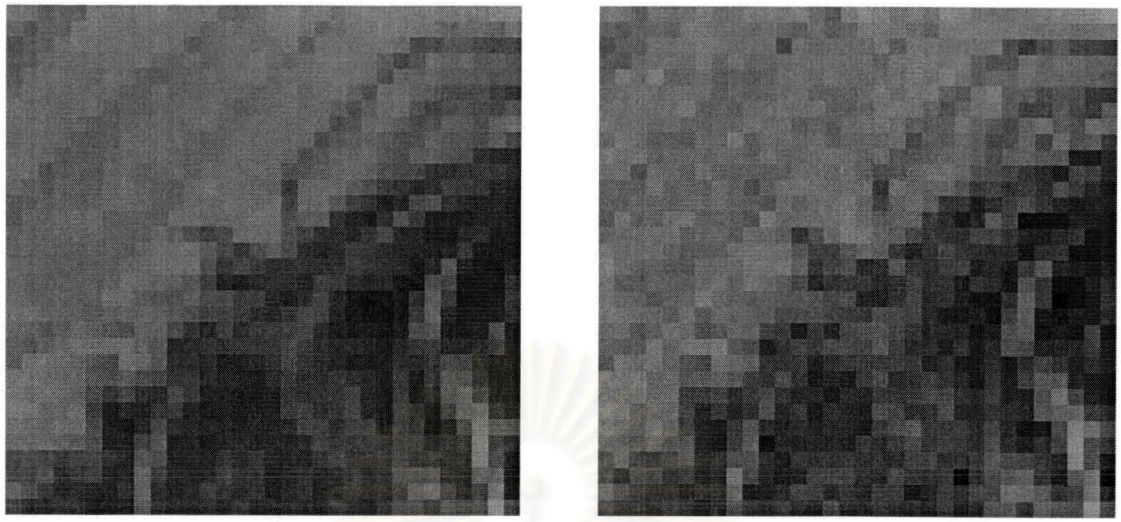
ภาพ	บิตที่ฝังได้	Spreading factor	BER
Lena	139	95	4.21×10^{-5}
	141	**94**	**7.15×10^{-4}**
	142	93	8.93×10^{-3}

จากตารางสรุปได้ว่าเมื่อนำภาพ Lena ที่ใส่ลายน้ำแล้วไปทำ Median Filtering ขนาด 3 x 3 สามารถฝังข้อมูลลิขสิทธิ์ได้มากที่สุด 141 บิต เนื่องจากหากทดลองให้จำนวนบิตที่ฝังได้ในภาพมีค่ามากขึ้นโดยลด spreading factor cr2 ลง จะทำให้ค่า BER เกินเกณฑ์ที่กำหนดคือ 1×10^{-3}

4.3 การทดสอบความทนทานโดยการใส่สัญญาณรบกวนแบบเกาส์

ภาพที่ฝังลายน้ำแล้วจะนำไปใส่สัญญาณรบกวนแบบเกาส์ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีความแปรปรวน 0.001 เท่ากับมีค่า SNR 24.2 dB แล้วนำไปตรวจจับหาลายน้ำเพื่อหาจำนวนบิตที่ฝังลงในภาพได้มากที่สุดเมื่อกำหนดให้ Bit Error Rate มีค่าไม่เกิน 10^{-3}

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ฝังลายน้ำ 1251 บิต (ซ้าย) กับภาพที่ฝังลายน้ำแล้วใส่สัญญาณรบกวนแบบเกาส์ (ขวา)



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ขยายในส่วนล้อมกรอบที่ฝังลายน้ำ 1251 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำแล้วใส่สัญญาณรบกวนแบบเกาส์ (ขวา)

ตารางที่ 4.3 จำนวนบิตที่ฝังในภาพ Lena และ Bit Error Rate เมื่อทำการฝังสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ก่อนตรวจจับลายน้ำ

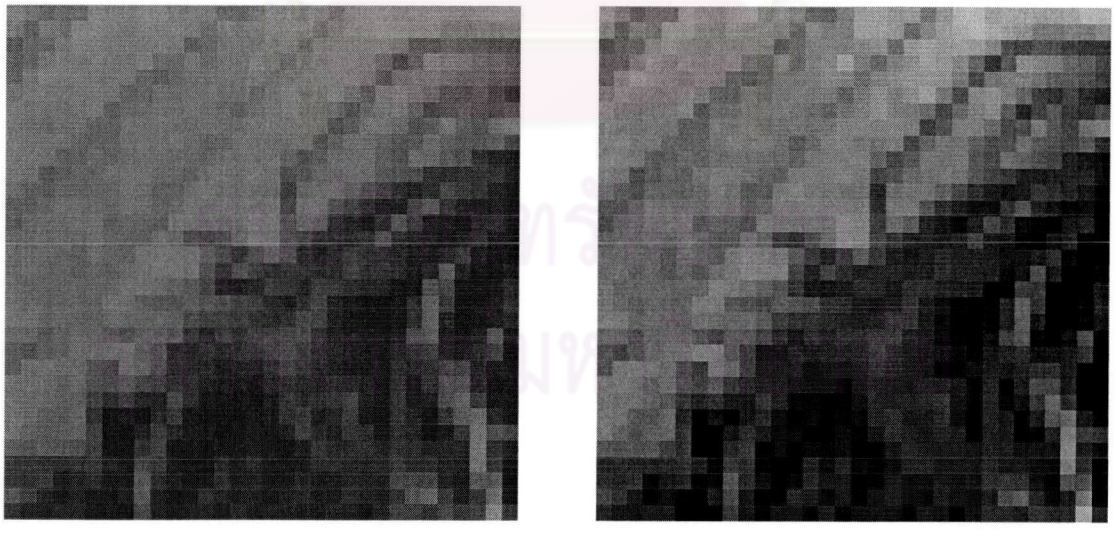
ภาพ	บิตที่ฝังได้	Spreading factor	BER
Lena	1146	12	3.34×10^{-5}
	1251	**11**	**1.12×10^{-4}**
	1377	10	4.56×10^{-2}

จากตารางสรุปได้ว่าเมื่อนำภาพ Lena ที่ใส่ลายน้ำแล้วไปใส่สัญญาณรบกวนแบบเกาส์ สามารถฝังข้อมูลลิขสิทธิ์ได้มากที่สุด 2299 บิต เนื่องจากหากทดลองให้จำนวนบิตที่ฝังได้ในภาพมีค่ามากขึ้นโดยลด spreading factor cr2 ลง จะทำให้ค่า BER เกินเกณฑ์ที่กำหนดคือ 1×10^{-3}

4.4 การทดสอบความทนทานโดยการทำ Histogram equalization

ภาพที่ฝังลายน้ำแล้วจะนำไปทำ Histogram equalization ซึ่งก็คือการกระจาย histogram ของภาพออกให้สม่ำเสมอกันมากขึ้น แล้วนำไปตรวจจับหาลายน้ำเพื่อหาจำนวนบิตที่ฝังลงในภาพได้มากที่สุดเมื่อกำหนดให้ Bit Error Rate มีค่าไม่เกิน 10^{-3}

รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ฝังลายน้ำ 6910 บิต (ซ้าย) กับภาพที่ฝังลายน้ำแล้วทำ Histogram equalization (ขวา)



รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ขยายในส่วนล้อมกรอบที่ฝังลายน้ำ 6910 บิต (ซ้าย) และภาพที่ฝังลายน้ำแล้วทำ Histogram equalization (ขวา)

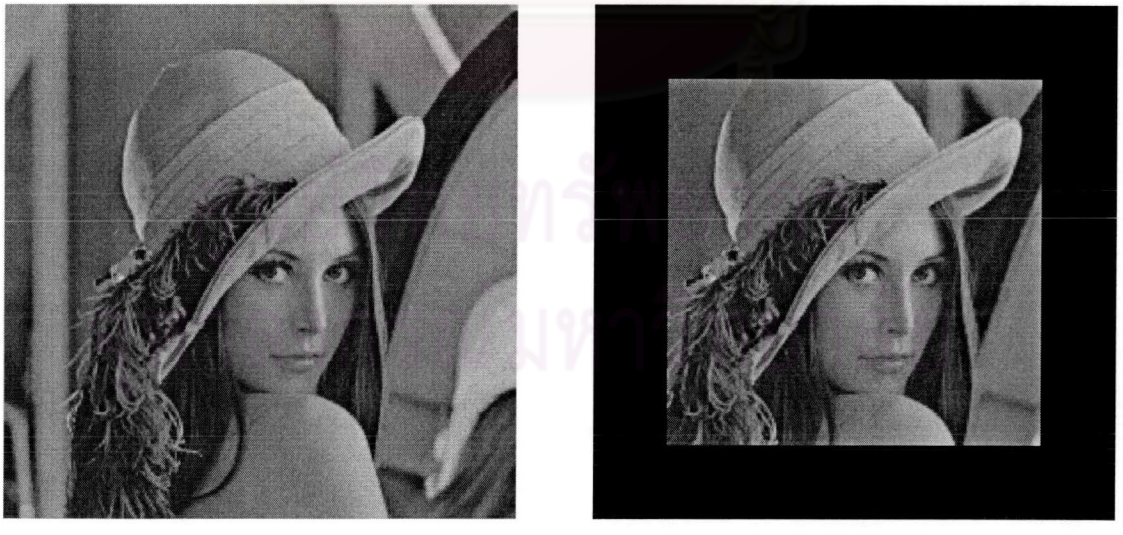
ตารางที่ 4.4 จำนวนบิตที่ฝังในภาพ Lena และ Bit Error Rate เมื่อทำ Histogram equalization ก่อนตรวจจับลายน้ำ

ภาพ	บิตที่ฝัง	Spreading factor	BER
Lena	6910	2	0.01×10^{-5}
	13827	1	1.51×10^{-3}

จากตารางสรุปได้ว่าเมื่อนำภาพ Lena ที่ใส่ลายน้ำแล้วไปทำ Histogram equalization สามารถฝังข้อมูลลิขสิทธิ์ได้มากที่สุด 6910 บิต เนื่องจากหากทดลองให้จำนวนบิตที่ฝังได้ในภาพมีค่ามากขึ้นโดยลด spreading factor cr2 ลง จะทำให้ค่า BER เกินเกณฑ์ที่กำหนดคือ 1×10^{-3}

4.5 การทดสอบความทนทานโดยการตัดรูปออก

ภาพที่ฝังลายน้ำแล้วจะนำไปทำการตัดบางส่วนของภาพออก (Crop) ซึ่งเหมือนกับว่าเป็นการสูญเสียข้อมูลบางส่วนโดยจะทำการตัดขอบออกให้เหลือตรงกลางโดยมีพื้นที่ครึ่งหนึ่งของรูปเดิม แล้วนำไปตรวจจับหาลายน้ำเพื่อหาจำนวนบิตที่ฝังลงในภาพได้มากที่สุดเมื่อกำหนดให้ Bit Error Rate มีค่าไม่เกิน 10^{-3}



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ฝังลายน้ำ 6910 บิต (ซ้าย) กับภาพที่ฝังลายน้ำแล้วทำการตัดรูปบางส่วน

ตารางที่ 4.5 จำนวนบิตที่ฝังในภาพ Lena และ Bit Error Rate เมื่อทำการตัดรูปออกบางส่วนก่อนตรวจจับลายน้ำ

ภาพ	บิตที่ฝัง	Spreading factor	BER
Lena	4605	3	0
	6910	**2**	**1.37×10^{-5}**
	13827	1	1.93×10^{-1}

จากตารางสรุปได้ว่าเมื่อนำภาพ Lena ที่ใส่ลายน้ำแล้วไปตัดรูปออกบางส่วน สามารถฝังข้อมูลลิขสิทธิ์ได้มากที่สุด 6910 บิต เนื่องจากหากทดลองให้จำนวนบิตที่ฝังได้ในภาพมีค่ามากขึ้นโดยลด spreading factor cr2 ลง จะทำให้ค่า BER เกินเกณฑ์ที่กำหนดคือ 1×10^{-3}

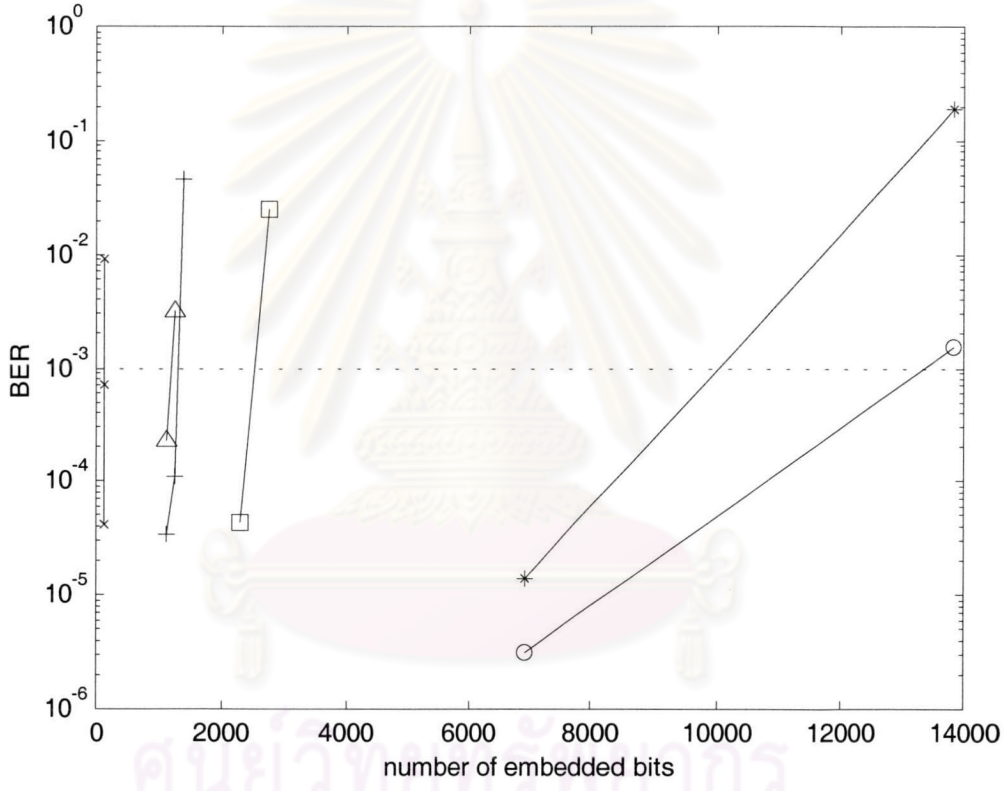
4.6 การทดสอบความทนทานโดยการทำ JPEG ที่ Quality Factor 80 แล้วตัดรูปออก

ภาพที่ฝังลายน้ำแล้วจะนำไปทำ JPEG ที่ Quality Factor 80 แล้วตัดบางส่วนของภาพออกให้เหลือพื้นที่ครึ่งหนึ่งของรูปเดิมแล้วนำไปตรวจจับหาลายน้ำเพื่อหาจำนวนบิตที่ฝังลงในภาพได้มากที่สุดเมื่อกำหนดให้ Bit Error Rate มีค่าไม่เกิน 10^{-3}

รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบภาพ Lena ที่ฝังลายน้ำ 1146 บิต (ซ้าย) กับภาพที่ฝังลายน้ำแล้วทำ JPEG ที่ Quality Factor 80 แล้วตัดรูปออกบางส่วน

ตารางที่ 4.6 จำนวนบิตที่ฝังในภาพ Lena และ Bit Error Rate เมื่อทำ JPEG ที่ Quality Factor 80 แล้วตัดรูปออกบางส่วนก่อนตรวจจับลายน้ำ

ภาพ	บิตที่ฝัง	Spreading factor	BER
Lena	1058	13	0
	1146	**12**	**2.25×10^{-4}**
	1251	11	3.13×10^{-3}



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนบิตข้อมูลที่ฝังได้กับ BER ของภาพ Lena เมื่อนำไปทำ JPEG ที่ Quality Factor 80, Median Filtering, ใส่สัญญาณรบกวนแบบเกาส์, Histogram Equalization, ตัดรูปออก และทำ JPEG ที่ Quality Factor 80 แล้วตัดรูปออก

แทน JPEG ที่ Q 80

\+ แทน การใส่สัญญาณรบกวนแบบเกาส์

* แทน การตัดภาพออก

x แทน Median Filtering

O แทน Histogram Equalization

Δ แทน JPEG ที่ Q 80 แล้วตัดรูปออก

4.7 วิเคราะห์ผลการทดสอบความทนทาน

จากผลการทดสอบหาปริมาณข้อมูลที่มากที่สุดที่สามารถฝังลงในรูปภาพได้โดยไม่ทำให้ Bit Error Rate มีค่าเกิน 10^{-3} สำหรับการทดสอบความทนทานแบบต่าง ๆ นั้น สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ลายน้ำจะมีความทนทานต่อการประมวลผลภาพในระดับที่ใส่ข้อมูลลงไปได้เกินกว่า 1000 บิตขึ้นไป ยกเว้นกรณีการทำ Median Filtering มีจำนวนบิตข้อมูลที่ฝังได้ 141 บิต ซึ่งหากพิจารณาจากภาพขยายของภาพที่ใส่ลายน้ำแล้วนำไปทำ Median Filtering จะพบว่า เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากเมื่อเทียบกับการประมวลผลภาพแบบอื่น ๆ จึงอาจทำให้ลายน้ำซึ่งอยู่ในบริเวณที่มีความสำคัญต่อการมองเห็นถูกทำลายไป จำนวนบิตข้อมูลที่ฝังได้จึงน้อยกว่าการทดสอบความทนทานแบบอื่น

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณข้อมูลที่ใส่ได้ในภาพ Lena ระหว่างวิธีที่เสนอกับการใส่ลายน้ำแบบบอดที่ใช้การเข้ารหัสเทอร์โบ [14] เนื่องจากใช้ตัววัดระดับการมองเห็นเดียวกัน ที่จำนวนจุดเสียไม่เกิน 200 จุดและ Bit Error Rate ไม่เกิน 10^{-3} พบว่า ในการทดสอบด้วย Median Filtering วิธีในงานวิจัยนี้ใส่ลายน้ำได้น้อยกว่า ส่วนการทดสอบอื่นจะได้จำนวนบิตที่ใส่ได้มากกว่าวิธีใส่ลายน้ำแบบบอดค่อนข้างมาก

ที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อรูปถูกทำให้เปลี่ยนไปจากเดิมมาก ส่วนที่ได้จากการลบรูปต้นฉบับจากการประมาณออกจากรูปทดสอบจะใกล้เคียงกับลายน้ำที่ใส่เข้าไปมากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพของรหัสเทอร์โบในการแก้ไขความผิดพลาดสูงกว่า และอีกประการหนึ่งคืองานวิจัยนี้ได้ออกแบบช่วงสัมประสิทธิ์การใส่ลายน้ำให้ทนทานต่อการบีบอัดภาพแบบ JPEG ที่ Quality Factor 80 ทำให้อาจไม่ทนทานต่อการประมวลผลภาพแบบอื่น

ตารางที่ 4.7 จำนวนบิตที่ฝังได้ในภาพ Lena เปรียบเทียบระหว่างวิธีที่เสนอกับวิธีใน [14]

การทดสอบความทนทาน	วิธีใส่ลายน้ำที่เสนอ	วิธีใส่ลายน้ำใน [14]
JPEG ที่ Q 80	2299	635
Median Filtering	141	232
Noise Adding	1251	372
Histogram Equalization	6910	2077
Cropping	6910	514
JPEG ที่ Q 80 & Cropping	1146	145