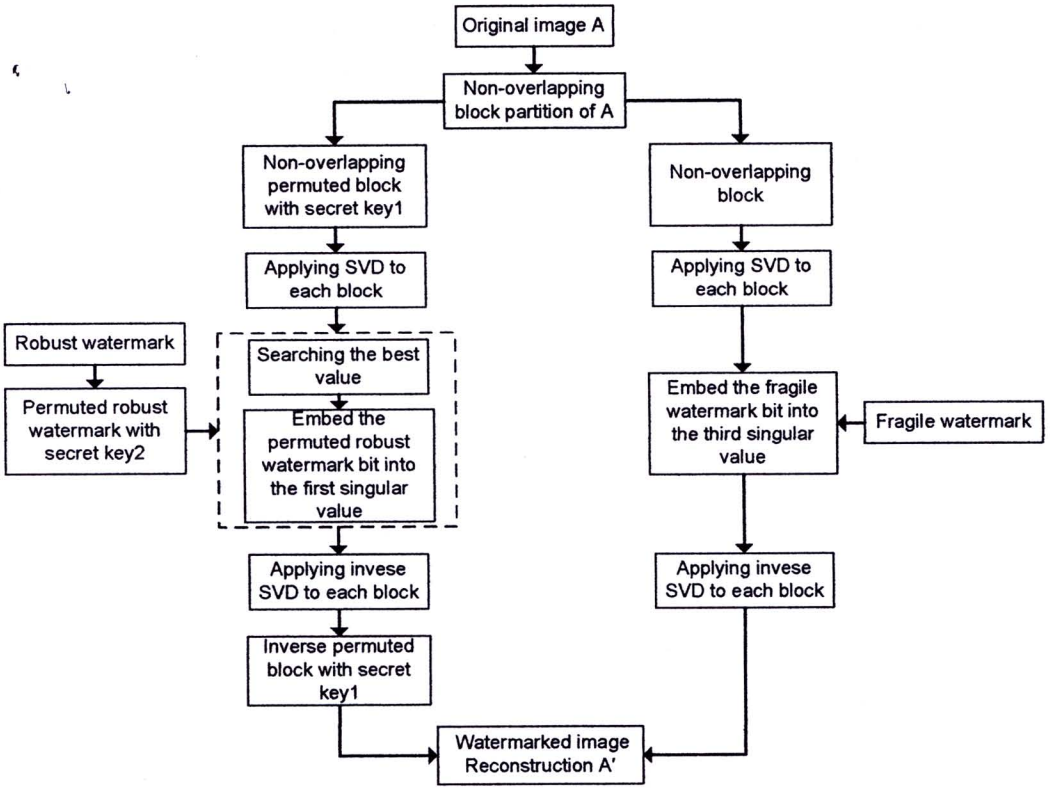
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัยในบทนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนคือ กระบวนการฝังลายน้ำอเนกประสงค์ กระบวนการถอดลายน้ำอเนกประสงค์ และการวัดค่าประสิทธิภาพ

3.1 วิธีการฝังลายน้ำอเนกประสงค์ (Multipurpose watermark embedded)



รูปที่ 3.1 วิธีการฝังลายน้ำอเนกประสงค์

จากรูปที่ 3.1 แสดงถึงวิธีการฝังลายน้ำอเนกประสงค์ลงในภาพต้นฉบับ โดยใช้เทคนิคการฝังลายน้ำอเนกประสงค์บนเอสวีดี (Multipurpose watermarking scheme based on SVD) ซึ่งอธิบายลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

3.1.1 ลายน้ำอเนกประสงค์ (Multipurpose watermark)

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดของลายน้ำอเนกประสงค์ที่นำเสนอ ภายในขั้นตอนของลายน้ำอเนกประสงค์ประกอบด้วยลายน้ำดิจิตอล 2 ประเภท โดยลายน้ำดิจิตอลแต่ละประเภทจะฝังลงต่อเนื่องบนรูปภาพ ลายน้ำแบบคงทนจะถูกฝังลงก่อน หลังจากนั้นลายน้ำแบบเปราะบางจะถูกฝังซ้อนทับบนรูปภาพเดียวกัน แนวคิดของลายน้ำอเนกประสงค์ก็คือจะใช้ลายน้ำแบบคงทนในการพิสูจน์ความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์เพื่อยืนยันความเป็นเจ้าของรูปภาพ และใช้ลายน้ำแบบเปราะบางในการตรวจสอบเพื่อรับรองความเป็นต้นฉบับ เพื่อตอบคำถามว่ารูปภาพนี้มีการแก้ไขหรือไม่

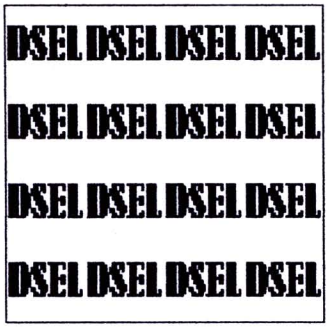
ก. ลายน้ำแบบคงทน (Robust watermark)

ลายน้ำประเภทคงทนที่นำเสนอนี้เป็นภาพระดับสีเทาที่มีความหมาย สำหรับในงานวิจัยนี้ลายน้ำแบบคงทนควรจะต้องผสมเข้ากับชุดสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียม (Pseudo random noise sequence) ก่อนนำไปฝัง เพื่อให้ผู้ละเมิดลิขสิทธิ์ที่ต้องการจะถอดรหัสลายน้ำสามารถทำได้ยาก ตัวอย่างของลายน้ำแบบคงทน ดังแสดงในรูปที่ 3.2

รูปที่ 3.2 ลายน้ำแบบคงทนที่นำเสนอ

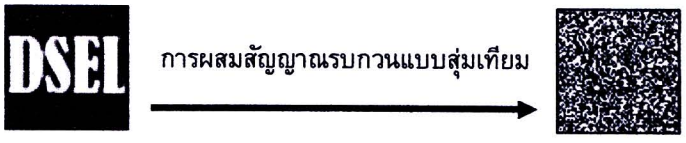
ข. ลายน้ำแบบเปราะบาง (Fragile watermark)

ลายน้ำแบบเปราะบางที่ใช้งานวิจัยนี้เป็นภาพไบนารี ตัวอย่างของลายน้ำแบบเปราะบาง ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลายน้ำแบบเปราะบางที่นำเสนอ

ดังนั้นค่าความเข้มของจุดภาพในแต่ละบริเวณของลายน้ำแบบคงทนจะต้องมีการกระจายที่เหมาะสม ลายน้ำแบบคงทนจะสามารถมองเห็นได้ชัดเจนเมื่อมีการกระจายของค่าความเข้มนี้อย่างไม่เหมาะสม ทำให้การกำจัดลายน้ำแบบคงทนด้วยโปรแกรมทั่วๆ ไปสามารถทำได้ ฉะนั้นเพื่อป้องกันการมองเห็นลายน้ำแบบคงทน เมื่อทำการฝังลงในรูปภาพต้นฉบับแล้วจึงทำ "การผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียม" ดังแสดงในรูปที่ 3.4 เพื่อเป็นการเข้ารหัสในแต่ละตำแหน่งของจุดภาพบนลายน้ำแบบคงทนอย่างทั่วถึงก่อนที่จะนำไปฝังยังรูปภาพต้นฉบับ โดยรหัสลับที่ใช้สร้างชุดสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมนี้ จะต้องเป็นรหัสเดียวกันทั้งในขั้นตอนการฝังและถอดลายน้ำแบบคงทนจึงจะได้ลายน้ำดิจิตอลกลับคืนมา



รูปที่ 3.4 การกระจายตำแหน่งจุดภาพของลายน้ำแบบคงทนแบบสุ่มเทียม

กำหนดให้ W_R แทนลายน้ำแบบคงทนซึ่งเป็นภาพระดับสีเทาที่มีขนาด $M_1 \times M_2$ จุดภาพ สีดำถูกแทนด้วยค่า 0 และสีขาวถูกแทนด้วยค่า 255 โทนสีจะไล่ระดับจากเข้มมาอ่อนและถูกแทนด้วยจำนวนเต็มที่มีค่าระหว่างค่าทั้งสอง โดยภาพระดับสีเทาถูกแทนที่ด้วย 256 ระดับสี หรือ 2^8 โดย 8 คือจำนวนบิตในหน่วยความจำที่ใช้เพื่อเก็บค่าหนึ่งค่า ดังนั้นสีดำมีค่าความเข้มเป็น 0 หรือเขียนแทนด้วย 00000000_2 และสีขาวมีค่าความเข้มเป็น 255 ลายน้ำแบบคงทนสามารถแทนด้วยสมการที่ (3.1)

$$W_R = \{W_R(i,j); 0 \le i < M_1, 0 \le j < M_2\} \tag{3.1}$$

เมื่อ $W_R(i,j) \in \{0,...,2^L - 1\}$ คือความเข้มของจุดภาพที่ตำแหน่ง (i,j) และ L คือจำนวนหน่วยความจำซึ่งมีหน่วยเป็นบิตที่ใช้ในแต่ละจุดภาพ

กำหนดให้ PN แทนชุดสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมที่มีขนาด $M_1 \times M_2$ จุดภาพ เครื่องหมาย $\oplus$ แทนการกระทำ Exclusive-OR และ W_{RP} คือลายน้ำแบบคงทนที่ผ่านการผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมบนจุดภาพ การผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมบนจุดภาพของลายน้ำแบบคงทนกระทำด้วยสมการที่ (3.2)

$$W_{RP} = W_R \oplus PN \tag{3.2}$$

3.1.2 การแบ่งบริเวณภาพต้นฉบับ (Non-overlapping block partition of original image)

การแบ่งบริเวณภาพต้นฉบับเพื่อฝังลายน้ำแบบคงทนและแบบเปราะบางไม่ให้ซ้อนทับกันบนเอสวีดีเป็นเทคนิคสำคัญของงานวิจัยนี้ เนื่องจากผู้วิจัยต้องพยายามหลบเลี่ยงไม่ให้ลายน้ำทั้งสองแบบถูกฝังซ้อนทับกันบนบริเวณของภาพต้นฉบับ หากว่าลายน้ำทั้งสองแบบถูกฝังซ้อนทับกันบนบริเวณของภาพต้นฉบับแล้ว จะทำให้ลายน้ำทั้งสองแบบที่ถอดได้จากภาพผลลัพธ์ที่มีลายน้ำฝังอยู่ทำได้ไม่สมบูรณ์

การแบ่งบริเวณหลบเลี่ยงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เริ่มจากการแบ่งพื้นที่ของภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณ (Block) ที่ไม่ซ้อนทับกัน 2 ขนาด ได้แก่ 8×8 จุดภาพ และ 4×4 จุดภาพ โดยที่ขนาดบริเวณ 8×8 จุดภาพ จะถูกนำมาใช้สำหรับฝังลายน้ำแบบคงทน จึงต้องเลือกขนาดบริเวณที่มีค่าพลังงานสูง เพราะค่าพลังงานสูงจะมีความคงทนต่อการโจมตีมากกว่าค่าพลังงานต่ำ

สำหรับขนาดบริเวณ 4×4 จุดภาพ จะถูกนำมาใช้ฝังลายน้ำแบบเปราะบาง เพราะมีค่าพลังงานต่ำเหมาะสำหรับลายน้ำแบบเปราะบางที่ถูกฝังไว้ในข้อมูลสามารถแสดงกรอบบริเวณที่ถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้อย่างละเอียดชัดเจน เพราะถ้าใช้ขนาดบริเวณใหญ่ขึ้นจะทำให้สามารถแสดงกรอบบริเวณที่ถูกเปลี่ยนแปลงใหญ่ขึ้นตามไปด้วย

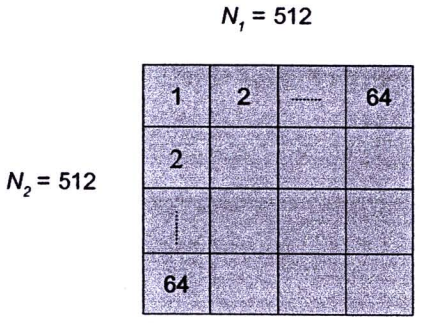
ก. การแบ่งบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันสำหรับฝังลายน้ำแบบคงทน

กำหนดให้ A แทนภาพต้นฉบับซึ่งเป็นภาพระดับสีเทาที่มีขนาด $N_1 \times N_2$ จุดภาพ สามารถแทนด้วยสมการที่ (3.3)

$$A = \{A(i,j); 0 \le i < N_1, 0 \le j < N_2\} \tag{3.3}$$

เมื่อ $A(i,j) \in \{0,...,2^L - 1\}$ คือความเข้มของจุดภาพที่ตำแหน่ง (i,j) และ L คือจำนวนหน่วยความจำซึ่งมีหน่วยเป็นบิต (Bit) ที่ใช้ในแต่ละจุดภาพ

จำนวนบริเวณทั้งหมดที่ได้มีความสัมพันธ์กับภาพต้นฉบับคือ $\frac{N_1}{k} \times \frac{N_2}{k}$ บริเวณ เช่น ในงานวิจัยนี้ใช้ภาพต้นฉบับมีขนาด 512×512 จุดภาพ และ $k = 8$ จะทำให้ได้จำนวนบริเวณในภาพต้นฉบับ 64×64 บริเวณ แต่ละบริเวณมีขนาด 8×8 จุดภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การแบ่งภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันขนาด 8×8 จุดภาพ จะได้จำนวนบริเวณตามแนวแกน *x* จำนวน 64 บริเวณและทางแนวแกน *y* จำนวน 64 บริเวณ

หลังจากทำการแบ่งภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันขนาด 8×8 จุดภาพแล้ว B_R ก่อนที่จะทำการฝังลายน้ำแบบคงทนลงบนแต่ละบริเวณของภาพต้นฉบับนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการใช้รหัสลับเพื่อสลับตำแหน่งของบริเวณที่จะฝังลายน้ำแบบคงทน เพื่อเพิ่มความปลอดภัยในกระบวนการฝังลายน้ำแบบคงทนให้มากขึ้น นอกจากนั้นยังจะช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดปัญหาการถอดลายน้ำดิจิตอลผิดพลาด (False positive problem) ได้อีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการสลับตำแหน่งของบริเวณที่จะฝังลายน้ำแบบคงทนโดยใช้วิธีการผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียม โดยรหัสลับที่ใช้ในการสลับบริเวณนี้จะต้องเป็นรหัสเดียวกันทั้งในขั้นตอนการฝังและถอดลายน้ำแบบคงทนจึงจะได้บริเวณเดิมที่เลือกไว้

กำหนดให้ PN แทนชุดสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมที่มีขนาด $N_1 \times N_2$ จุดภาพ เครื่องหมาย $\oplus$ แทนการกระทำ Exclusive-OR และ B_{RP} คือบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันขนาด 8×8 จุดภาพ ที่ผ่านการผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมบนจุดภาพ การผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมบนจุดภาพของบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันขนาด 8×8 จุดภาพ กระทำด้วยสมการที่ (3.4)

$$B_{RP} = B_R \oplus PN \tag{3.4}$$

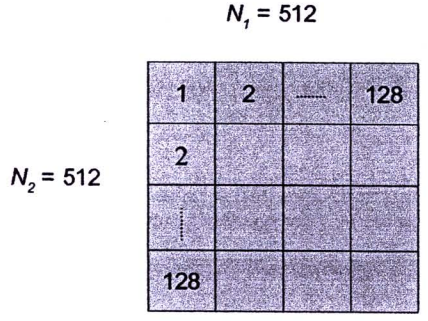
ข. การแบ่งบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันสำหรับฝังลายน้ำแบบเปราะบาง

กำหนดให้ A แทนภาพต้นฉบับซึ่งเป็นภาพระดับสีเทาที่มีขนาด $N_1 \times N_2$ จุดภาพ สามารถแทนด้วยสมการที่ (3.5)

$$A = \{A(i,j); 0 \le i < N_1, 0 \le j < N_2\} \tag{3.5}$$

เมื่อ $A(i,j) \in \{0,...,2^L - 1\}$ คือความเข้มของจุดภาพที่ตำแหน่ง (i,j) และ L คือจำนวนหน่วยความจำซึ่งมีหน่วยเป็นบิตที่ใช้ในแต่ละจุดภาพ

จำนวนบริเวณทั้งหมดที่ได้มีความสัมพันธ์กับภาพต้นฉบับคือ $\frac{N_1}{k} \times \frac{N_2}{k}$ บริเวณ เช่น ในงานวิจัยนี้ใช้ภาพต้นฉบับมีขนาด 512×512 จุดภาพ และ $k = 4$ จะทำให้ได้จำนวนบริเวณในภาพต้นฉบับ 128×128 บริเวณ แต่ละบริเวณมีขนาด 4×4 จุดภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การแบ่งภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันขนาด 4×4 จุดภาพจะได้จำนวนบริเวณตามแนวแกน *x* จำนวน 128 บริเวณและทางแนวแกน *y* จำนวน 128 บริเวณ

3.1.3 การแบ่งบริเวณลายน้ำอเนกประสงค์ (Non-overlapping block partition of multipurpose watermark)

นำลายน้ำแบบคงทนและลายน้ำแบบเปราะบางมาทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกัน ขนาด 1 จุดภาพ

ก. การแบ่งบริเวณลายน้ำแบบคงทน

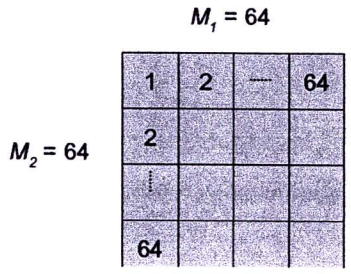
กำหนดให้ W_{RP} แทนลายน้ำแบบคงทนที่ผ่านการผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมบนจุดภาพ ซึ่งมีขนาด $M_1 \times M_2$ จุดภาพ ลายน้ำแบบคงทนสามารถแทนด้วยสมการที่ (3.6)

$$W_{RP} = \{W_{RP}(i,j); 0 \le i < M_1, 0 \le j < M_2\} \tag{3.6}$$

เมื่อ $W_{RP}(i,j) \in \{0,...,2^L - 1\}$ คือความเข้มของจุดภาพที่ตำแหน่ง (i,j) และ L คือจำนวนหน่วยความจำซึ่งมีหน่วยเป็นบิตที่ใช้ในแต่ละจุดภาพ

จำนวนบริเวณทั้งหมดที่ได้มีความสัมพันธ์กับลายน้ำแบบคงทนคือ $\frac{M_1}{k} \times \frac{M_2}{k}$ บริเวณ เช่น ในงานวิจัยนี้ใช้ลายน้ำแบบคงทนมีขนาด 64×64 จุดภาพ และ $k = 1$ แทนค่าลงใน

ความสัมพันธ์จะได้จำนวนบริเวณในลายน้ำแบบคงทน 64×64 บริเวณ แต่ละบริเวณบนลายน้ำแบบคงทนที่มีขนาด 1 จุดภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



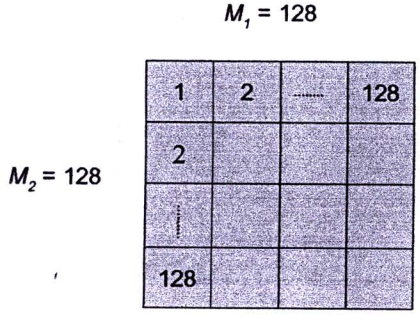
รูปที่ 3.7 การแบ่งลายน้ำแบบคงทนออกเป็นบริเวณขนาด 1 จุดภาพ จะทำให้ได้บริเวณตามแนวแกน *x* จำนวน 64 บริเวณ และทางแนวแกน *y* จำนวน 64 บริเวณ

ข. การแบ่งบริเวณลายน้ำแบบเปราะบาง

กำหนดให้ W_F แทนลายน้ำแบบเปราะบางซึ่งเป็นภาพขาวดำ (Binary image) มีขนาด $M_1 \times M_2$ จุดภาพ ค่าความเข้มของภาพถูกแทนด้วยสีขาวและสีดำเท่านั้น โดยสีขาวมีค่าความเข้มเป็น 1 และสีดำมีค่าความเข้มเป็น 0 ลายน้ำดิจิตอลสามารถแทนด้วยสมการที่ (3.7)

$$W = \{W(i,j); 0 \le i < M_1, 0 \le j < M_2\} \tag{3.7}$$

เมื่อ $W(i,j) \in \{0,1\}$ สำหรับทุกๆ (i,j) ซึ่ง $0 \le i < M_1, 0 \le j < M_2$ จำนวนบริเวณทั้งหมดที่ได้ มีความสัมพันธ์กับลายน้ำแบบเปราะบางคือ $\frac{M_1}{k} \times \frac{M_2}{k}$ บริเวณ เช่น ในงานวิจัยนี้ใช้ลายน้ำแบบเปราะบางมีขนาด 128×128 จุดภาพ และ $k = 1$ แทนค่าลงในความสัมพันธ์จะได้จำนวนบริเวณในลายน้ำแบบเปราะบาง 128×128 บริเวณ แต่ละบริเวณบนลายน้ำแบบเปราะบางที่มีขนาด 1 จุดภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การแบ่งลายน้ำแบบเปราะบางออกเป็นบริเวณขนาด 1 จุดภาพ จะทำให้ได้บริเวณตามแนวแกน *x* จำนวน 32 บริเวณ และทางแนวแกน *y* จำนวน 32 บริเวณ

3.1.4 การแปลงเอสวีดี (Single value decomposition)

เมื่อทำการแบ่งบริเวณของภาพต้นฉบับออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันแล้ว จากนั้นนำแต่ละบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันสำหรับฝังลายน้ำแบบคงทนที่ผ่านการการผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมขนาด 8×8 จุดภาพ $B_{RPi,j}$ และบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันสำหรับฝังลายน้ำแบบเปราะบางขนาด 4×4 จุดภาพ $B_{i,j}$ มาแปลงเอสวีดี โดยใช้สมการที่ (3.8) ทำให้เมทริกซ์ $B_{i,j}$ ถูกแยกออกเป็นสามเมทริกซ์ที่มีขนาดเดียวกับเมทริกซ์ต้นฉบับ คือ $U_{i,j}$, $S_{i,j}$ และ $V_{i,j}$

$$B_{i,j} = U_{i,j} S_{i,j} V_{i,j}^{T} \tag{3.8}$$

3.1.5 วิธีการฝังลายน้ำอเนกประสงค์ลงบนบริเวณของภาพต้นฉบับ (Multipurpose watermark embedded of original image)

เมื่อได้บริเวณของเมทริกซ์เอสสำหรับฝังลายน้ำแบบคงทนขนาด 8×8 จุดภาพ และบริเวณของเมทริกซ์เอสสำหรับฝังลายน้ำแบบเปราะบางขนาด 4×4 จุดภาพแล้ว จากนั้นนำแต่ละบริเวณดังกล่าวมาฝังลายน้ำแบบคงทนและฝังลายน้ำแบบเปราะบาง

ก. การฝังลายน้ำแบบคงทน

นำค่าบิตลายน้ำแบบคงทน W_{RP} (Permuted Robust watermark) จากบริเวณของลายน้ำแบบคงทนที่แบ่งไว้แล้วมาฝังลงบนค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่ง ในบริเวณของเมทริกซ์เอส $S_{i,j}$ ซึ่งได้จากการแปลงเอสวีดีบนแต่ละบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันขนาด 8×8 จุดภาพ โดยใช้สมการที่ (3.9)

$$S'_{i,j} = (S_{i,j} - S_{i,j} \bmod T_R) + (W_{RP\,i,j} / 255) * T_R \tag{3.9}$$

โดยที่ $S_{i,j}$ เป็นค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่งในบริเวณของเมทริกซ์เอส

$S'_{i,j}$ เป็นค่าเอกฐานที่ถูกฝังลายน้ำแบบคงทนแล้ว

$W_{RP\,i,j}$ เป็นค่าลายน้ำแบบคงทนที่จะฝังลงในบริเวณของเมทริกซ์เอส

T_R เป็นช่วงค่าเอกฐานของลายน้ำแบบคงทน (Predefined quantization coefficient)

1) การค้นหาค่าที่ดีที่สุด

วิธีการฝังลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ได้เพิ่มฟังก์ชันการค้นหาค่าที่ดีที่สุดเข้าไปในกระบวนการฝังลายน้ำดิจิตอล มีข้อได้เปรียบเหนือวิธีการฝังลายน้ำดิจิตอลของ (Xiaohu และ Xiaofeng, 2008) ที่นำเสนอไว้คือ สามารถให้ค่า *PSNR* ที่สูงกว่าในขณะที่ยังคงรักษาความคงทนของลายน้ำดิจิตอลแบบเดิมไว้

แสดงตัวอย่างการฝังลายน้ำดิจิตอลเพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างวิธีการของ (Xiaohu และ Xiaofeng, 2008) และวิธีการฝังลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอ

กำหนดให้ค่าเอกฐานของบริเวณภาพต้นฉบับ $S_{i,j}$ มีค่าเป็น "1005" บิตลายน้ำดิจิตอล W มีค่าเป็น "200" และช่วงค่าเอกฐานของลายน้ำดิจิตอล T มีค่าเป็น "50" ซึ่งสามารถแทนค่าเพื่อแสดงการฝังลายน้ำดิจิตอลได้ดังต่อไปนี้

วิธีการฝังลายน้ำดิจิตอลของ (Xiaohu และ Xiaofeng, 2008)

$$S_{i,j}^{'} = (S_{i,j} - S_{i,j} \bmod T) + (W / 255) * T$$
$$S_{i,j}^{'} = (1005 - 1005 \bmod 50) + (200 / 255) * 50$$
$$S_{i,j}^{'} = 1039.22$$

วิธีการฝังลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอ

$$S_{i,j}^{'} = (S_{i,j} - S_{i,j} \bmod T) + (W / 255) * T$$
$$S_{i,j}^{'} = (1005 - 1005 \bmod 50) + (200 / 255) * 50$$
$$S_{i,j}^{'} = 1039.22$$

เพิ่มฟังก์ชันการค้นหาค่าที่ดีที่สุด

$$S_{Li,j}^{'} = (S_{i,j}^{'} - T)$$
$$S_{Ri,j}^{'} = (S_{i,j}^{'} + T)$$

ทำการค้นหาค่าเอกฐานที่ใกล้กับค่าเอกฐานเดิมที่สุด ค่าเดิม $S_{i,j}$ ในที่นี้มีค่าเป็น "1005" ทางด้านซ้าย $S_{Li,j}^{'}$ มีค่าเป็น "989.22" หรือด้านขวา $S_{Ri,j}^{'}$ มีค่าเป็น "1089.22" $S_{i,j}^{'}$ มีค่าเป็น "1039.22" จากตัวอย่างค่าที่ใกล้กับค่าเดิมที่สุดคือ $S_{Li,j}^{'}$ มีค่าเป็น "989.22" ด้วยเหตุนี้ฟังก์ชันการค้นหาค่าที่ดีที่สุดจึงทำให้ภาพผลลัพธ์ที่ผ่านการฝังลายน้ำลายน้ำดิจิตอลที่นำเสนอมีค่า PSNR ที่สูงกว่า

ข. การฝังลายน้ำแบบเปราะบาง

ในขณะเดียวกันนำค่าบิตลายน้ำแบบเปราะบาง W_F (Fragile watermark) จากบริเวณของลายน้ำแบบเปราะบางที่แบ่งไว้แล้วมาฝังลงบนค่าเอกฐานลำดับที่สาม ในบริเวณของเมทริกซ์เอส ซึ่งได้จากการแปลงเอสวีดีบนแต่ละบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันขนาด 4×4 จุดภาพ โดยใช้สมการที่ (3.10)

$$
\begin{aligned}
&\text{if } W_{F,ij}=1 \text{ and } \left(S_{i,j} \bmod T_F\right) \geq \frac{1}{4}T_F \\
&\text{if } W_{F,ij}=1 \text{ and } \left(S_{i,j} \bmod T_F\right) < \frac{1}{4}T_F \\
&\text{if } W_{F,ij}=0 \text{ and } \left(S_{i,j} \bmod T_F\right) \leq \frac{3}{4}T_F \\
&\text{if } W_{F,ij}=0 \text{ and } \left(S_{i,j} \bmod T_F\right) > \frac{3}{4}T_F
\end{aligned}
$$

$$
\begin{cases}
S'_{i,j} = S_{i,j} - \left(S_{i,j} \bmod T_F\right) + \frac{3}{4}T_F, \\
S'_{i,j} = \left[S_{i,j} - \frac{1}{4}T_F\right] - \left[\left(S_{i,j} - \frac{1}{4}T_F\right) \bmod T_F\right] + \frac{3}{4}T_F, \\
S'_{i,j} = S_{i,j} - \left(S_{i,j} \bmod T_F\right) + \frac{1}{4}T_F, \\
S'_{i,j} = \left[S_{i,j} - \frac{1}{2}T_F\right] - \left[\left(S_{i,j} - \frac{1}{2}T_F\right) \bmod T_F\right] + \frac{1}{4}T_F,
\end{cases}
\qquad (3.10)
$$

โดยที่ $S_{i,j}$ เป็นค่าเอกฐานลำดับที่สามในบริเวณของเมทริกซ์เอส

$S'_{i,j}$ เป็นค่าเอกฐานที่ถูกฝังลายน้ำแบบเปราะบางแล้ว

$W_{F,ij}$ เป็นค่าลายน้ำแบบเปราะบางที่จะฝังลงในบริเวณของเมทริกซ์เอส

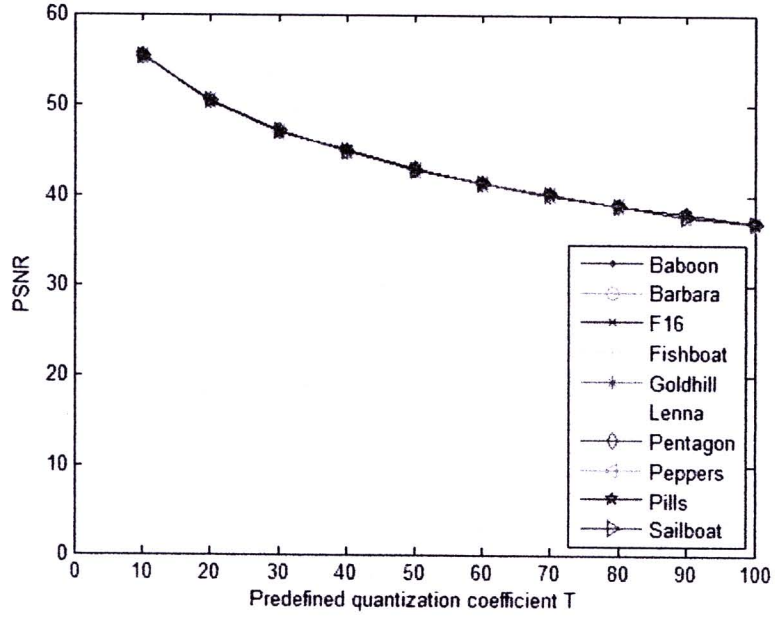
T_F เป็นช่วงค่าเอกฐานของลายน้ำแบบเปราะบาง

ปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาสำหรับการฝังลายน้ำอเนกประสงค์ในงานวิจัยนี้คือ การเลือกช่วงค่าเอกฐาน การเลือกตำแหน่งค่าเอกฐาน และการเลือกตำแหน่งค่าเอกฐานที่หลบเลี่ยงกัน

ก. การเลือกช่วงค่าเอกฐาน

เพื่อให้ลายน้ำดิจิตอลที่ฝังลงไปมีความทนทานสูงและไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า T ที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้

โดยกำหนดให้ค่า T ถูกเพิ่มครั้งละ 10 เริ่มตั้งแต่ 10 จนถึง 100 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 กราฟค่า *PSNR* ที่ได้จากการปรับค่า T เพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง

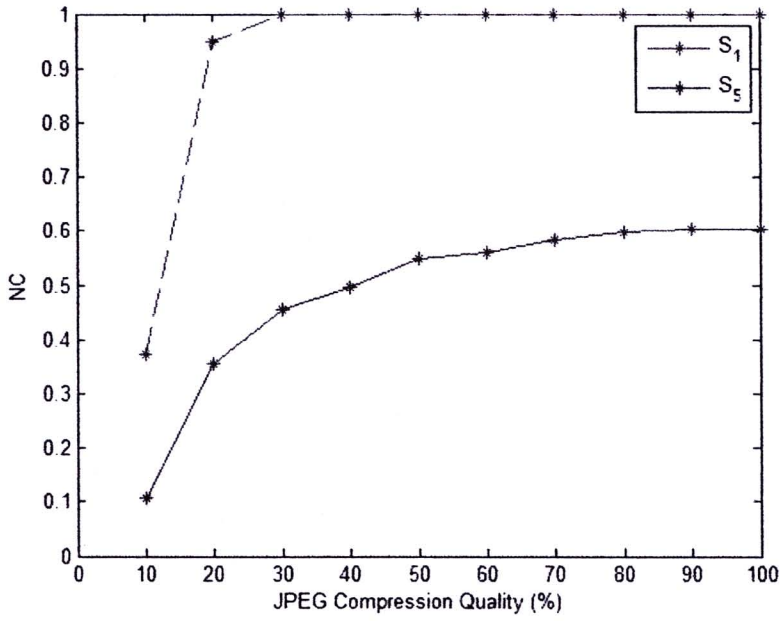


รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ *PSNR* กับการปรับค่า T

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อค่า T เพิ่มขึ้น ค่า *PSNR* จะลดลง เพราะเมื่อช่วงของการควอนไตซ์เซชันกว้างขึ้นจะทำให้ค่าเอกฐานของรูปภาพต้นฉบับถูกเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเดิมมากขึ้นด้วย ทำให้ผู้วิจัยค้นพบว่าค่า T ที่เหมาะสมสำหรับการฝังลายน้ำแบบคงทนในงานวิจัยนี้ควรอยู่ที่ 90 ส่วนค่า T ที่เหมาะสมสำหรับการฝังลายน้ำแบบเปราะบางควรอยู่ที่ 15

ข. การเลือกตำแหน่งค่าเอกฐาน

นอกจากการเลือกค่า T ที่เหมาะสมกับงานวิจัยแล้ว ยังมีปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาอีกตัวหนึ่งนั่นก็คือ การเลือกตำแหน่งค่าเอกฐาน เพื่อทำให้ลายน้ำดิจิตอลที่ฝังลงไปในตำแหน่งที่เลือกไว้มีความทนทานสูง ผู้วิจัยจึงทำการทดลองเพื่อหาตำแหน่งค่าเอกฐาน S ที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ จากความสัมพันธ์ของตำแหน่งค่าเอกฐานกับความคงทน โดยเลือกตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่ง S_1 และตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่ห้า S_5 นำมาทำการฝังลายน้ำดิจิตอลตัวเดียวกันและกำหนดให้ T เท่ากับ 90 เหมือนกัน แล้วนำรูปภาพผลลัพธ์มาทำการบีบอัดภาพ โดยกำหนดระดับคุณภาพที่ 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% และ 100% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 กราฟค่า *NC* ที่ได้จากการทดสอบโดยวิธีการบีบอัดรูปภาพแบบ JPEG ที่ระดับคุณภาพเพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง

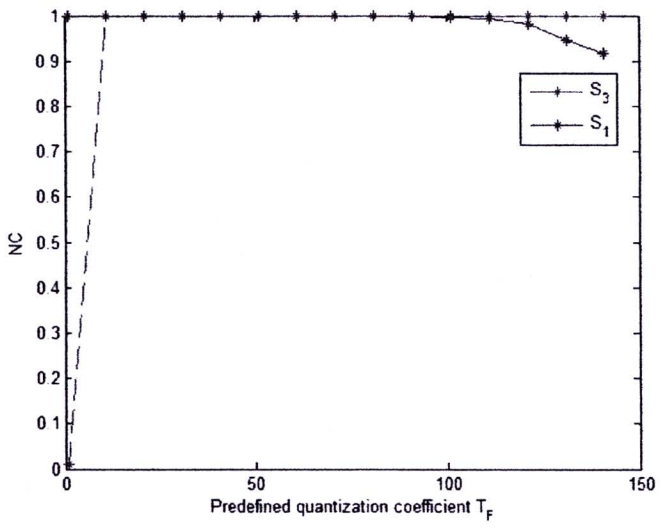


รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งค่าเอกฐานกับความคงทน

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มระดับการบีบอัดภาพมากขึ้น มีผลให้ค่าความคงทน NC ของลายน้ำที่ถอดได้จากตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่ง S_1 และค่าเอกฐานลำดับที่ห้า S_5 ลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่า NC ของลายน้ำที่ถอดได้จากตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่ง S_1 มีค่าสูงกว่าตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่ห้า S_5 อย่างชัดเจน ทำให้ผู้วิจัยสามารถนำมาสรุปผลได้ว่าการเลือกตำแหน่งที่มีผลต่อความคงทนโดยตรง เนื่องจากค่าพลังงานสูงจะมีความคงทนต่อการบีบอัดภาพมากกว่าค่าพลังงานต่ำ

ค. การเลือกตำแหน่งค่าเอกฐานที่หลบเลี่ยงกัน

หลังจากเลือกตำแหน่งค่าเอกฐานที่เหมาะสมสำหรับการฝังลายน้ำแบบคงทนและลายน้ำแบบเปราะบางแล้ว ปัจจัยสุดท้ายที่ต้องนำมาพิจารณาก็คือการหลบเลี่ยงไม่ให้ลายน้ำแบบคงทนและแบบเปราะบางชนกัน ดังนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมเพื่อจะรับประกันได้ว่าลายน้ำทั้งสองจะไม่เกิดการชนกัน โดยเริ่มจากทำการฝังลายน้ำแบบคงทนในตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่ง S_1 จากนั้นทำการฝังลายน้ำแบบเปราะบางในตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่สาม S_3 โดยกำหนดให้ค่า T_F ถูกเพิ่มครั้งละ 10 เริ่มตั้งแต่ 10 จนถึง 150 ดังแสดงในรูปที่ 3.11 กราฟค่า NC ที่ได้จากการปรับค่า T_F เพิ่มขึ้นในแต่ละครั้ง



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่งค่าเอกฐานกับกับการปรับค่า T

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อช่วงค่าเอกฐานของลายน้ำแบบเปราะบาง T_F เพิ่มมากขึ้นจนถึง 100 จะมีผลให้ค่า NC ของลายน้ำแบบคงทนที่ถอดได้จากตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่ง S_1 นั้นมีค่าลดลง ในงานวิจัยนี้จึงกำหนดค่า T_F สำหรับการฝังลายน้ำแบบเปราะบางไว้เพียง 15 เท่านั้น วัตถุประสงค์แรกเพื่อเป็นการหลบเลี่ยงการชนกันระหว่างลายน้ำแบบคงทนและแบบเปราะบาง จากกราฟเห็นได้ชัดเจนว่า ค่าที่ถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ห่างจากจุดที่จะทำให้เกิดการชนกันมาก จึงสามารถรับประกันได้ว่าถ้าเลือกฝังลายน้ำแบบคงทนในตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่ง S_1 และเลือกฝังลายน้ำแบบคงทนในตำแหน่งค่าเอกฐานลำดับที่สาม S_3 จะไม่เกิดการชนกันของลายน้ำทั้งสองอย่างแน่นอน วัตถุประสงค์ที่สองเพื่อให้ลายน้ำแบบเปราะบางมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงแก้ไขข้อมูลบนรูปภาพที่มีลายน้ำฝังอยู่ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องใช้ค่า T_F ที่มีค่าน้อย

3.1.6 การแปลงเอสวีดีกลับ (Inverse SVD)

เมื่อทำการฝังลายน้ำอเนกประสงค์ลงบนบริเวณเมทริกซ์เอส $S'_{i,j}$ ของภาพต้นฉบับเรียบร้อยแล้ว หลังจากนั้นทำการแปลงสามบริเวณเมทริกซ์ $U_{i,j}$, $S'_{i,j}$ และ $V_{i,j}$ ซึ่งอยู่ในโดเมนความถี่ ให้กลับเป็นโดเมนเวลาดังเดิมด้วยการทำการแปลงกลับเอสวีดี (Inverse single value decomposition) ตามสมการที่ (3.11) เพื่อทำการสร้างบริเวณเมทริกซ์ที่มีลายน้ำดิจิตอลฝังอยู่ $B'_{i,j}$ ทำซ้ำจนครบทุกบริเวณของภาพต้นฉบับ

$$B'_{i,j} = U_{i,j} S'_{i,j} V^T_{i,j} \tag{3.11}$$

3.1.7 การถอดชุดสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมจากบริเวณของภาพต้นฉบับ

นำบริเวณของภาพต้นฉบับขนาด 8×8 จุดภาพ ที่ผ่านการฝังลายน้ำแบบคงทนแล้ว และยังคงมีการผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมอยู่ จากนั้นทำการดึงสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมออก โดยใช้รหัสลับเดียวกันที่ใช้ในขั้นตอนการผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมบนจุดภาพของบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกันขนาด 8×8 จุดภาพ เพื่อถอดรหัสในแต่ละบริเวณของภาพต้นฉบับที่มีลายน้ำแบบคงทนฝังอยู่เดิมคืนมา

3.1.8 การรวมแต่ละบริเวณของภาพต้นฉบับกลับคืน (Watermarked image reconstruction)

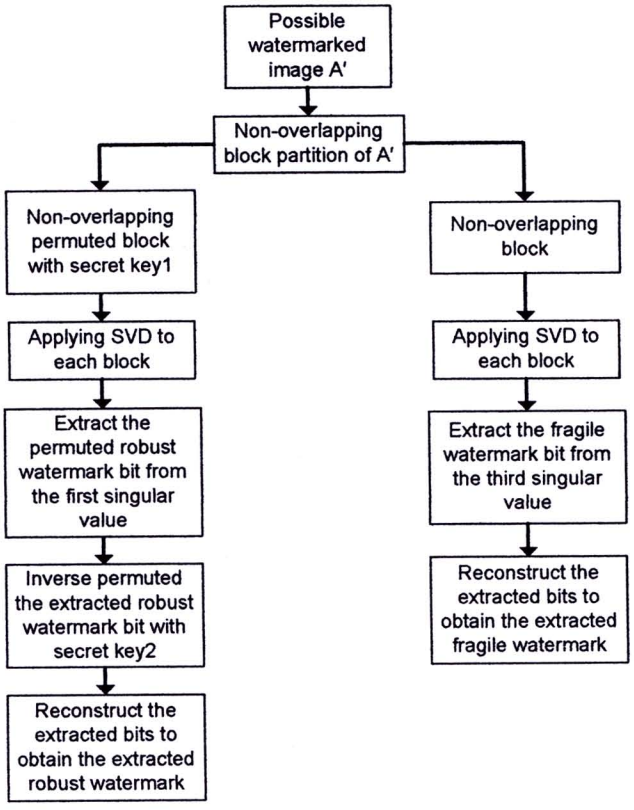
เมื่อทำการแปลงกลับเอสวีดีจนครบทุกบริเวณของภาพแล้ว จากนั้นนำบริเวณทั้งหมดรวมกลับคืนซึ่งก็จะได้ภาพต้นฉบับที่มีลายน้ำอเนกประสงค์ฝังอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.12

รูปที่ 3.12 การรวมแต่ละบริเวณของภาพต้นฉบับกลับคืน

3.2 วิธีการถอดลายน้ำอเนกประสงค์ (Watermark extraction)

การถอดลายน้ำดิจิตอลแบบเปราะบางและแบบคงทนจากภาพที่ต้องการทดสอบใช้กระบวนการเดียวกับการฝังลายน้ำดิจิตอล ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งอธิบายลำดับขั้นตอนได้ดังนี้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย



รูปที่ 3.13 วิธีการถอดลายน้ำอเนกประสงค์

3.2.1 การแบ่งบริเวณภาพที่ต้องการทดสอบ (Non-overlapping block partition of watermarked image)

จากนั้นนำภาพที่ต้องการทดสอบมาทำการแบ่งพื้นที่ออกเป็นบริเวณที่ไม่ซ้อนทับกัน 2 ขนาด ได้แก่ 8×8 จุดภาพ และ 4×4 จุดภาพ จากนั้นทำการสลับตำแหน่งของบริเวณที่จะฝังลายน้ำแบบคงทน โดยใช้วิธีการผสมสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมก่อนที่จะทำการถอดลายน้ำแบบคงทนจากแต่ละบริเวณของภาพที่ต้องการทดสอบ

3.2.2 การแปลงเอสวีดี (Single value decomposition)

เมื่อได้บริเวณของภาพที่ต้องการทดสอบ ขนาด 8×8 จุดภาพ และ 4×4 จุดภาพ ที่มีลายน้ำดิจิตอลฝังอยู่มาแล้ว $B'_{i,j}$ มาแปลงเอสวีดี โดยใช้สมการที่ (3.12) ซึ่งจะทำให้ได้สามเมทริกซ์ $U_{i,j}$, $S'_{i,j}$ และ $V_{i,j}$

$$B'_{i,j} = U_{i,j} S'_{i,j} V^T_{i,j} \tag{3.12}$$

3.2.3 วิธีการถอดลายน้ำอเนกประสงค์จากภาพที่ต้องการทดสอบ (Extraction watermark)

วิธีการถอดบิตลายน้ำแบบคงทน W_R (Robust watermark) จากค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่ง ในบริเวณเมทริกซ์เอส $S'_{i,j}$ ของภาพที่ต้องการทดสอบ ทำได้โดยใช้สมการที่ (3.13)

$$W'_{RPi,j} = ((S'_{i,j} \bmod T_R)/T_R) * 255 \tag{3.13}$$

โดยที่ $W'_{RPi,j}$ เป็นค่าลายน้ำแบบคงทนที่ถอดได้จากค่าเอกฐานลำดับที่หนึ่งในบริเวณเมทริกซ์เอส

$S'_{i,j}$ เป็นค่าเอกฐานที่มีลายน้ำแบบคงทนฝังอยู่

T_R เป็นช่วงค่าเอกฐานของลายน้ำแบบคงทน

วิธีการถอดบิตลายน้ำแบบเปราะบาง W_F (Fragile watermark) จากค่าเอกฐานลำดับที่สามในบริเวณเมทริกซ์เอส $S'_{i,j}$ ของภาพที่ต้องการทดสอบ ทำได้โดยใช้สมการที่ (3.14)

$$W'_{Fi,j} = \begin{cases} 1, \left(S'_{i,j} \bmod T_F\right) > \dfrac{T_F}{2} \\ 0, otherwise \end{cases} \tag{3.14}$$

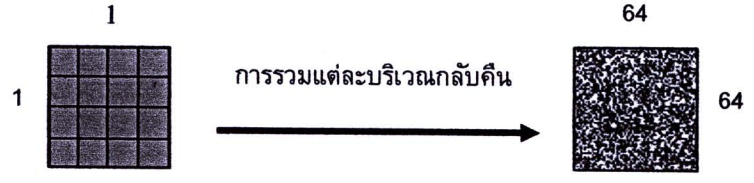
โดยที่ $S'_{i,j}$ เป็นค่าเอกฐานที่มีลายน้ำแบบเปราะบางฝังอยู่

$W'_{F,ij}$ เป็นค่าลายน้ำแบบเปราะบางที่ถอดได้จากค่าเอกฐานลำดับที่สามในบริเวณเมทริกซ์เอส

T_F เป็นช่วงค่าเอกฐานของลายน้ำแบบเปราะบาง

3.2.4 การรวมแต่ละบริเวณของลายน้ำอเนกประสงค์กลับคืน (Reconstruct the extracted watermark bits to obtain the extracted watermark)

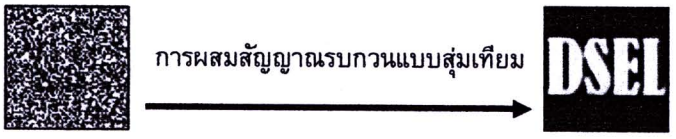
เมื่อทำการถอดหาลายน้ำแบบคงทนและแบบเปราะบางจากภาพที่ต้องการทดสอบจนครบทุกบริเวณแล้ว จากนั้นนำแต่ละบริเวณของลายน้ำดิจิตอลทั้งสองที่มีขนาด 1 จุดภาพมารวมกลับคืนซึ่งจะได้ลายน้ำแบบเปราะบางที่ถอดออกมาได้จากภาพที่ต้องการทดสอบ ส่วนลายน้ำแบบคงทนจะได้จุดภาพที่ยังคงมีสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมผสมอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การรวมภาพลายน้ำอเนกประสงค์แต่ละบริเวณกลับคืน 64×64 จุดภาพ

3.2.5 การถอดชุดสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียม

นำจุดภาพของลายน้ำแบบคงทนที่ยังคงมีสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียมผสมอยู่มาทำการดึงจุดภาพของลายน้ำแบบคงทนออกจากสัญญาณรบกวนแบบสุ่มเทียม โดยใช้รหัสลับเดียวกันที่ใช้ในขั้นตอนการฝังลายน้ำแบบคงทน เพื่อถอดรหัสในแต่ละตำแหน่งจุดภาพของลายน้ำดิจิตอลค่าเดิมคืนมา ซึ่งจะได้ลายน้ำแบบคงทนที่ถอดได้จากภาพที่ต้องการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ลายน้ำแบบคงทนที่ถอดได้จากภาพที่ต้องการทดสอบ

3.3 การวัดค่าประสิทธิภาพ

ก. การวัดประสิทธิภาพการฝังลายน้ำดิจิตอล

คือการทดสอบค่าความเหมือนของภาพต้นฉบับกับภาพที่มีลายน้ำดิจิตอลฝังอยู่ โดยใช้เกณฑ์เชิงปริมาณนั่นคือ ถ้า *PSNR* มีค่าสูงแสดงว่าภาพที่ฝังลายน้ำดิจิตอลแล้วกับภาพต้นฉบับมีความเหมือนกันมากจนไม่สามารถมองเห็นความผิดเพี้ยนจากการฝังลายน้ำดิจิตอลได้ (สมการคำนวณค่าความผิดเพี้ยนของภาพมีอธิบายอยู่ในหัวข้อที่ 2.3.7 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ (ข.))

ข. การวัดประสิทธิภาพการถอดลายน้ำดิจิตอลแบบเปราะบาง

คือการทดสอบค่าความเหมือนของลายน้ำดิจิตอลระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิตอลที่ถอดออกมาได้หลังผ่านการโจมตีแบบต่างๆ ซึ่งถ้า *NC* ที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียง 1 มากเท่าใด หมายถึงลายน้ำดิจิตอลที่ถอดออกมาได้จะมีความเหมือนกับลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับมากขึ้นด้วยเช่นกัน (สมการคำนวณค่าความเหมือนของภาพมีอธิบายอยู่ในหัวข้อที่ 2.3.7 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ (ค.))

ค. การวัดประสิทธิภาพการถอดลายน้ำดิจิตอลแบบคงทน

โดยใช้การวัดค่าความเหมือน คือการทดสอบค่าความเหมือนของลายน้ำดิจิตอลระหว่างลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับกับลายน้ำดิจิตอลที่ถอดออกมาได้ หลังผ่านการโจมตีแบบต่างๆ

ซึ่งถ้า NC ที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียง 1 มากเท่าใด หมายถึงลายน้ำดิจิตอลที่ถอดออกมาได้จะมีความเหมือนกับลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับมากขึ้นด้วยเช่นกัน (สมการคำนวณค่าความเหมือนของภาพมีอธิบายอยู่ในหัวข้อที่ 2.3.7 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ (ค.))

ง. การวัดประสิทธิภาพการถอดลายน้ำดิจิตอล

โดยใช้การวัดค่าอัตราความผิดพลาด คือการทดสอบค่าอัตราความผิดพลาดระหว่างจำนวนบิตลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับและจำนวนบิตลายน้ำดิจิตอลที่ถอดได้ หลังผ่านการโจมตีแบบต่างๆ ซึ่งถ้า BER ที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียง 0 มากเท่าใดแสดงว่าจำนวนบิตลายน้ำดิจิตอลที่ถอดออกมาได้จะมีความเหมือนกับจำนวนบิตลายน้ำดิจิตอลต้นฉบับมากขึ้นด้วยเช่นกัน (สมการคำนวณค่าความผิดพลาดของภาพมีอธิบายอยู่ในหัวข้อที่ 2.3.7 เกณฑ์การวัดประสิทธิภาพ (ง.))