วิธีปรับปรุงการฝังรูปในรหัสคิวอาร์โค้ด

นายชานน สกาว์วัฒนานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
5 4 7 0 1 7 0 2 2 1
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

AN IMPROVED METHOD TO EMBED AN IMAGE IN QR CODE

Mr. Chanon Skawattananon

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Facalty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	วิธีปรับปรุงการฝังรูปในรหัสคิวอาร์โค้ด
โดย	นายชานน สกาว์วัฒนานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต วงศ์ประทีป

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.สาธิต วงศ์ประทีป)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ทองทักษ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลพร แซ่ลี้)

ชานน สกาว์วัฒนานนท์ : วิธีปรับปรุงการฝังรูปในรหัสคิวอาร์โค้ด
(AN IMPROVED METHOD TO EMBED AN IMAGE IN QR CODE).
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร.สาธิต วงศ์ประทีป, 142 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการเพิ่มขนาดของรูปที่ฝังบน QR Code ซึ่งวิธีการฝังรูปแบบปกติถ้ารูปภาพที่ฝังมีขนาดใหญ่กว่าความสามารถกู้คืนข้อมูลหรือเปอร์เซนต์ Error Correction สัญลักษณ์ QR Code จะไม่สามารถอ่านได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะปรับปรุงการเข้ารหัสในส่วน Pad Character และการปรับความเข้มของแสง เพื่อหารูปภาพที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังบนสัญลักษณ์ QR Code เพื่อใช้ในการระบุตัวตน โดยเมื่อทำการเข้ารหัสแบบที่เสนอใหม่นี้แล้วเครื่องอ่านสัญลักษณ์ QR Code ทั่วไปจะสามารถอ่านได้ โดยผลการทดลองได้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่มีการฝังรูป พบว่าการฝังรูปบนสัญลักษณ์ QR Code ที่มีการเปลี่ยนแปลงบิตจะสามารถฝังรูปได้ขนาดที่ใหญ่กว่าในระดับทุกระดับ Error Correction

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....
ปีการศึกษา.....2556.....

5470170221 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING
KEYWORDS : QR CODE / ERROR CORRECTION / OWNER IMAGE / PAD CHARACTERS

CHANON SKAWATTANANON : AN IMPROVED METHOD TO EMBED AN IMAGE IN QR CODE. ADVISOR : ASST PROF. SARTID VONGPRADHIP, Ph.D., 142 pp.

In this thesis,a technique to increase the size of the image embedded in the QR Code is introduced. In the normal embedded image, if the size of the image is larger than the percentage of error correction, the QR Code is not readable. The researcher developed the encoding in the Pad Character and adjusted the brightness of the light to figure out the largest image being embeddable in the QR code. After the image has been decoded with the new method, it can be read by the standard QR code reader. The experiment was compared with previous researches on embedding the image in QR Codes. It was found out that embedding the image in QR Codes, which the bit has been changed, could be done with larger image size in all levels of error correction.

Department: Computer Engineering Student's Signature.....
Field of Study: Computer Engineering Advisor's Signature.....
Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สาธิต วงศ์ประทีป อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ท่านได้กรุณาช่วยเหลือและให้คำปรึกษาพร้อมให้คำแนะนำเกี่ยวกับ การทำวิจัยและช่วยชี้แนะการแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัยตลอดการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านเป็นอย่างสูง ได้แก่ ศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อาทิตย์ ทองทักษ์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลพร แซ่ลี้ ในการตรวจแก้ ให้แนวคิดและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย

ขอขอบคุณพระคุณศูนย์คอมพิวเตอร์วิศวกรรมศาสตร์ ได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ หนูไพโรจน์ ที่ให้โอกาสในการช่วยงานศูนย์คอมพิวเตอร์วิศวกรรมศาสตร์ รวมถึงเพื่อนๆ และพี่ๆน้องๆ ในศูนย์คอมพิวเตอร์ทุกคน ที่ให้มิตรภาพและคำปรึกษาตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ให้ความรู้แนวความคิดและแนวทางในการวิจัยและขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกท่าน พร้อมทั้งเพื่อนๆและพี่น้องนิสิตทุกคนในห้องวิจัย โดยเฉพาะอย่างยิ่งห้องวิจัย Digital System Engineering Laboratory (DSEL) ที่ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำและมิตรภาพต่อผู้วิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา น้องสาว ซึ่งให้การสนับสนุน คอยให้กำลังใจและคำปรึกษาแก่ผู้วิจัยเสมอมา นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเรียบร้อยลงได้ด้วยดีทุกประการ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่

1.บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย 3
1.6 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ 4
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 ส่วนประกอบของ QR Code 5
2.1.1 Bitstream 6
2.1.2 โมดูล (Module) 6
2.1.3 Codewords 6
2.1.4 โครงสร้างของ QR Code (QR Code Structure) 7
2.1.5 รูปแบบภาษาที่ QR Code เก็บข้อมูล (Data characters) 10
2.1.6 การแก้ความผิดพลาด (Error Correction) 10

บทที่ หน้า

2.1.7 เวอร์ชั่น (Version) และขนาด (Sizes) 13
2.1.8 ความจุข้อมูล (Data capacity) 14
2.1.9 การเข้ารหัสใน QR Code ในส่วน Data Codewords 15
2.1.10 การเข้ารหัสใน QR Code ในส่วน Error Correction Codewords 18
2.1.11 โครงสร้าง final message ของ QR Code (Structure final message) 25
2.1.12 การวาง Codeword ในเมตริก (Codeword placement in matrix) 26
2.1.13 ขั้นตอนการ Masking ใน QR Code 37
2.1.14 การเข้ารหัสในส่วน Format Information 39
2.1.15 การถอดรหัส QR Code (Decoding procedure) 41
2.1.16 การอ้างอิงอัลกอริทึม (Algorithm) การถอดรหัสของ QR Code 42
2.2 ทฤษฎีรูปภาพสี 49
2.3 ขั้นตอนการปรับปรุงภาพก่อนถอดรหัสในโทรศัพท์มือถือ 53
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 54
3. วิธีดำเนินการวิจัย 56
3.1 กระบวนการปรับปรุงการเข้ารหัสส่วน Pad Character ใน QR Code 56
3.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) 57
3.1.2การเข้ารหัสส่วนข้อมูล (Data encoding) โดยวิธีการปรับปรุงกระบวนการเข้ารหัสในส่วน Pad Character 57
3.1.3 การเข้ารหัส Error Correction 63
3.1.4 โครงสร้าง Final Message ของ QR Code (Structure Final Message) 63
3.1.5 การวางโมดูลในเมทริกซ์ (Module placement in matrix) 63
3.1.6 ขั้นตอนการ Masking (Data Masking) 63
3.1.7 Format และ Version Information 63
3.2 กระบวนการปรับปรุงก่อนฝังรูป 64
3.2.1 รูปต้นฉบับ (Original Image) 64
3.2.2 การลดขนาดรูป (Resize Image) 64
3.2.3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของรูป 64

บทที่ หน้า

3.3 กระบวนการการฝังรูปลงบนพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิต 66
3.3.1 การแบ่งระดับชั้นสี RGB ของรูปที่มีผ่านกระบวนการปรับปรุงรูป 66
3.3.2 ทำการแปลงรูปแบบ (Format) ของ QR Code ที่ใช้วิธีการปรับปรุงกระบวนการเข้ารหัส 66
3.3.3 การแบ่งระดับชั้นสี RGB ของ QR Code 67
3.3.4 การฝังรูปลงบน QR Code 67
3.4 การวัดค่าประสิทธิภาพ 67
4. การทดลองและผลการทดลอง 69
4.1 เครื่องมือในการทดลอง 69
4.1.1 ฮาร์ดแวร์ในการทดสอบงานวิจัย 69
4.1.2 ซอฟต์แวร์ในคอมพิวเตอร์ที่ใช้การเขียนโปรแกรม 69
4.1.3 ฮาร์ดแวร์สำหรับการอ่าน QR Code 69
4.1.4 ซอฟต์แวร์สำหรับการอ่าน QR Code 69
4.1.5 รูปภาพในการทดลองมีดังต่อไปนี้ 69
4.2 ผลการทดลอง 70
4.2.1 การฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตและการอ่านด้วยโปรแกรม QR Code Reader 70
4.2.2 เปอร์เซ็นต์ Error Correction 81
4.2.3 การเปรียบเทียบในเวอร์ชั่น 3 กับงานวิจัยอื่น 86
4.2.4 การสร้างเป็นนามบัตรสำหรับระบุตัวตน 87
5. สรุปผลการวิจัย 90
5.1 บทสรุป 90
5.2 ข้อเสนอแนะ 91
รายการอ้างอิง 92
ภาคผนวก 96
ภาคผนวก ก แสดงผลการทดลองการฝังรูปเพิ่มเติม 97

บทที่ หน้า

ภาคผนวก ข แสดงตาราง INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC 18004 119
ภาคผนวก ค แสดงตารางการแปลงค่าพหุนาม 132
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 142

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2-1 ตัวอย่าง Error correction characteristics for QR Code 2005 11
2-2 ตัวอย่าง Number of symbol characters and input data capacity for QR Code 14
2-3 การระบุโหมดในการเข้ารหัสของ QR Code 15
2-4 ตารางการเข้ารหัสและถอดรหัสสำหรับโหมด Alphanumeric 16
2-5 รูปแบบ Mask 36
2-6 ตารางการให้คะแนนในการเลือกรูปแบบ Mask 37
2-7 ตารางตัวชี้วัด Error Correction Level สำหรับ QR Code 38
4-1 แสดงขนาดรูปที่สามารถฝังลงใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตที่มีการเข้ารหัส ด้วยจำนวนตัวอักษรต่างๆ ใน QR Code เวอร์ชั่น 1 69
4-2 ตารางเปรียบเทียบขนาดการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูป บน QR Code ทั่วไป (Version 1 - L) 70
4-3 แสดงขนาดรูปที่สามารถฝังลงใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตที่มีการเข้ารหัส ด้วยจำนวนตัวอักษรต่างๆ ใน QR Code เวอร์ชั่น 3 72
4-4 ตารางเปรียบเทียบขนาดการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูป บน QR Code ทั่วไป (Version 3 - L) 73
4-5 แสดงขนาดรูปที่สามารถฝังลงใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตที่มีการเข้ารหัส ด้วยจำนวนตัวอักษรต่างๆ ใน QR Code เวอร์ชั่น 6 75
4-6 ตารางเปรียบเทียบขนาดการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูป บน QR Code ทั่วไป (Version 6 - L) 76
4-7 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code ทั่วไปในเวอร์ชั่น 3 81
4-8 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code เวอร์ชั่น 3 ที่เปลี่ยนบิตในส่วน Pad Character 81
4-9 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code เวอร์ชั่น 6 เข้ารหัสจำนวน 18 ตัวอักษร 82
4-10 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code เวอร์ชั่น 6 เข้ารหัสจำนวน 52 ตัวอักษร 83
ก-1 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 1 - L 91

ตารางที่ หน้า

ก-2 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 1 - M 93
ก-3 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 1 - Q 94
ก-4 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 1 - H..... 96
ก-5 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 3 - L 97
ก-6 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 3 - M 99
ก-7 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 3 - Q 100
ก-8 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 3 - H..... 102
ก-9 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 6 - L 103
ก-10 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 6 - M 106
ก-11 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 6 - Q 108
ก-12 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส
ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 6 - H..... 110
ข-1 Codeword capacity of all versions of QR Code 2005 112
ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005 114
ค-1 ตารางการแปลงค่าพหุนาม..... 124

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

2-1 QR Code 5
2-2 ตัวอย่าง QR Code ที่ใช้ในงานต่างๆ 5
2-3 โครงสร้างของ QR Code 2005 7
2-4 Finder Pattern 8
2-5 การวางตัวของ Data Codewords และ Error Codewords 9
2-6 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ Error Correction ของรูปที่ฝัง
2.7 แสดงโครงสร้างของ QR Code เวอร์ชั่น 1 เวอร์ชั่น 3 และเวอร์ชั่น 6 13
2.8 วงจรการเข้ารหัส Error Correction Codeword 19
2.9 การคำนวณค่า Error correction 20
2.10 โครงสร้างส่วน Final message codeword 25
2.11 การวางบิตในรูปแบบปกติในทิศทางขึ้นและทิศทางลง 26
2.12 ตัวอย่างการวางบิตแบบปกติและการวางแบบเปลี่ยนทิศทาง 26
2.13 ตัวอย่างการวางบิตที่ติดกับ Alignment Pattern 27
2-14 แสดงลำดับการวาง Bitstream บน QR Code เวอร์ชั่น 1 27
2-15 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 1 - L 28
2-16 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 1 - M 28
2-17 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 1 - Q 29
2-18 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 1 - H 29
2-19 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 3 - L 30
2-20 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 3 - M 30
2-21 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 3 - Q 31
2-22 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 3 - H 31
2-23 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 6 - L 32
2-24 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 6 - M 33
2-25 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 6 - Q 34

ภาพที่ หน้า

2-26 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 6 - H 35
2-27 รูปแบบ Masking ใน QR Code เวอร์ชั่น 1 36
2-28 แสดงขั้นตอนการ Mask 37
2-29 ตำแหน่ง Format Information 39
2-30 ลำดับขั้นตอนในการถอดรหัสใน QR Code 39
2-31 การ Scan line ใน Finder Pattern 41
2-32 Finder Pattern ด้านบน 42
2-33 Finder Pattern และ Version Information 43
2-34 Finder Pattern และ Alignment Patterns 44
2-35 จุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern 44
2-36 พื้นที่ซ้ายบนของ QR Code 46
2-37 พื้นที่ขวาล่างของ QR Code 46
2-38 การแทนรูปเฉดเทาด้วยเมทริกซ์ 48
2-39 แสดงชั้นสีในระบบ RGB 49
2-40 แสดงชั้นสีในระบบ YUV 50
2-41 กราฟแสดงสมการ Power–Law 51
3-1 กระบวนการสร้าง QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตในส่วน Pad Characters 54
3-2 แสดงส่วนต่างๆของ QR Code ที่ใช้ในการเปลี่ยน Pad Character 55
3-3 แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิต ใน Pad Character ของ QR Code เวอร์ชั่น 1 - M เข้ารหัส 6 ตัวอักษร 56
3-4 แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิต ใน Pad Character ของ QR Code เวอร์ชั่น 3 - Q เข้ารหัส 6 ตัวอักษร 57
3-5 แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิต ใน Pad Character ของ QR Code เวอร์ชั่น 6 - M เข้ารหัส 18 ตัวอักษร 57
3-6 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนนอนของ QR Code เวอร์ชั่น 1 - M เข้ารหัส 6 ตัวอักษร ขนาด 5 x 4 โมดูล 58

ภาพที่ หน้า

3-7 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนนอนของ QR Code เวอร์ชั่น 3 - Q เข้ารหัส 6 ตัวอักษร ขนาด 7 x 5 โมดูล 58
3-8 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนนอนของ QR Code เวอร์ชั่น 6 - M เข้ารหัส 35 ตัวอักษร ขนาด 12 x 9 โมดูล 59
3-9 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนตั้งของ QR Code เวอร์ชั่น 1 - Q เข้ารหัส 6 ตัวอักษร ขนาด 5 x 4 โมดูล 59
3-10 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนตั้งของ QR Code เวอร์ชั่น 3 - Q เข้ารหัส 15 ตัวอักษร ขนาด 7 x 5 โมดูล 60
3-11 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนตั้งของ QR Code เวอร์ชั่น 6 - M เข้ารหัส 84 ตัวอักษร ขนาด 12 x 9 โมดูล 60
3-12 แสดง QR Code เมื่อเปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส 61
3-13 ฮิสโตแกรม (Histogram) แสดงจำนวนบิตสีดำและสีขาวในรูป 62
3-14 แสดงความแตกต่างของรูปต้นฉบับที่ใช้ในการระบุตัวตนกับรูปมืด (Dark image) 63
3-15 การแบ่งระดับชั้นสี RGB ของรูป 64
3-16 การแปลงรูปแบบ (Format) ของ QR Code 64
3-17 การฝังรูปบน QR Code 65
4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 1 79
4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 3 79
4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 6 80

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

The Quick Response Code หรือ QR Code เป็นบาร์โค้ดประเภทสองมิติ ได้ถูกคิดค้นขึ้นในปี 1994 โดยบริษัท DENSO WAVE INCORPORATED [1] (แยกออกมาจากบริษัท DENSO's Industrial Systems Product Division produces ในปี 2011) ซึ่งได้นำมาใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม โลจิสติกส์ การขายสินค้าและการโฆษณา เป็นต้น [2]

นอกจากนี้ QR Code ได้พัฒนาคุณสมบัติโดยนำข้อดีของบาร์โค้ด 2 มิติประเภทต่างๆมาใช้ เช่น ใน PDF 417 มีความจุข้อมูลได้จำนวนมาก DataMatrix มีพื้นที่ที่พิมพ์ออกมามีขนาดเล็กและ MAXI Code มีคุณสมบัติในการอ่านข้อมูลด้วยความรวดเร็ว [3]

โดยใน QR Code สามารถเก็บอักขระต่างๆได้หลายประเภท เช่น Numeric, Alphabetic, Kanji, Kana ซึ่งประเภท Numeric ในเวอร์ชั่น 40 สามารถเก็บข้อมูลได้ถึง 7,089 ตัว ซึ่งมีมาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากล คือ ISO/IEC 18004:2000 [4] และฉบับปรับปรุง ISO/IEC 18004:2006 [5] นอกจากที่สามารถเก็บอักขระ 4 ประเภทดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว QR Code ยังสามารถสร้างเป็นภาษาไทย ซึ่งในประเทศไทยได้มีการพัฒนาคุณสมบัติการเข้ารหัสที่เป็นอักขระภาษาไทยให้สามารถการเก็บข้อมูลได้มากขึ้น [6] และ QR Code ยังมีค่า Error Correction คือ เมื่อสูญเสียข้อมูลไม่เกินค่าที่กำหนดไว้จะสามารถกู้ข้อมูลนั้นกลับมาได้ทั้งหมด รวมถึงมีงานวิจัยด้านแอพพลิเคชั่น QR Code ในโทรศัพท์มือถือที่มีอย่างต่อเนื่อง [7,18] ซึ่งในปัจจุบันโทรศัพท์มือถือส่วนใหญ่สามารถอ่าน QR Code ได้อย่างง่ายดาย เพียงติดตั้งแอพพลิเคชั่นของ QR Code [10] ซึ่งสะดวกต่อการใช้งาน เพราะเหตุนี้จึงทำให้ QR Code ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งผู้ใช้สามารถสร้าง QR Code ประเภททั่วไปได้ในโทรศัพท์มือถือและเว็บไซต์ที่แพร่หลายในอินเตอร์เน็ต [11]

แม้ว่าใน QR Code มีความสามารถที่บรรจุข้อมูลได้จำนวนมากและอ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับ การการระบุตัวตนของเจ้าของข้อมูลที่อยู่ใน QR Code โดยตัวอย่างวิธีการระบุตัวตนใน QR Code เช่น การใส่ลายน้ำดิจิตอล ซึ่งมีทั้งแบบไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้ต้อง ต้องถอดข้อมูลในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) [12] และการ

การใส่ลายน้ำดิจิตอล ที่สามารถมองเห็นได้จากภายนอก เช่น การใส่ลายน้ำดิจิตอลแบบมองเห็นได้ (Visible watermarking) การใส่ลายน้ำดิจิตอลแบบมองเห็นได้ นั้นลายน้ำที่วางทับจะมีลักษณะโปร่งแสง [15] จึงทำให้ลายน้ำที่ออกมานั้นมีลักษณะที่เห็นพื้นหลังที่ซ้อนทับด้วย ซึ่งไม่เป็นไปตามจุดประสงค์ที่ไม่ต้องการและการระบุตัวตนอีกประเภทหนึ่ง คือ การฝังรูปภาพทับลงใน QR Code วิธีการนี้จะทำให้รูปที่ออกมีลักษณะที่สมบูรณ์ ซึ่งรูปที่ฝังบน QR Code จะเปรียบเสมือนรอยเปื้อน ซึ่งสามารถกู้ข้อมูลนั้นกลับมาได้โดย Error Correction แต่ก็ยังมีข้อเสียกล่าวคือ ถ้ารูปที่ฝังบน QR Code นั้นมีขนาดที่ใหญ่เกินกว่าความสามารถในการกู้กลับข้อมูล QR Code ที่มีการฝังด้วยรูปนั้นจะไม่สามารถอ่านได้

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาหาวิธีการฝังรูปลงบน QR Code ให้สามารถฝังบนโมดูลใน QR Code ได้มากขึ้น ผลทำให้รูปที่ฝังมีขนาดใหญ่กว่าปกติ โดยในการเข้ารหัสของ QR Code มีการใช้ Bitstream ในส่วน Pad characters เพื่อเติมส่วนข้อมูล (Data Codewords) ให้เต็มตามที่กำหนดไว้ในแต่ละเวอร์ชั่นของ QR Code ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแปลง Bitstream ในส่วนนั้นจะไม่มีผลต่อการถอดรหัส เมื่อเราดูการวางของบิตในส่วน Pad characters ของโครงสร้าง QR Code [16] และหลักการในการเข้ารหัส (Encoding) ของ QR Code [17] พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงบางบิตในการเข้ารหัส (Encoding) ของ QR Code จะมีผลต่อการวางรูปแบบของบิต ซึ่งเป็นแนวทางการทำวิจัย โดยเมื่อฝังรูปที่กำหนดลงใน QR Code แล้วจะสามารถอ่าน QR Code ได้โดยใช้โทรศัพท์มือถือที่มีโปรแกรมอ่าน QR Code ทั่วไปได้และยังเป็นการที่ใช้บิตใน QR Code ที่มีอยู่จำกัดเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการสร้าง QR Code ที่สามารถระบุตัวตนได้ในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อสร้างการจำลองสำหรับการฝังรูปในคิวอาร์โค้ด โดยวิธีการเปลี่ยนการเข้ารหัสเพื่อหาขนาดของรูปที่เหมาะสมที่สุดโดยสามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ทั่วไปได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เป็นการฝังรูปที่ใช้ในการระบุตัวตนลงบน QR Code
2. รูปที่ฝังบน QR Code เป็นรูปถ่ายสีหน้าตรง

3. หาวิธีการเปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส QR Code เพื่อให้ได้ขนาดรูปที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถสามารถอ่าน QR Code ได้โดยใช้โทรศัพท์มือถือที่มีโปรแกรมอ่าน QR Code ทั่วไปได้
4. เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ Error Correction ระดับ L, M, Q, H ในอุดมคติกับวิธีในข้อ 3
5. เวอร์ชั่นของ QR Code ที่จะใช้ในวิจัยจะใช้เวอร์ชั่น 3 เวอร์ชั่น ได้แก่ เวอร์ชั่น 1 ใช้เพื่อทดสอบ QR Code เมื่อเปลี่ยนรูปแบบการวางบิต เวอร์ชั่น 3 ใช้ในการเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น เวอร์ชั่น 6 หรือเวอร์ชั่นอื่นๆ ใช้ศึกษาความเป็นไปได้ที่จะฝังรูปลงบน QR Code ที่ใช้นามบัตรในการระบุตัวตน
6. ข้อมูลใน QR Code นั้นยังสามารถอ่านด้วยโปรแกรมอ่าน QR Code ทั่วไปได้ (ซึ่งจะใช้ Zxing Reader เวอร์ชั่น 2.0 ในการอ่าน)

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการพื้นฐานต่างๆ ที่ใช้ในการวิจัย รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาเทคนิคต่างๆ และหลักการ พร้อมทั้งศึกษาข้อดีและข้อบกพร่องของแต่ละเทคนิคของแต่ละงานวิจัยที่อยู่ในขอบเขต
3. ออกแบบและนำเสนอวิธีการวิธีการฝังรูป QR Code ภายในขอบเขตที่กำหนด
4. ทดสอบวิธีการที่นำเสนอ
5. วิเคราะห์ผลการทดลอง
6. สรุปผลและเรียบเรียงวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. ทำให้สามารถพัฒนาการฝังรูปใน QR Code โดยเพิ่มเปอร์เซ็นต์ Error Correction โดยใช้ประโยชน์จากบิตที่ไม่ได้ใช้ในการเข้ารหัส
2. รูปที่ซ้อนทับบน QR Code สามารถฝังบนโมดูลใน QR Code ได้มากขึ้นทำให้รูปที่ฝังมีขนาดใหญ่กว่า การฝังรูปแบบปกติ
3. สามารถหาขนาดของรูปที่ใหญ่ที่สุดที่ฝังบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลง Bitstream โดยสามารถอ่านจากเครื่องอ่าน QR Code ทั่วไปได้

4. เป็นแนวทางการวิจัยด้าน การฝังรูปต่อไปในอนาคต

1.6 งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Skawattananon C., and Vongpradhip S., “An improved method to embed larger image in QR code”, 2013 10th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE 2013), Thailand, May 29 -31, 2013, pp. 64–69.

Skawattananon C., Ketcham M., Vongpradhip S.” Identifying QR Code”, International Conference on Computer and Communication Technologies (ICCCT' 2012) , Thailand, May 26 - 27, 2012 pp. 132 - 135.

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ได้แก่ ส่วนประกอบของ QR Code โครงสร้างและการเข้ารหัสใน QR Code ทฤษฎีเกี่ยวกับการปรับปรุงรูปของโปรแกรมในโทรศัพท์มือถือ ทฤษฎีที่เกี่ยวกับรูปภาพและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงที่แสดงดังนี้

2.1 ส่วนประกอบของ QR Code

\

ภาพที่ 2-1 QR Code

QR Code (Quick Response Code) เป็นบาร์โค้ดประเภทบาร์โค้ดสองมิติ (2D Barcode) ที่ถูกนำมาใช้ในงานด้านอุตสาหกรรม โลจิสติกส์ การขายสินค้าและการโฆษณา เป็นต้น

ภาพที่ 2-2 ตัวอย่าง QR Code ที่ใช้ในงานต่างๆ

QR Code ยังคุณสมบัติที่สามารถบรรจุข้อมูลได้จำนวนมากและมีคุณสมบัติอ่านข้อมูลได้รวดเร็ว โดยใน QR Code ยังสามารถอ่านข้อมูลได้จากโทรศัพท์มือถือที่ติดตั้งแอพพลิเคชั่นสำหรับอ่าน QR Code (QR Code Reader) ซึ่งอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้ใช้งาน โดยโครงสร้างของ QR Code นั้นจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1.1 Bitstream

Bitstream คือ สายไบนารี่ที่ประกอบด้วยบิต 0 และ บิต 1 ที่ได้มาจากแปลง Data characters ตามหลักเกณฑ์การเข้ารหัสของ QR Code

2.1.2 **โมดูล** (Module)

QR Code ประกอบด้วย สี่เหลี่ยมสีดำและสี่เหลี่ยมสีขาว สี่เหลี่ยมแต่ละบล็อกเหล่านี้เรียกว่า โมดูล

การอ้างอิงตำแหน่งใน QR Code นั้นจะถูกกำหนดโดยแถว (Row) และคอลัมน์ (Column) โดยพิกัดรูปแบบสัญลักษณ์จะใช้ I, J โดยให้ I เป็นแถว นับจากบนลงล่างและ J เป็นคอลัมน์ นับจากซ้ายไปขวา โดยใน QR Code จะนับตำแหน่งแรกที่ 0 หรือโมดูล (0,0) ซึ่งจะอยู่มุมซ้ายบนของสัญลักษณ์

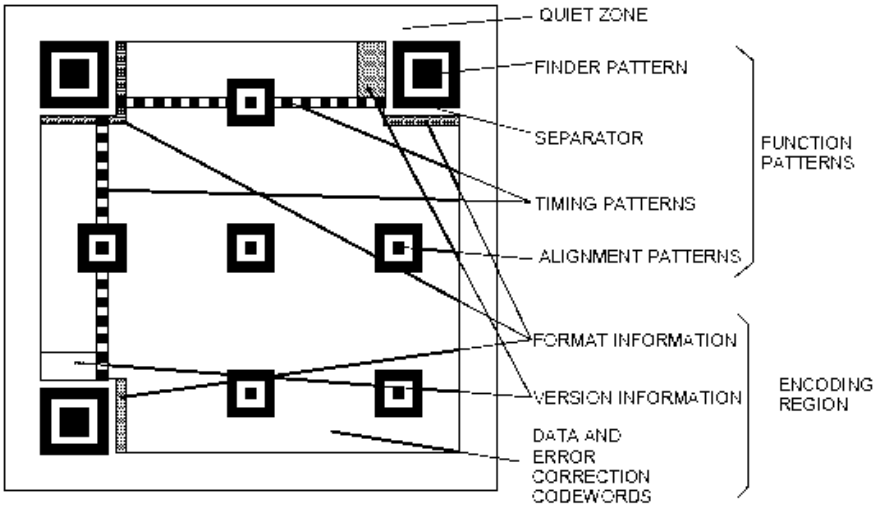
สำหรับการแทนข้อมูลลงใน QR Code นั้น บิต 1 จะถูกแทนโมดูลมืด (Dark Module) และบิต 0 จะถูกแทนด้วย โมดูลสว่าง (Light Module)

2.1.3 Codewords

Codewords เป็นกลุ่มของโมดูล หลังจากการเข้ารหัส Bitstream ซึ่ง 1 Codeword จะประกอบด้วย 8 บิต หรือ 8 โมดูลหรือเรียกอีกอย่างว่า 8-Bit Codewords ซึ่งจำนวน Codewords จะขึ้นอยู่กับเวอร์ชั่น (Version) ของ QR Code (เวอร์ชั่น 1 มี 26 Codewords) โดยจำนวน Codewords ของแต่ละเวอร์ชั่นสามารถดูได้จากภาคผนวก ก ตารางที่ ก-1 Codeword capacity of all versions of QR Code 2005 โดยการวางข้อมูลลงในโครงสร้าง Codewords นั้นจะกล่าวในหัวข้อ 2.9.1 ต่อไป

2.1.4 โครงสร้างของ QR Code (QR Code Structure)

โครงสร้างของ QR Code จะประกอบด้วยสองส่วนหลักๆ คือ Function Patterns และ Encoding Region ซึ่งมีส่วนประกอบดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของ QR Code 2005

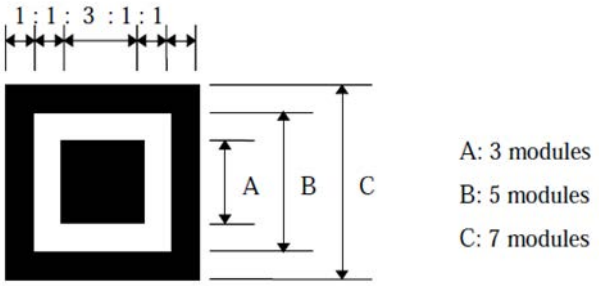
ก. Function Patterns

เป็นส่วนที่ใช้จับตำแหน่งพร้อมทั้งปรับรูปร่างของ QR Code ให้พร้อมสำหรับการถอดรหัสข้อมูล ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1) Finder Pattern

Finder Pattern จะประกอบด้วย Finder Pattern ใน 3 ตำแหน่ง ได้แก่ มุมบนซ้าย มุมบนขวาและมุมล่างซ้าย ของสัญลักษณ์ดังแสดงตัวอย่างดังภาพที่ 2-3 ทำให้สามารถอ่านได้ 360° รอบทิศทาง

Finder Pattern แต่ละส่วนจะประกอบด้วยสี่เหลี่ยม 3 สี่เหลี่ยม ซ้อนทับกันที่จุดศูนย์กลางโดยโครงสร้างที่ซ้อนทับกันจะประกอบด้วยโครงสร้าง module สีดำขนาด 7 x 7 modules, โครงสร้าง module สีขาวขนาด 5 x 5 modules และโครงสร้าง module สีดำขนาด 3 x 3 modules โดยอัตราส่วนความกว้างของแต่ละ Finder Pattern เป็นอัตราส่วน 1 : 1 :3 : 1 : 1 ดังแสดงในภาพที่ 2-4 สัญลักษณ์ Finder Pattern จะมีลักษณะพิเศษที่สามารถพบได้น้อยในส่วนอื่นของ QR Code ซึ่งจะใช้ตำแหน่งทั้ง 3 สำหรับการระบุตำแหน่งของ QR Code ได้อย่างรวดเร็ว



ภาพที่ 2-4 Finder Pattern

2) Timing Pattern

เป็นโมดูลสีขาวและสีดำที่สลับกัน ใช้ตรวจสอบพิกัด Timing Pattern จะวางอยู่ระหว่าง Finder Pattern

3) Alignment Pattern

จะปรากฏเริ่มต้นในเวอร์ชั่น 2 ขึ้นไปเริ่มแรกจะอยู่ตำแหน่งขวาล่าง มีหน้าที่แก้ไขการบิดเบือนเมื่อ QR Code โค้งหรืองอและจำนวนของ Alignment Pattern จะมีมากขึ้น เมื่อเวอร์ชั่นสูงขึ้น

4) Quiet Zone

จะเป็นบริเวณที่ว่างเปล่าปราศจากเครื่องหมายใดๆ โดยจะอยู่รอบทั้ง 4 ด้านของ QR Code โดยจะมีลักษณะเป็นพื้นที่สว่าง (Light) สำหรับ QR Code มีมีความกว้างด้านละ 4X

5) Separator

ลักษณะเป็นโมดูลสว่าง (Light) ทั้งหมด เป็นแนวยาวขนาด 1 โมดูลใช้แบ่งส่วน Finder Pattern ออกจากส่วนที่เหลือใน QR Code

ข. Encoding Region

เป็นส่วนที่ใช้ในการเข้ารหัสของ QR Code ซึ่งส่วนประกอบที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

1) Format Information

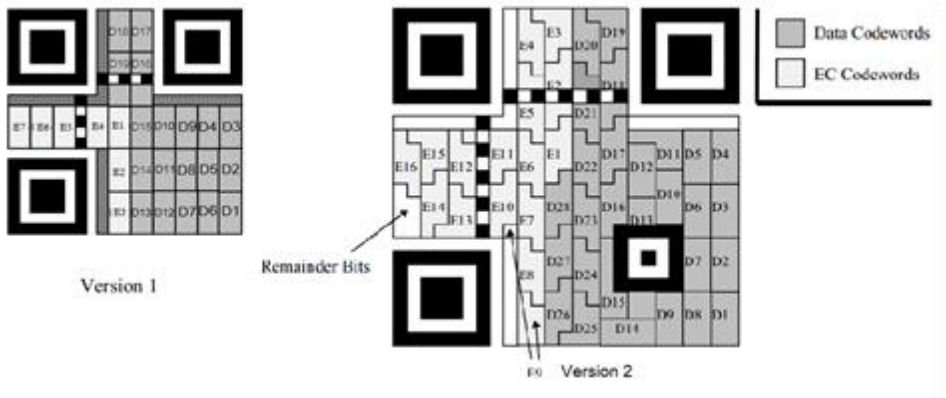
ประกอบด้วยส่วนการแก้ไขข้อผิดพลาดและรูปแบบ Mask ของ QR Code ส่วนนี้จะเป็นส่วนแรกที่อ่านเมื่อมีการถอดรหัสบน QR Code

2) Version Information

อยู่ตำแหน่งข้างซ้ายของ Finder Pattern มุมขวาบนและอยู่บน Finder Pattern มุมซ้ายล่าง มีหน้าที่บอกเวอร์ชั่นของ QR Code

3) Data and Error Correction Codewords

เป็นส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลและส่วนแก้ไขข้อผิดพลาด มีลักษณะเป็นอะเรย์แถวและคอลัมน์ โดยแต่ละโมดูล (Module) จะถูกเก็บเป็นเลขฐานสอง (0 และ 1) โดยส่วนนี้จะเป็นการเรียงต่อกันโดยเริ่มจาก Data Codewords เมื่อบิตของ Data Codewords เต็มจะต่อด้วยบิตของ Error Codewords ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 การวางตัวของ Data Codewords และ Error Codewords

ภาพที่ 2-5 ด้านซ้ายมือแสดง QR Code เวอร์ชั่น 1 ที่ Error Correction L โดยแสดงการวาง Data Codewords (D1-D19) และ Error Correction Codewords (E1-E7) ภาพที่ 2-5 ด้านขวามือแสดง QR Code เวอร์ชั่น 2 ที่ Error Correction M โดยแสดงการวาง Data Codewords (D1-D28) และ Error Correction Codewords (E1-E16)

4) Remainder Bits

อยู่ตำแหน่งสุดท้ายต่อจาก Error Correction Codewords เป็นบิตที่เหลือจากการเข้ารหัสของ QR Code ซึ่งจะมีไม่ครบ 8 บิต หรือ 1 Codeword

2.1.5 **รูปแบบภาษาที่ QR Code เก็บข้อมูล** (Data characters)

รูปแบบประเภทในการเก็บข้อมูลใน QR Code มี 4 ประเภท (Mode) ดังนี้

ก. Numeric data (0 - 9)

จะเก็บดาต้าประเภทตัวเลขอย่างเดียว โดยทฤษฎีจะสามารถบรรจุข้อมูลได้สูงสุด 7,089 ตัวหรือน้อยกว่า

ข. Alphanumeric data (0 - 9, A - Z, $ % * + - . / :)

จะเก็บดาต้าประเภทไบนารี 8 บิตโดยทฤษฎีจะสามารถบรรจุข้อมูลได้สูงสุด 2,953 ตัวหรือน้อยกว่า

ค. 8-bit byte data

จะเก็บดาต้าประเภทตัวเลข ตัวอักษรภาษาอังกฤษและอักขระพิเศษ โดยทฤษฎีจะสามารถบรรจุข้อมูลได้สูงสุด 4,296 ตัวหรือน้อยกว่า

ง. Kanji data

จะเก็บดาต้าประเภทตัวอักษร คันจิ / คะนะ โดยทฤษฎีจะสามารถบรรจุข้อมูลได้สูงสุด 1,817 ตัวหรือน้อยกว่า

2.1.6 **การแก้ความผิดพลาด** (Error Correction)

การแก้ความผิดพลาดหรือ Error Correction คือ เปอร์เซ็นข้อมูลที่เมื่อสูญเสียไม่เกินที่กำหนดไว้จะสามารถกู้ข้อมูลนั้นกลับมาได้ ซึ่งจะแบ่งสามารถแบ่งได้เป็นระดับในอุดมคติดังนี้

ก. Level L

ความผิดพลาด 7% หรือน้อยกว่าจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้

ข. Level M

ความผิดพลาด 15% หรือน้อยกว่าจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้

ค. Level Q

ความผิดพลาด 25% หรือน้อยกว่าจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้

ง. Level H

ความผิดพลาด 30% หรือน้อยกว่าจะสามารถกู้ข้อมูลกลับมาได้

การสูญเสียข้อมูล หมายถึง สัญญาณรบกวนที่มีผลต่อการอ่านค่าในโมดูลนั้นๆ ซึ่งงานวิจัยนี้สัญญาณรบกวนจะเป็นรูปที่ฝังบน QR Code โดยใน QR Code จะใช้ Reed–Solomon Error Correction (RS Code) ในการเข้ารหัส Error Correction ซึ่งเป็นการเข้ารหัสแบบ 8 บิต โดยถ้าข้อมูลนั้นหายไป 1 บิตข้อมูลที่เหลืออีก 7 บิตจะสูญเสียไปด้วย (กรณีเดียวกับถ้าสูญเสีย โมดูลในโมดูลหนึ่งใน Codeword Codeword นั้นจะสูญเสียไปด้วย)

โดยการคำนวณหาค่า Error Correction นั้นจะคำนวณในส่วน Encoding Region ซึ่งใช้ในการวาง Data Codewords และ Error Correction Codewords

$$\text{Error Correction} = N \times 100 / (D + E) \quad (2.1)$$

N = จำนวน Codeword ที่สูญเสีย

D = จำนวน Data Codewords

E = จำนวน Error Codewords

ตารางที่ 2-1 ตัวอย่าง Error correction characteristics for QR Code 2005

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c, k, r)
1	26	L	7	1	(26,19,2)
		M	10	1	(26,16,4)
		Q	13	1	(26,13,6)
		H	17	1	(26,9,8)

ตัวอย่าง จากตารางที่ 2-1 แสดง QR Code เวอร์ชั่น 1-L โดยความหมายของ Error Correction code per block คือ

(c, k, r) : c = จำนวน Data Codewords + จำนวน Error Correction Codewords เท่ากับ 26

k = จำนวน Data Codewords เท่ากับ 19

r = จำนวน Codewords ที่สูญเสียแล้วยังทำให้ QR Code เวอร์ชั่น 1-L สามารถอ่านได้ ปกติ เท่ากับ 2

โดยสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ (2 / 26) x 100 = 7.69%

ในทำนองเดียวกัน

จำนวน Codewords ที่สูญเสียแล้วยังทำให้ QR Code เวอร์ชั่น 1-M สามารถอ่านได้เท่ากับ 4

สามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ (4 / 26) x 100 = 15.38%

จำนวน Codewords ที่สูญเสียแล้วยังทำให้ QR Code เวอร์ชั่น 1-Q สามารถอ่านได้เท่ากับ 6

สามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ (6 / 26) x 100 = 23.07%

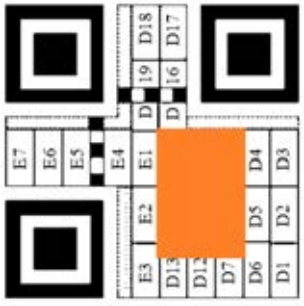
จำนวน Codewords ที่สูญเสียแล้วยังทำให้ QR Code เวอร์ชั่น 1-H สามารถอ่านได้เท่ากับ 8

สามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ (8 / 26) x 100 = 30.76%

ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกับในอุดมคติ (L = 7%, M = 15%, Q = 25%, H = 30%)

ค่า Error Correction code per block ของทุกเวอร์ชั่นใน QR Code สามารถหาได้จากภาคผนวก ก-2 Error correction characteristics for QR Code 2005

ในงานวิจัยนี้จะมีการคำนวณการสูญเสียข้อมูล (Error Correction) ซึ่งจะคิดจากขนาดของรูปที่ฝังบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตแล้วยังสามารถอ่านด้วยโปรแกรมอ่าน QR Code ทั่วไปดังตัวอย่างในภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ Error Correction ของรูปที่ฝัง

จากรูปที่ 2-6 กำหนดให้พื้นที่บริเวณสีส้มเป็นพื้นที่ที่ใช้ในการฝังรูป ซึ่งมีขนาด 9 x 6 โมดูลหรือพื้นที่ 9 Codewords ที่สูญเสียแล้วยังทำให้ QR Code เวอร์ชั่น 1-L ที่เปลี่ยนแปลงบิตสามารถอ่านได้ปกติ

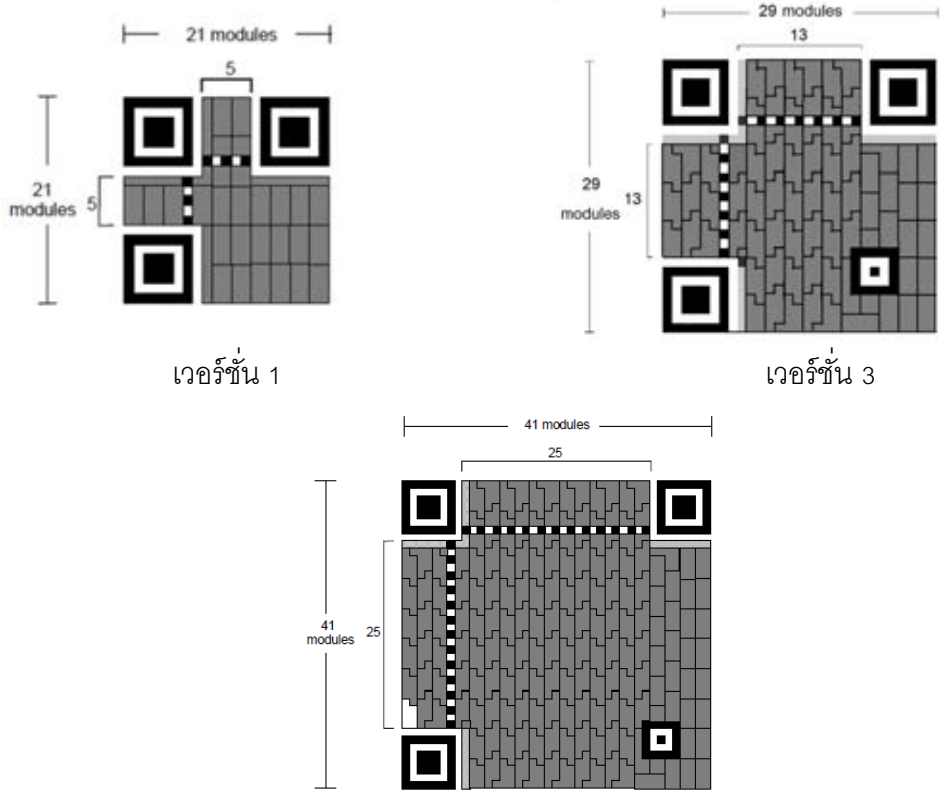
โดยสามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้เท่ากับ (9 / 26) x 100 = 34.62%

2.1.7 เวอร์ชั่น (Version) และขนาด (Sizes) ของ QR Code

จำนวนเวอร์ชั่นของ QR Code มีตั้งแต่เวอร์ชั่น 1 - 40 โดยเวอร์ชั่น 1 มีขนาด 21 x 21 โมดูล เมื่อเพิ่มเวอร์ชั่นขึ้น 1 เวอร์ชั่น จะเพิ่มโมดูลทั้งด้านกว้างและด้านยาวอีกอย่างละ 4 โมดูล ซึ่งเป็นไปตามสมการ 2.2 โดย V แทน เวอร์ชั่นของ QR Code

จำนวนโมดูล QR Code = (21 + ((V – 1) x 4)) x (21 + ((V - 1) x 4)) โมดูล (2.2)

ดังนั้นเวอร์ชั่น 40 = {(21 + (39 x 4)) x (21 + (39 x 4))} = 177 x 177 โมดูล จากภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างของ QR Code เวอร์ชั่น 1 เวอร์ชั่น 3 และ เวอร์ชั่น 6



เวอร์ชั่น 1 เวอร์ชั่น 3

เวอร์ชั่น 6

ภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างของ QR Code เวอร์ชั่น 1 เวอร์ชั่น 3 และเวอร์ชั่น 6

2.1.8 **ความจุข้อมูล** (Data capacity) **ที่เก็บได้ใน** QR Code

จำนวนตัวอักษร (Characters) ที่สามารถเก็บได้สูงสุดจะขึ้นอยู่กับเวอร์ชั่นและโหมดของภาษาที่เข้ารหัส ดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 ตัวอย่าง Number of symbol characters and input data capacity for QR Code

Version	Error correction Level	Number of data codewords	Number of data bits	Data capacity			
				Numeric	Alphanumeric	8-bit	Kanji
1	L	19	152	41	25	17	10
	M	16	128	34	20	14	8
	Q	13	104	27	16	11	7
	H	9	72	17	10	7	4
2	L	34	272	77	47	32	20
	M	28	224	63	38	26	16
	Q	22	176	48	29	20	12
	H	16	128	34	20	14	8
3	L	55	440	127	77	53	32
	M	44	352	101	61	42	26
	Q	34	272	77	47	32	20
	H	26	208	58	35	24	15
4	L	80	640	187	114	78	48
	M	64	512	149	90	62	38
	Q	48	384	111	67	46	28
	H	36	288	82	50	34	21
5	L	108	864	255	154	106	65
	M	86	688	202	122	84	52
	Q	62	496	144	87	60	37
	H	46	368	106	64	44	27
6	L	136	1,088	322	195	134	82

	M	108	864	255	154	106	65
	Q	76	608	178	108	74	45
	H	60	480	139	84	58	36

จากตัวอย่าง ถ้าต้องการเข้ารหัสตัวอักษรรูปแบบ Alphanumeric data จำนวน Data capacity มากกว่า 65 ตัวอักษร จากตารางที่ 2-2 ต้องเข้ารหัสในเวอร์ชั่น 6 ในระดับ Error Coorection L ขึ้นไป เป็นต้น

2.1.9 การเข้ารหัสใน QR Code ในส่วน Data Codewords

การเข้ารหัส QR Code ในส่วน Data Codewords Data Codewords เป็นส่วนประกอบหนึ่งใน Encoding Region หัวข้อ 2.1.4.ข ซึ่งขั้นตอนแรกในการสร้าง QR Code คือการสร้าง Bitstream ที่เป็นการเปลี่ยนข้อมูล (Data) มาเป็น Binary และมีการใส่ข้อมูลที่เกี่ยวกับโหมด ของรูปแบบภาษาที่ QR Code เก็บข้อมูลรวมถึงความยาวของข้อมูล โดยจะสาธิตการเข้ารหัส “CHANON” ที่ Error Correction เป็น Level L (ความผิดพลาด 7%)

ก. การเข้ารหัสเพื่อระบุโหมด

โหมดนี้จะใช้ Bitstream จำนวน 4 บิตในการเลือกรูปแบบภาษาที่ QR Code ใช้เก็บข้อมูลนั้น โดยจะมีการแบ่งตามลักษณะดังนี้

1) โหมด Numeric จะใช้ Bitstream เป็น 0001

2) โหมด Alphanumeric จะใช้ Bitstream เป็น 0010

3) โหมด 8-bit byte จะใช้ Bitstream เป็น 0100

4) โหมด Kanji จะใช้ Bitstream เป็น 1000

โดยข้อมูล (Data) ที่ใช้ในการเข้ารหัสจะใช้คำว่า “CHANON” จะเป็นรูปแบบข้อมูลโหมด Alphanumeric ดังนั้นจะสามารถเริ่มต้น Bitstream ที่ “0010”

ข. การเข้ารหัสความยาวของข้อมูล

ขั้นตอนนี้เป็นการบอกถึงความยาวของข้อมูลที่เข้ารหัสใน QR Code โดยความยาวของ Bitstream จะขึ้นอยู่กับเวอร์ชั่นของ QR Code และรูปแบบของภาษาดังตาราง ตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 การระบุโหมดในการเข้ารหัสของ QR Code

เวอร์ชั่นของ QR Code	โหมด			
	Numeric (บิต)	Alphanumeric (บิต)	8-bit byte (บิต)	Kanji (บิต)
1-9	10	9	8	8
10-26	12	11	16	10
27-40	14	13	16	12

จากการเข้ารหัสคำว่า “CHANON” มีทั้งหมด 6 ตัวอักษรสามารถแปลงเป็นเลขฐานสองได้เป็น 110 เมื่อทำการเข้ารหัส QR Code เวอร์ชั่น 1 โดยโหมดที่ใช้เป็นโหมด Alphanumeric จากข้อมูลข้างต้นทำให้ต้องเข้ารหัสเป็น Binary String จำนวน 9 บิต “000000110” ดังนั้นเมื่อรวม Binary String จากเริ่มแรกจะได้ “0010 000000110”

ค. การเข้ารหัสข้อมูล

1) ทำการแบ่งคำที่ต้องการเข้ารหัสออกเป็นคู่ จากตัวอย่างสาธิตจะได้เป็น “CH, AN, ON”

2) ทำการแปลงตัวอักษรเป็นรหัส ตามตารางที่ 2-4 ดังนี้

ตารางที่ 2-4 ตารางการเข้ารหัสและถอดรหัสสำหรับโหมด Alphanumeric

Char.	Value	Char.	Value
0	0	O	24
1	1	P	25
2	2	Q	26
3	3	R	27
4	4	S	28
5	5	T	29
6	6	U	30
7	7	V	31

8	8	W	32
9	9	X	33
A	10	Y	34
B	11	Z	35
C	12	SP	36
D	13	$	37
E	14	%	38
F	15	*	39
G	16	+	40
H	17	-	41
I	18	.	42
J	19	/	43
K	20	:	44
L	21		
M	22		
N	23		

โดยนำอักษรที่แปลงจากตารางที่ 2-4 ค่าอักษรตัวแรกคูณกับ 45 แล้วนำมาบวกกับ อักษรที่แปลงจากตารางที่ 2-4 ตัวที่สอง เมื่อคำนวณเสร็จให้แปลงเป็น Bitstream จำนวน 11 บิต

3) ถ้าตัวอักษรที่อยู่สุดท้ายไม่มีคู่ ให้เปลี่ยนแปลงรหัส ตามตารางที่ 2-4 แล้วแปลงเป็น Bitstream จำนวน 6 บิต จากขั้นตอนทั้งหมดสามารถแปลงตัวอย่างสาธิตได้ดังนี้

CH ----> (45 * 12) + 17 = 557 ----> 01000101101

AN ----> (45 * 10) + 23 = 473 ----> 00111011001

ON ----> (45 * 24) + 23 = 1,103 ----> 10001001111

เมื่อเรียง Bitstream ทั้งหมดถึงตอนนี้จะได้เป็น

“0010 000000110 01000101101 00111011001 10001001111”

4) การใส่บิตปิดท้าย (Terminator) เป็นการใส่บิตปิดท้ายของ Bitstream เป็นการแสดงว่าข้อมูลนั้นสิ้นสุดโดยให้ใส่ **0000** เพื่อปิดท้าย เมื่อเรียง Bitstream ทั้งหมดถึงตอนนี้จะได้เป็น

“0010 000000110 01000101101 00111011001 10001001111 0000”

5) ทำการจัดเรียงให้เป็น 8 บิต เติม 0 ถ้าจำเป็น ทำการจัดกลุ่มโดยจะให้เป็นกลุ่มละ 8 บิต ถ้าบิตสุดท้ายไม่เต็ม ให้เติม 0 จนครบ เมื่อเรียง Bitstream ทั้งหมดถึงตอนนี้จะได้เป็น

“00100000 00110010 00101101 00111011 00110001 00111100 00000000”

6) การใส่ Pad Characters เพื่อเพิ่มความยาว Bitstream ถ้า Bitstream มีความยาวสั้นที่เกินกว่า Data Codewords ที่กำหนดไว้ในแต่ละเวอร์ชั่น ขั้นตอนนี้เป็นการเติม Bitstream 11101100 และ 00010001 สลับกันจนได้จำนวน Data Codewords เท่ากับตาราง **2-2**

พบว่าใน เวอร์ชั่น 1 และ Error Correction Level L ต้องทำการสร้าง Data Codewords จำนวน 19 Codewords ขนาดยาว 152 บิต ดังนั้นจะได้ Bitstream สมบูรณ์ดังนี้

“00100000 00110010 00101101 00111011 00110001 00111100 00000000 00110011 00110011 11001100 11001100 11101100 00010001 00110011 00110011 11101100 00010001 11101100 00010001” หรือ “32 50 45 59 49 60 0 51 51 204 204 236 17 51 51 236 17 236 17” ในเลขฐาน 10

2.1.10 การเข้ารหัสใน QR Code ในส่วน Error Correction Codewords (EC Codewords)

Error Correction Codewords เป็นส่วนที่ทำต่อจากส่วน Data Codewords ซึ่งเป็นส่วนประกอบใน Encoding Region หัวข้อ 2.1.4.ข Error Correction Codewords จะเป็นการสร้างข้อมูลเพื่อให้แน่ใจว่า QR Code ยังสามารถอ่านได้แม้ว่าส่วนหนึ่งหายไป โดยจะใช้ Reed–Solomon Error Correction (RS Code) โดยมีกระบวนการ ที่สร้างเป็น Polynomial โดยใช้

Bitstream จากส่วนการเข้ารหัส Data Codewords ข้อ 2.1.8 เพื่อสร้าง Error Correction Codewords โดย Generator Polynomial เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า A Finite Field, A Galois Field ซึ่งมี 256 องค์ประกอบ GF(256) โดย The Generator Polynomial จะอยู่ในรูปแบบ

$$(X - \alpha)(X - \alpha^2) \dots (X - \alpha^t)$$

โดยความยาว Bitstream ของ Error Correction Codewords (EC Codewords) นั้นจะขึ้นอยู่กับเวอร์ชั่นและ Error Correction ใน QR Code ซึ่งจากตัวอย่างสาธิตในข้อ 2.1.8 เป็น QR Code เวอร์ชั่น 1 ที่ Error Correction ระดับ L จากตารางที่ 2-1 จำนวน Error Correction Codewords (ภาคผนวก ก-2) จะเท่ากับ 7 จะสามารถหา Generator Polynomial ได้จากภาคผนวก (ตาราง A.1 ใน International standard ISO/IEC18004) ดังนี้

$$g(X) = X^7 + \alpha^{87}X^6 + \alpha^{229}X^5 + \alpha^{146}X^4 + \alpha^{149}X^3 + \alpha^{238}X^2 + \alpha^{102}X + \alpha^{21} \quad (2.3)$$

จากหัวข้อ 2.1.9 สามารถหา Data Codewords ได้ดังนี้ “32 50 45 59 49 60 0 51 51 204 204 236 17 51 51 236 17 236 17”

ซึ่งสามารถหา Coefficients calculation f(x) โดยพิจารณาให้จำนวนสัมประสิทธิ์เท่ากับจำนวน Data Codewords ซึ่ง X ที่มีตัวยกกำลังมากที่สุดจะเท่ากับ 25 ได้ดังนี้

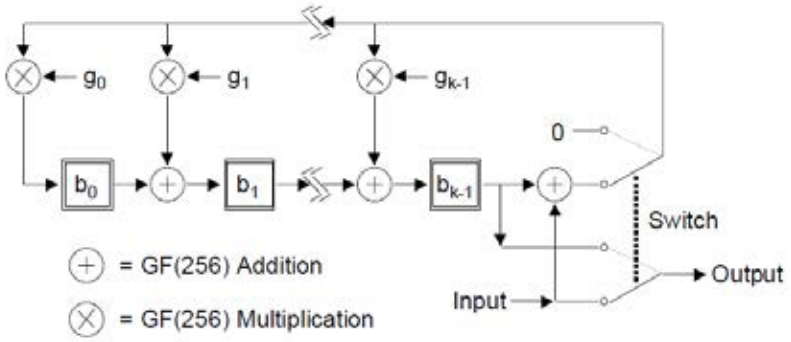
$$\begin{aligned} f(X) = {} & 32X^{25} + 50X^{24} + 45X^{23} + 59X^{22} + 49X^{21} + 60X^{20} + 0X^{19} + 51X^{18} \\ & + 51X^{17} + 204X^{16} + 204X^{15} + 236X^{14} + 17X^{13} + 51X^{12} + 51X^{11} \\ & + 236X^{10} + 17X^9 + 236X^8 + 17X^7 + 0X^6 + 0X^5 + 0X^4 + 0X^3 \\ & + 0X^2 + 0X^1 + 0X^0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

จากภาคผนวก ข สามารถแปลงสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} f(X) = {} & \alpha^5X^{25} + \alpha^{194}X^{24} + \alpha^{18}X^{23} + \alpha^{120}X^{22} + \alpha^{181}X^{21} + \alpha^{77}X^{20} + \alpha^{125}X^{18} \\ & + \alpha^{125}X^{17} + \alpha^{127}X^{16} + \alpha^{127}X^{15} + \alpha^{122}X^{14} + \alpha^{100}X^{13} + \alpha^{125}X^{12} + \alpha^{125}X^{11} \\ & + \alpha^{122}X^{10} + \alpha^{100}X^9 + \alpha^{122}X^8 + \alpha^{100}X^7 \end{aligned} \quad (2.5)$$

โดยสามารถดำเนินวิธีการตามวงจร Division ตามที่แสดงดังภาพ 2-8 โดย b_0 ถึง b_{k-1} ค่าตัวที่เริ่มต้นเป็น 0 มีสองช่วงในการเข้ารหัส ช่วงแรกสวิสต์จะอยู่ในตำแหน่งล่าง Data Codewords จะถูกส่งผ่านออกเป็นผลลัพธ์และดำเนินการต่อในวงจร ในช่วงแรกจะสมบูรณ์

หลังจาก N clock pulses ในช่วงที่ 2 (n + 1 .... n + k clock pulses) ที่สวิสต์อยู่ตำแหน่งบน Error Correction $\varepsilon_{k-1} \ldots \varepsilon_0$ จะถูกสร้างจากการกรองเป็นลำดับที่ Data input เป็น 0



ภาพที่ 2-8 วงจรการเข้ารหัส Error Correction Codeword

จากวงจรในภาพ 2-8 จะสามารถคำนวณ EC Codewords ไดตามภาพที่ 2-9 ดังนี้

ภาพที่ 2-9 การคำนวณค่า Error correction

	$75x^{19}+$	$76x^{18}+$	$47x^{17}+$	$184x^{16}+$	$36x^{15}+$	$236x^{14}+$	$172x^{13}+$	$51x^{12}+$	$51x^{11}+$	$236x^{10}+$	$17x^{9}+$	$236x^{8}+$	$17x^{7}+$	$0x^{6}+$	$0x^{5}+$	$0x^{4}+$	$0x^{3}+$	$0x^{2}+$	$0x^{1}+$	$0x^{0}$
	α^{179}	α^{16}	α^{69}	α^{132}	α^{225}	α^{122}	α^{220}	α^{125}	α^{125}	α^{122}	α^{100}	α^{122}	α^{100}							
$g(x)*(\alpha^{179})*x^{12}$	0+ 179 $=\alpha^{179}$ xor 75= 0	87+ 179 $=\alpha^{11}$ xor 76= 164	229+ 179 $=\alpha^{153}$ xor 47= 189	146+ 179 $=\alpha^{70}$ xor 184= 230	149+ 179 $=\alpha^{73}$ xor 36= 238	238+ 179 $=\alpha^{162}$ xor 236= 83	102+ 179 $=\alpha^{26}$ xor 172= 170	21+ 179 $=\alpha^{200}$ xor 51= 47												
		$164x^{18}+$	$189x^{17}+$	$230x^{16}+$	$238x^{15}+$	$83x^{14}+$	$170x^{13}+$	$47x^{12}+$	$51x^{11}+$	$236x^{10}+$	$17x^{9}+$	$236x^{8}+$	$17x^{7}+$	$0x^{6}+$	$0x^{5}+$	$0x^{4}+$	$0x^{3}+$	$0x^{2}+$	$0x^{1}+$	$0x^{0}$
		α^{149}	α^{109}	α^{160}	α^{44}	α^{206}	α^{151}	α^{69}	α^{125}	α^{122}	α^{100}	α^{122}	α^{100}							
$g(x)*(\alpha^{149})*x^{11}$		0+ 149 $=\alpha^{149}$ xor 164= 0	87+ 149 $=\alpha^{236}$ xor 189= 118	229+ 149 $=\alpha^{123}$ xor 230= 35	146+ 149 $=\alpha^{40}$ xor 238= 132	149+ 149 $=\alpha^{43}$ xor 83= 36	238+ 149 $=\alpha^{132}$ xor 170= 18	102+ 149 $=\alpha^{251}$ xor 47= 247	21+ 149 $=\alpha^{170}$ xor 51= 228											
			$118x^{17}+$	$35x^{16}+$	$132x^{15}+$	$36x^{14}+$	$18x^{13}+$	$247x^{12}+$	$228x^{11}+$	$236x^{10}+$	$17x^{9}+$	$236x^{8}+$	$17x^{7}+$	$0x^{6}+$	$0x^{5}+$	$0x^{4}+$	$0x^{3}+$	$0x^{2}+$	$0x^{1}+$	$0x^{0}$
			α^{121}	α^{47}	α^{140}	α^{225}	α^{224}	α^{232}	α^{156}	α^{122}	α^{100}	α^{122}	α^{100}							
$g(x)*(\alpha^{121})*x^{10}$			0+ 121 $=\alpha^{121}$ xor 118= 0	87+ 121 $=\alpha^{208}$ xor 35= 114	229+ 121 $=\alpha^{95}$ xor 132= 102	146+ 121 $=\alpha^{12}$ xor 36= 233	149+ 121 $=\alpha^{15}$ xor 18= 52	238+ 121 $=\alpha^{104}$ xor 247= 250	102+ 121 $=\alpha^{223}$ xor 228= 237	21+ 121 $=\alpha^{142}$ xor 236= 198										
				$114x^{16}+$	$102x^{15}+$	$233x^{14}+$	$52x^{13}+$	$250x^{12}+$	$237x^{11}+$	$198x^{10}+$	$17x^{9}+$	$236x^{8}+$	$17x^{7}+$	$0x^{6}+$	$0x^{5}+$	$0x^{4}+$	$0x^{3}+$	$0x^{2}+$	$0x^{1}+$	$0x^{0}$
				α^{155}	α^{126}	α^{245}	α^{106}	α^{244}	α^{117}	α^{164}	α^{100}	α^{122}	α^{100}							
$g(x)*(\alpha^{155})*x^{9}$				0+ 155 $=\alpha^{155}$ xor 114- 0	87+ 155 $=\alpha^{242}$ xor 102- 214	229+ 155 $=\alpha^{129}$ xor 233- 254	146+ 155 $=\alpha^{46}$ xor 52- 171	149+ 155 $=\alpha^{49}$ xor 250- 118	238+ 155 $=\alpha^{138}$ xor 237- 204	102+ 155 $=\alpha^{2}$ xor 198- 194	21+ 155 $=\alpha^{176}$ xor 17- 242									
					$214x^{15}+$	$254x^{14}+$	$171x^{13}+$	$118x^{12}+$	$204x^{11}+$	$194x^{10}+$	$242x^{9}+$	$236x^{8}+$	$17x^{7}+$	$0x^{6}+$	$0x^{5}+$	$0x^{4}+$	$0x^{3}+$	$0x^{2}+$	$0x^{1}+$	$0x^{0}$
					α^{85}	α^{88}	α^{178}	α^{121}	α^{127}	α^{67}	α^{213}	α^{122}	α^{100}							
$g(x)*(\alpha^{85})*x^{8}$					0+ 85 $=\alpha^{85}$ xor 214= 0	87+ 85 $=\alpha^{172}$ xor 254= 133	229+ 85 $=\alpha^{59}$ xor 171= 121	146+ 85 $=\alpha^{231}$ xor 118= 131	149+ 85 $=\alpha^{234}$ xor 204= 55	238+ 85 $=\alpha^{68}$ xor 194= 91	102+ 85 $=\alpha^{187}$ xor 242= 46	21+ 85 $=\alpha^{106}$ xor 236= 216								
						$133x^{14}+$	$121x^{13}+$	$131x^{12}+$	$55x^{11}+$	$91x^{10}+$	$46x^{9}+$	$216x^{8}+$	$17x^{7}+$	$0x^{6}+$	$0x^{5}+$	$0x^{4}+$	$0x^{3}+$	$0x^{2}+$	$0x^{1}+$	$0x^{0}$
						α^{128}	α^{212}	α^{247}	α^{185}	α^{92}	α^{130}	α^{251}	α^{100}							
$g(x)*(\alpha^{128})*x^{7}$						0+ 128 $=\alpha^{128}$ xor 133= 0	87+ 128 $=\alpha^{215}$ xor 121= 150	229+ 128 $=\alpha^{102}$ xor 131= 199	146+ 128 $=\alpha^{19}$ xor 55= 109	149+ 128 $=\alpha^{22}$ xor 91= 177	238+ 128 $=\alpha^{111}$ xor 46= 224	102+ 128 $=\alpha^{230}$ xor 216= 44	21+ 128 $=\alpha^{149}$ xor 17= 181							
							$150x^{13}+$	$199x^{12}+$	$109x^{11}+$	$177x^{10}+$	$224x^{9}+$	$44x^{8}+$	$181x^{7}+$	$0x^{6}+$	$0x^{5}+$	$0x^{4}+$	$0x^{3}+$	$0x^{2}+$	$0x^{1}+$	$0x^{0}$

ภาพที่ 2-9 (ต่อ)

	$133x^{14}$+	$121x^{13}$+	$131x^{12}$+	$55x^{11}$+	$91x^{10}$+	$46x^{9}$+	$216x^{8}$+	$17x^{7}$+	$0x^{6}$+	$0x^{5}$+	$0x^{4}$+	$0x^{3}$+	$0x^{2}$+	$0x^{1}$+	$0x^{0}$
	α^{128}	α^{212}	α^{247}	α^{185}	α^{92}	α^{130}	α^{251}	α^{100}							
$g(x)*(\alpha^{128})*x^{7}$	0+ 128 $=\alpha^{128}$ xor 133= 0	87+ 128 $=\alpha^{215}$ xor 121= 150	229+ 128 $=\alpha^{102}$ xor 131= 199	146+ 128 $=\alpha^{19}$ xor 55= 109	149+ 128 $=\alpha^{22}$ xor 91= 177	238+ 128 $=\alpha^{111}$ xor 46= 224	102+ 128 $=\alpha^{230}$ xor 216= 44	21+ 128 $=\alpha^{149}$ xor 17= 181							
		$150x^{13}$+	$199x^{12}$+	$109x^{11}$+	$177x^{10}$+	$224x^{9}$+	$44x^{8}$+	$181x^{7}$+	$0x^{6}$+	$0x^{5}$+	$0x^{4}$+	$0x^{3}$+	$0x^{2}$+	$0x^{1}$+	$0x^{0}$
		α^{180}	α^{118}	α^{133}	α^{86}	α^{203}	α^{240}	α^{42}							
$g(x)*(\alpha^{180})*x^{6}$		0+ 180 $=\alpha^{180}$ xor 150= 0	87+ 180 $=\alpha^{12}$ xor 199= 10	229+ 180 $=\alpha^{154}$ xor 109= 84	146+ 180 $=\alpha^{71}$ xor 177= 13	149+ 180 $=\alpha^{74}$ xor 224= 105	238+ 180 $=\alpha^{163}$ xor 44= 79	102+ 180 $=\alpha^{27}$ xor 181= 185	21+ 180 $=\alpha^{201}$ xor 0= 56						
			$10x^{12}$+	$84x^{11}$+	$13x^{10}$+	$105x^{9}$+	$79x^{8}$+	$185x^{7}$+	$56x^{6}$+	$0x^{5}$+	$0x^{4}$+	$0x^{3}$+	$0x^{2}$+	$0x^{1}$+	$0x^{0}$
			α^{51}	α^{143}	α^{104}	α^{58}	α^{136}	α^{80}	α^{201}						
$g(x)*(\alpha^{51})*x^{5}$			0+ 51 $=\alpha^{51}$ xor 10= 0	87+ 51 $=\alpha^{138}$ xor 84= 117	229+ 51 $=\alpha^{25}$ xor 13= 14	146+ 51 $=\alpha^{197}$ xor 105= 228	149+ 51 $=\alpha^{200}$ xor 79= 83	238+ 51 $=\alpha^{34}$ xor 185= 247	102+ 51 $=\alpha^{153}$ xor 56= 170	21+ 51 $=\alpha^{72}$ xor 0= 101					
				$117x^{11}$+	$14x^{10}$+	$228x^{9}$+	$83x^{8}$+	$247x^{7}$+	$170x^{6}$+	$101x^{5}$+	$0x^{4}$+	$0x^{3}$+	$0x^{2}$+	$0x^{1}$+	$0x^{0}$
				α^{21}	α^{199}	α^{156}	α^{206}	α^{232}	α^{151}	α^{72}					
$g(x)*(\alpha^{21})*x^{4}$				0+ 21 $=\alpha^{21}$ xor 117= 0	87+ 21 $=\alpha^{108}$ xor 14= 222	229+ 21 $=\alpha^{250}$ xor 228= 136	146+ 21 $=\alpha^{167}$ xor 83= 45	149+ 21 $=\alpha^{170}$ xor 247= 32	238+ 21 $=\alpha^{4}$ xor 170= 186	102+ 21 $=\alpha^{123}$ xor 101= 160	21+ 21 $=\alpha^{42}$ xor 0= 181				
					$222x^{10}$+	$136x^{9}$+	$45x^{8}$+	$32x^{7}$+	$186x^{6}$+	$160x^{5}$+	$181x^{4}$+	$0x^{3}$+	$0x^{2}$+	$0x^{1}$+	$0x^{0}$
					α^{62}	α^{103}	α^{18}	α^{5}	α^{57}	α^{55}	α^{42}				
$g(x)*(\alpha^{62})*x^{3}$					0+ 62 $=\alpha^{62}$ xor 222= 0	87+ 62 $=\alpha^{149}$ xor 136= 44	229+ 62 $=\alpha^{36}$ xor 45= 8	146+ 62 $=\alpha^{208}$ xor 32= 113	149+ 62 $=\alpha^{211}$ xor 186= 8	238+ 62 $=\alpha^{45}$ xor 160= 97	102+ 62 $=\alpha^{164}$ xor 181= 115	21+ 62 $=\alpha^{83}$ xor 0= 187			
						$44x^{9}$+	$8x^{8}$+	$113x^{7}$+	$8x^{6}$+	$97x^{5}$+	$115x^{4}$+	$187x^{3}$+	$0x^{2}$+	$0x^{1}$+	$0x^{0}$
						α^{240}	α^{3}	α^{94}	α^{3}	α^{66}	α^{159}	α^{83}			
$g(x)*(\alpha^{240})*x^{2}$						0+ 240 $=\alpha^{240}$ xor 44= 0	87+ 240 $=\alpha^{72}$ xor 8= 109	229+ 240 $=\alpha^{214}$ xor 113= 136	146+ 240 $=\alpha^{131}$ xor 8= 84	149+ 240 $=\alpha^{134}$ xor 97= 187	238+ 240 $=\alpha^{223}$ xor 115= 122	102+ 240 $=\alpha^{87}$ xor 187= 196	21+ 240 $=\alpha^{6}$ xor 0= 64		
							$109x^{8}$+	$136x^{7}$+	$84x^{6}$+	$187x^{5}$+	$122x^{4}$+	$196x^{3}$+	$64x^{2}$+	$0x^{1}$+	$0x^{0}$

ภาพที่ 2-9 (ต่อ)

																			$109x^8+$	$136x^7+$	$84x^6+$	$187x^5+$	$122x^4+$	$196x^3+$	$64x^2+$	$0x^1+$	$0x^0$
																			α^{133}	α^{103}	α^{143}	α^{83}	α^{229}	α^{183}	α^{6}		
$g(x)*(\alpha^{133})*x^1$																			0+ 133 $=\alpha^{133}$ xor 109= 0	87+ 133 $=\alpha^{220}$ xor 136= 36	229+ 133 $=\alpha^{107}$ xor 84= 60	146+ 133 $=\alpha^{24}$ xor 187= 52	149+ 133 $=\alpha^{27}$ xor 122= 118	238+ 133 $=\alpha^{116}$ xor 196= 60	102+ 133 $=\alpha^{235}$ xor 64= 171	21+ 133 $=\alpha^{154}$ xor 0= 57	
																				$36x^7+$	$60x^6+$	$52x^5+$	$118x^4+$	$60x^3+$	$171x^2+$	$57x^1+$	$0x^0$
																				α^{225}	α^{77}	α^{106}	α^{121}	α^{77}	α^{178}	α^{154}	
$g(x)*(\alpha^{225})*x^0$																				0+ 225 $=\alpha^{225}$ xor 36= 0	87+ 225 $=\alpha^{57}$ xor 60= 134	229+ 225 $=\alpha^{199}$ xor 52= 58	146+ 225 $=\alpha^{116}$ xor 118= 142	149+ 225 $=\alpha^{119}$ xor 60= 175	238+ 225 $=\alpha^{208}$ xor 171= 250	102+ 225 $=\alpha^{72}$ xor 57= 92	21+ 225 $=\alpha^{246}$ xor 0= 207
																					$134x^6+$	$58x^5+$	$142x^4+$	$175x^3+$	$250x^2+$	$92x^1+$	$207x^0$
																					α^{99}	α^{9}	α^{254}	α^{97}	α^{244}	α^{131}	α^{246}

ภาพที่ 2-9 (ต่อ)

หลังจากคำนวณเสร็จสิ้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์พหนุนามหรือค่า Error Correction Codewords ในเลขฐานสิบ คือ 134 58 142 175 250 92 207 หรือเท่ากับ

“10000110 00111010 10001110 10101111 11111010 01011100 11001111” ในเลขฐานสอง

2.1.11 โครงสร้าง final message ของ QR Code (Structure final message)

จำนวน Codeword ที่คำนวณได้จากในส่วน Data codewords และ Error codewords ต้องเท่ากับ จำนวน Codewords ทั้งหมดที่แสดงในตารางที่ 2-2 และภาคผนวก ก-2

ขั้นตอนต่อไปนี้จะต้องปฏิบัติตามเพื่อวางข้อมูลส่วน Data และ Error Correction กับส่วน Remainder Codeword ถ้ามีความจำเป็น

ก. ทำการแบ่ง Data Codewords ออกเป็น N Block ตามที่กำหนดไว้ในภาคผนวก ก-2 ตามเวอร์ชั่น (Version) และ Error Correction Level

ข. สำหรับแต่ละ Data Block ให้คำนวณ Error correction codewords ที่สัมพันธ์กัน ดังในหัวข้อ 2.1.10 และตาราง A.1 ใน International standard ISO/IEC18004.

ค. รวบรวมส่วน Data และ Error Correction Codewords แต่ละ Block จากในตัวอย่าง ถ้ามี 4 Block จะเป็นดังนี้ data block 1, codeword 1; data block 2, codeword 1; ... ; data block 4, codeword 1; data block 1, codeword 2; ... จนถึง data block 3, codeword สุดท้าย; data block 4, codeword สุดท้าย; และ ต่อมาจะเป็น error correction block 1, codeword 1, error correction block 2, codeword 1, ... จนถึง error correction block 4, codeword สุดท้าย โดยใน QR Code บางเวอร์ชั่นเมื่อเติม Data codeword และ Error codeword จะไม่ครบ 8 bit ซึ่งจะต้องการ Remainder Bits จำนวน 3 bit, 4 bit หรือ 7 bit เพื่อทำให้ส่วน Enccoding Region ครบสมบูรณ์

เมื่อยกตัวอย่าง QR Code เวอร์ชั่น 5-H จะประกอบด้วย Data และ Error Correction อย่างละ 4 blocks โดย 2 blocks แรกประกอบด้วย 11 data และ 22 error correction codeword ตามลำดับและในส่วน block 3 และ block 4 ประกอบด้วย 12 data และ 22 error correction codeword ตามลำดับ ซึ่งแสดงดังภาพ 2-10 โดย D_n จะแทนด้วย block

ของ Data Codewords และ E_n จะแทนด้วย block ของ Error Correction Codewords โดยลำดับของ Codeword ที่วางจะเรียงจากบนลงล่างในแต่ละหลัก

	Data codewords					Error correction codewords			
Block 1	D_1	D_2	.....	D_{11}		E_1	E_2	.....	E_{22}
Block 2	D_{12}	D_{13}	.....	D_{22}		E_{23}	E_{24}	.....	E_{44}
Block 3	D_{23}	D_{24}	.....	D_{33}	D_{34}	E_{45}	E_{46}	.....	E_{66}
Block 4	D_{35}	D_{36}	.....	D_{45}	D_{46}	E_{67}	E_{68}	.....	E_{88}

ภาพที่ 2-10 โครงสร้างส่วน final message codeword

ดังนั้นการเรียง Codeword ในเวอร์ชั่น 5-H จะเรียงในมีลักษณะ $D_1, D_{12}, D_{23}, D_{35}, D_2, D_{13}, D_{24}, D_{36}, \ldots D_{11}, D_{22}, D_{33}, D_{45}, D_{34}, D_{46}, E_1, E_{23}, E_{45}, E_{67}, E_2, E_{24}, E_{46}, E_{68}, \ldots E_{22}, E_{44}, E_{66}, E_{88}$

เมื่อได้ Bitstream ของส่วน Data Codewords จากหัวข้อ 2.1.9 และส่วน Error Codewords จากหัวข้อ 2.1.10 ตัวอย่างสาธิต QR Code เวอร์ชั่น 1 ที่ Error Correction Level L จะประกอบด้วย Data และ Error Correction อย่างละ 1 blocks และมี Codewords ทั้งหมด 26 ประกอบด้วย 19 data codeword และ 7 error correction codeword ตามลำดับ ดังนี้

"00100000 00110010 00101101 00111011 00110001 00111100 00000000 00110011 00110011 11001100 11001100 11101100 00010001 00110011 00110011 11101100 00010001 11101100 0001000110000110 00111010 10001110 10101111 11111010 01011100 11001111"

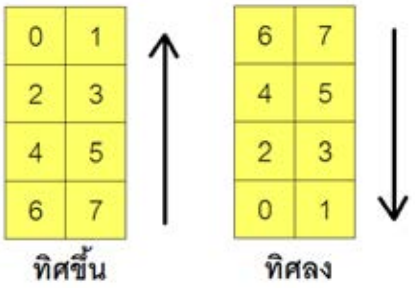
2.1.12 การวาง Codeword ในเมตริก (Codeword placement in matrix)

การวาง Codeword ในเมตริกจะมี 2 ลักษณะ คือ การวางแบบปกติ (regular) และแบบไม่ปกติ (irregular) ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งเมื่อเทียบกับสัญลักษณ์อื่นและ Function Patterns ส่วนมาก Codewords จะมีขนาด 2 x 4 โมดูล มีสองทางสำหรับ Codeword นี้ คือ แนวตั้ง (กว้าง 2 โมดูล และ สูง 4 โมดูล) และในแนวนอน (กว้าง 4 โมดูลและสูง 2 โมดูล) ในการวางที่ผิดปกติจะเป็นการวางเพื่อเป็นการเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งตำแหน่งในการวางจะขึ้นอยู่กับ Alignment Patterns หรือ Function Patterns อื่นๆ ดังภาพที่ 2.10 ภาพที่ 2.11 และภาพที่ 2.12 โดยการตำแหน่งการ

วางจะเริ่มจากมุมล่างขวาจะวางต่อกันขึ้นไปโดยสลับขวาไปซ้าย โดยการกำหนดทิศทางมีหลักการต่อไปนี้

ก. ลำดับการวางบิต (Bit) ในหลักการจะวางจากขวาไปซ้าย ทิศทางขึ้นไปหรือทิศทางลงตามทิศทางในการวาง

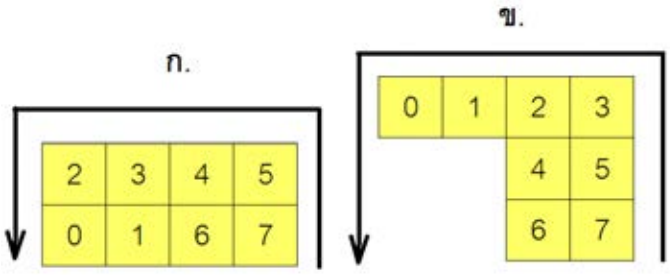
ข. Significant Bit (Bit 7) ของในแต่ละ Codeword จะเป็นการวางตำแหน่งแรก บิตที่ตามมาจะถูกวางในตำแหน่งถัดไป Significant Bit จะอยู่ตำแหน่งขวาล่างในทิศทางขึ้นและตำแหน่งขวาบนเมื่อทิศทางลงดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 การวางบิตในรูปแบบปกติในทิศทางขึ้นและทิศทางลง

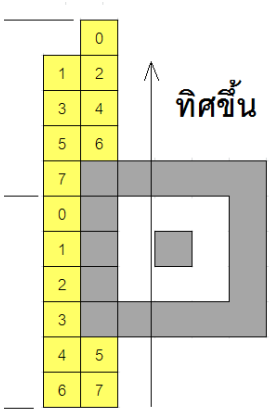
ค. เมื่อพบขอบแนวนอนของ Alignment Pattern หรือ Timing Pattern ให้ทำการวางบิตให้อยู่เหนือหรือใต้ของ Pattern ทั้งสองโดยให้รหัสต่อเนื่องกัน

ง. เมื่อวางบิตถึงขอบบนหรือขอบล่างของสัญลักษณ์ (เช่น ขอบของ QR Code) Format Information Version Information หรือ Separetor) ให้วางบิตที่เหลือไปทางซ้ายและทำการกลับทิศทาง ดังภาพที่ 2-12



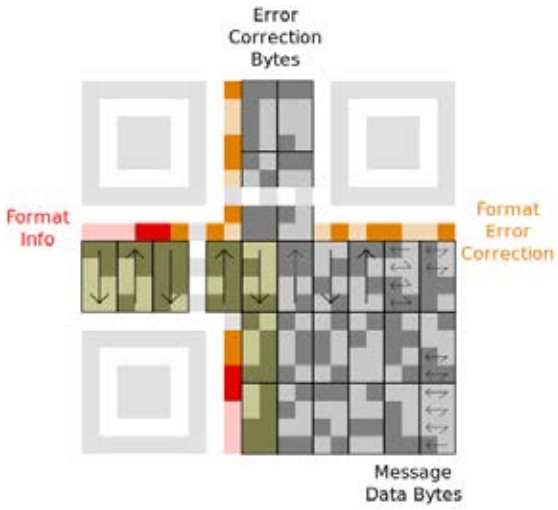
ภาพที่ 2-12 ตัวอย่างการวางบิต ก.การวางแบบปกติและ
ข.การการแบบผิดปกติเมื่อทิศทางในการวางเปลี่ยนทิศทาง

จ. เมื่อโมดูลทางขวามือพบ Alignment Pattern หรือพื้นที่ Version Information บิตจะถูกวางแบบไม่ปกติ โดยจะทำการขยายคอลัมล์ที่หลักที่ติดอยู่กับ Alignment Pattern หรือ Version Information ถ้า Codeword สิ้นสุดก่อนจะวางคอลัมน์ถัดไป ให้วาง Significant Bit ของ Codeword ต่อไปในตำแหน่ง 1 คอลัมน์ดังภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 ตัวอย่างการวางบิตที่ติดกับ Alignment Pattern

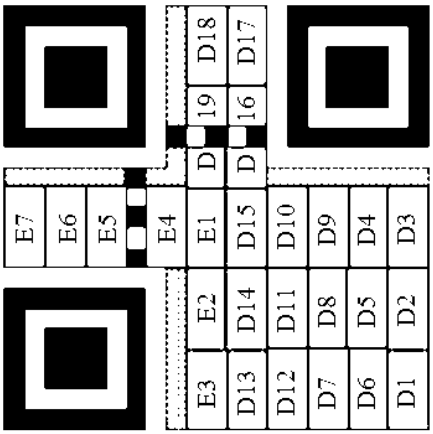
โดยใน QR Code เวอร์ชั่น 1 Codewords จะเป็นการเรียงโมดูลเป็นแบบปกติขนาด 2 x 4 โมดูล โดยในการวาง Bitstream จะแบ่งวางทีละชุดชุดละ 8 บิต ลงใน Codeword แต่ละชุดซึ่งบิต 1 จะแทนด้วยโมดูลสีดำและบิต 0 จะแทนด้วยโมดูลสีขาว



ภาพที่ 2-14 แสดงลำดับการวาง Bitstream บน QR Code เวอร์ชั่น 1

ภาพที่ 2-14 แสดงการวาง Message Data Bytes หรือ Bitstream โดยหลักการวาง Bitstream นั้นจะเริ่มการวางบิตแรกจากมุมขวาล่างใน QR Code โดยรูปแบบการวางบิตลงบน Codeword นั้นจะมี 2 รูปแบบ คือ รูปแบบวางบิตขึ้นไปข้างบน (Upwards) และรูปแบบการวางบิตลงมาด้านล่าง (Downwards)

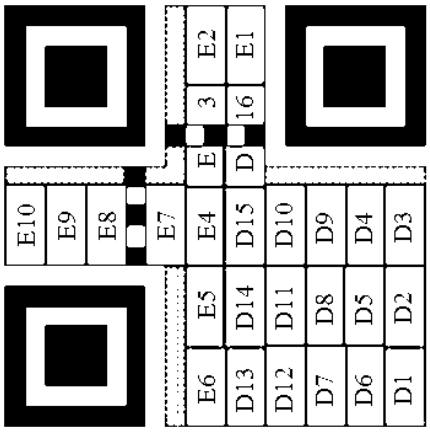
โดยหลักวาง Codeword ลงในโครงสร้างของ QR Code เวอร์ชั่น 1 ที่ Error Correction Level L, M, Q และ H จะมีลักษณะดังภาพที่ 2-15 ถึง ภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-15 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 1-L

D1 - D15 Data Block 1

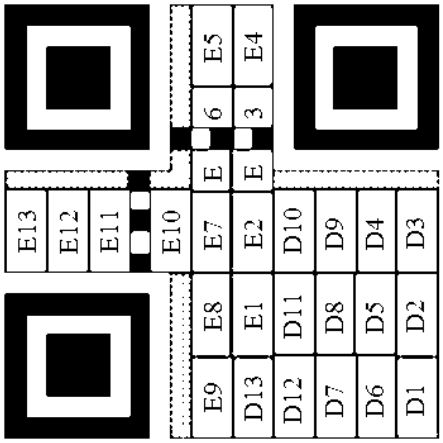
E1 – E7 EC Block 1



ภาพที่ 2-16 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 1-M

D1 - D16 Data Block 1

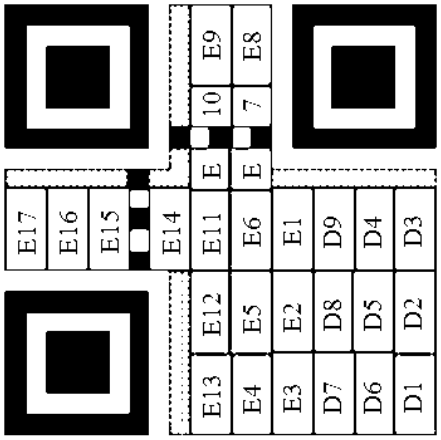
E1 – E10 EC Block 1



ภาพที่ 2-17 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 1-Q

D1 - D13 Data Block 1

E1 – E13 EC Block 1

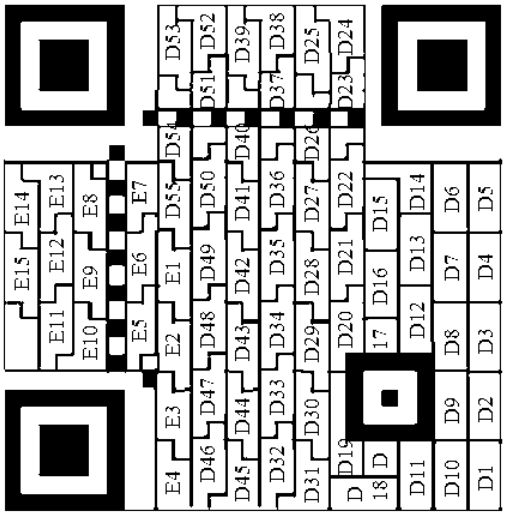


ภาพที่ 2-18 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 1-H

D1 – D9 Data Block 1

E1 – E17 EC Block 1

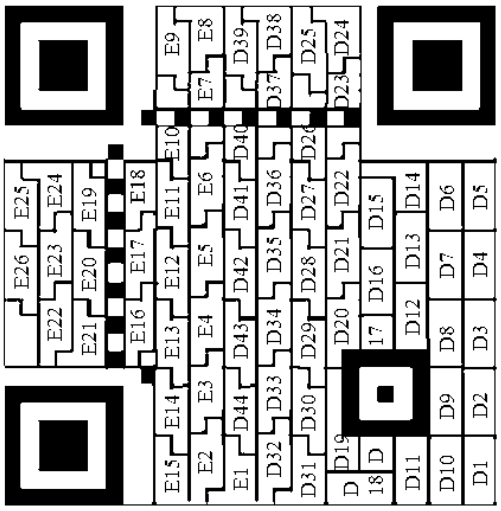
เมื่อวาง Codeword ลงในโครงสร้างของ QR Code เวอร์ชั่น 3 ที่ Error Correction Level L, M, Q และ H จะมีลักษณะดังภาพที่ 2-19 ถึง ภาพที่ 2-22



ภาพที่ 2-19 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 3-L

D1 – D55 Data Block 1

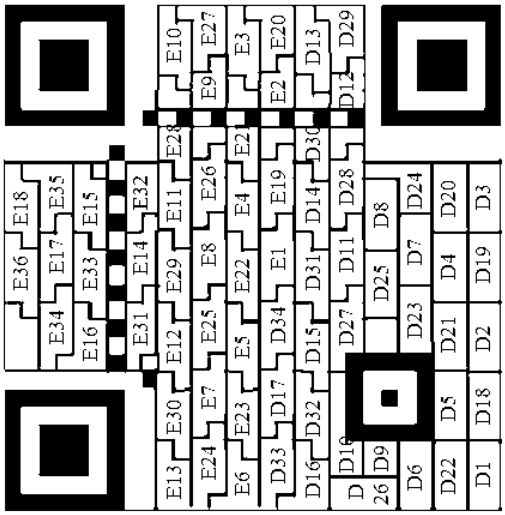
E1 – E15 EC Block 1



ภาพที่ 2-20 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 3-M

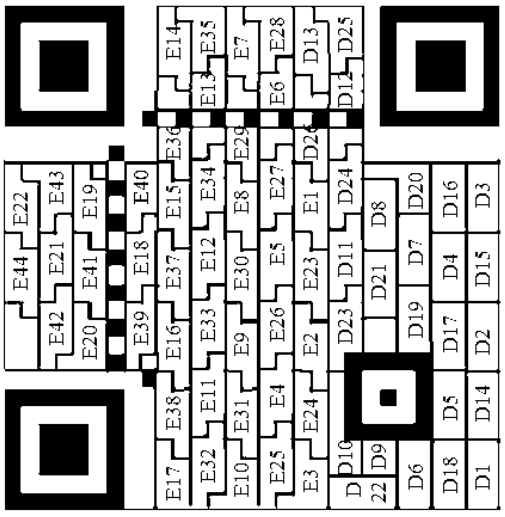
D1 – D44 Data Block 1

E1 – E26 EC Block 1



ภาพที่ 2-21 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 3-Q

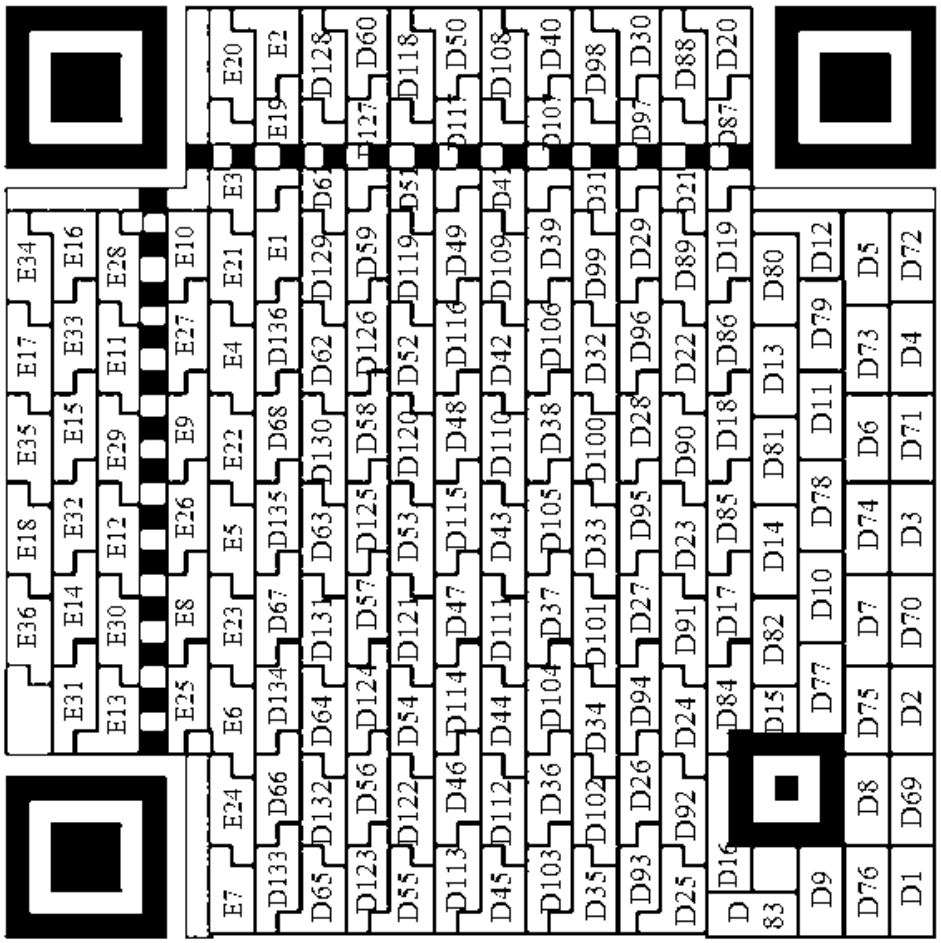
D1 – D17	Data Block 1
D18 – D34	Data Block 2
E1 – E18	EC Block 1
E19 – E36	EC Block 2



ภาพที่ 2-22 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 3-H

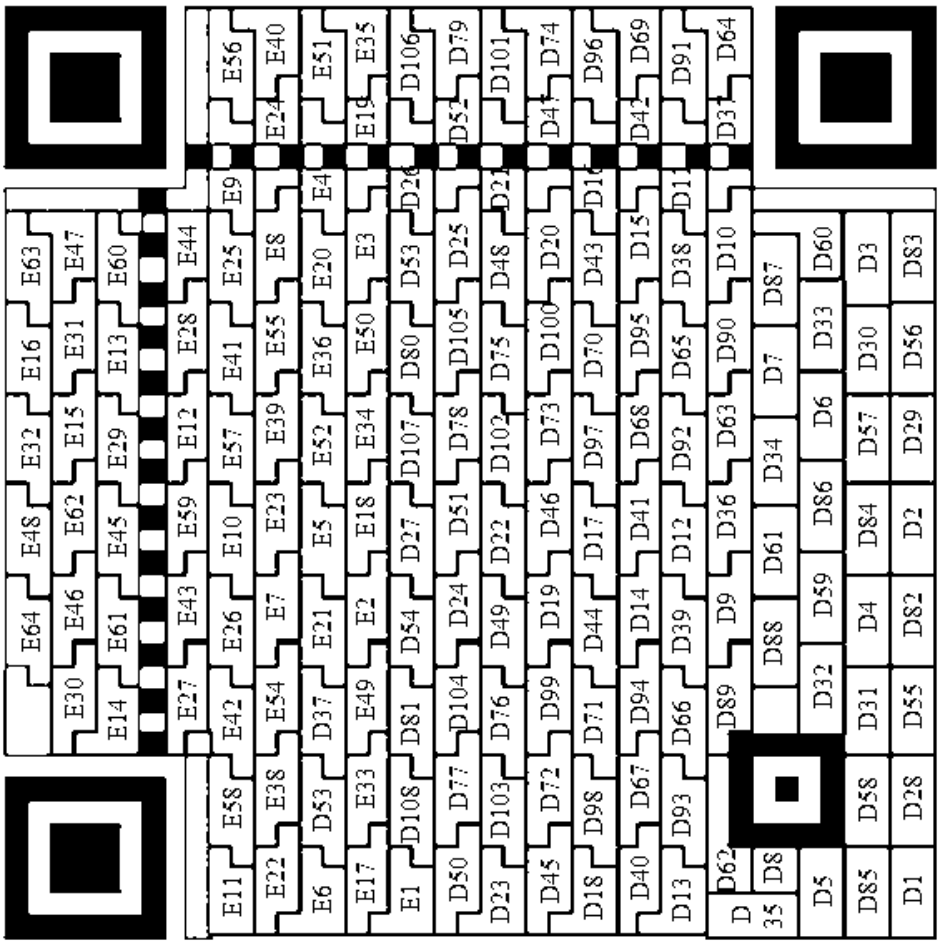
D1 – D13	Data Block 1
D14 – D26	Data Block 2
E1 – E22	EC Block 1
E23 – E44	EC Block 2

เมื่อวาง Codeword ลงในโครงสร้างของ QR Code เวอร์ชั่น 6 ที่ Error Correction Level L, M, Q และ H จะมีลักษณะดังภาพที่ 2-23 ถึง ภาพที่ 2-26



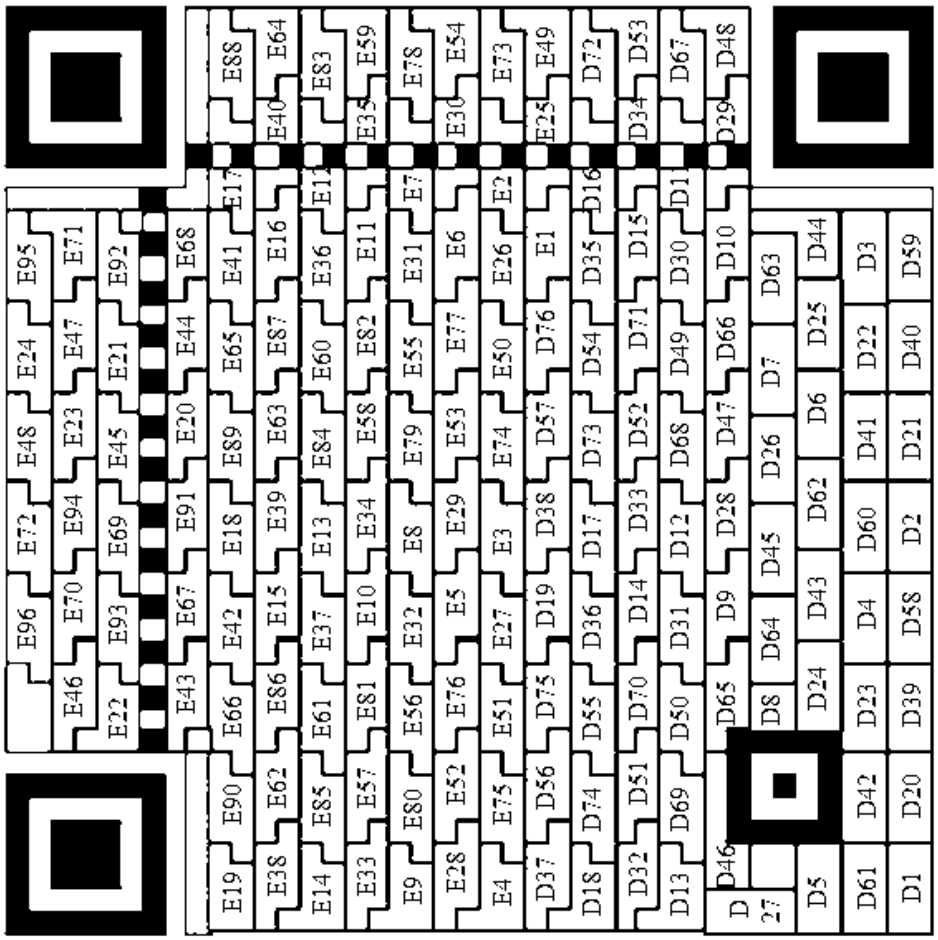
ภาพที่ 2-23 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 6-L

D1 – D68	Data Block 1
D69 – D136	Data Block 2
E1 – E18	EC Block 1
E19 – E36	EC Block 2



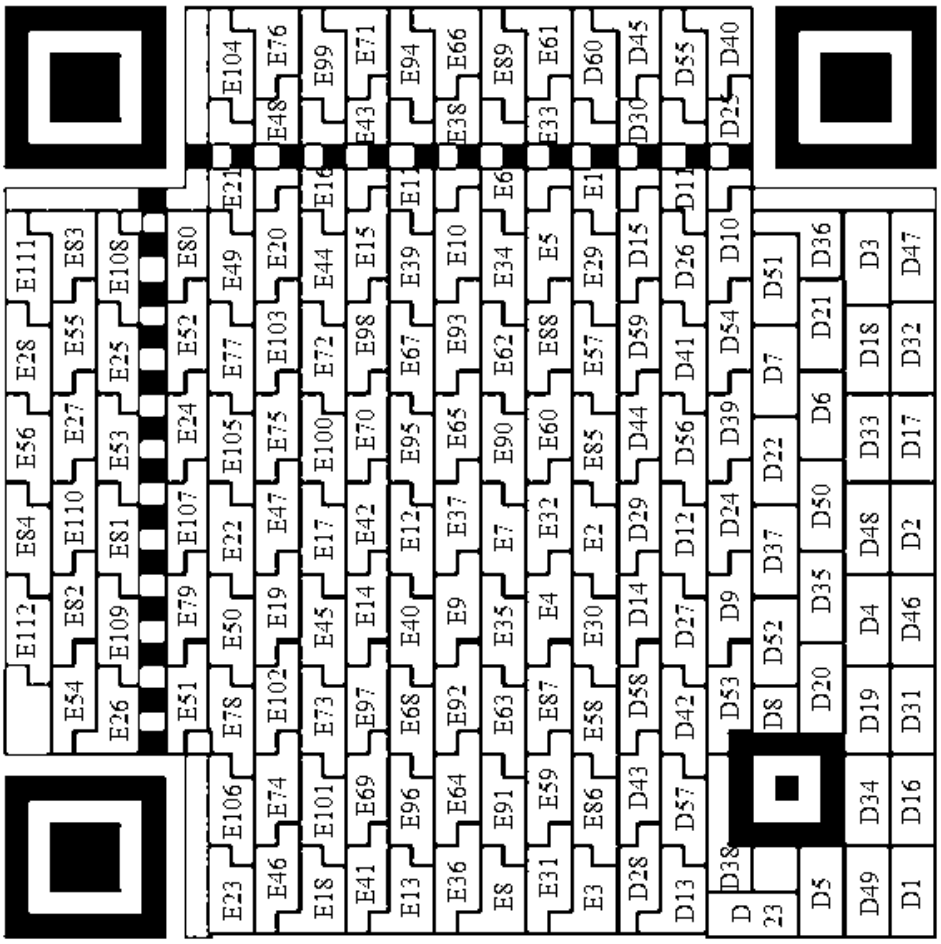
ภาพที่ 2-24 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 6-M

D1 – D27	Data Block 1
D28 – D54	Data Block 2
D55 – D81	Data Block 3
D82 – D108	Data Block 4
E1 – E16	EC Block 1
E17 – E32	EC Block 2
E33 – E48	EC Block 3
E49 – E64	EC Block 4



ภาพที่ 2-25 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 6-Q

D1 – D19	Data Block 1
D20 – D38	Data Block 2
D39 – D57	Data Block 3
D58 – D76	Data Block 4
E1 – E24	EC Block 1
E25 – E48	EC Block 2
E49 – E72	EC Block 3
E73 – E96	EC Block 4



ภาพที่ 2-26 การเรียง Codewords ใน QR Code เวอร์ชั่น 6-H

D1 – D15	Data Block 1
D16 – D30	Data Block 2
D31 – D45	Data Block 3
D46 – D60	Data Block 4
E1 – E28	EC Block 1
E29 – E56	EC Block 2
E57 – E84	EC Block 3
E85 – E112	EC Block 4

2.1.13 ขั้นตอนการ Masking ใน QR Code

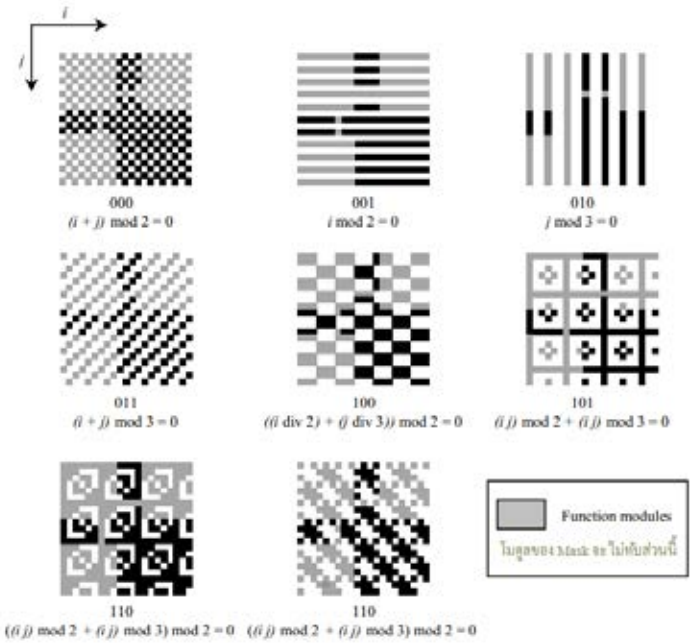
หลังจากที่ทำการลง Binary String ลงบน QR Code ต้องมีการ Mask ใน QR Code โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกระจายโมดูล ขาว ดำ ของ QR Code โดยการ Masking นั้นจะมี Mask ทั้งหมด 8 รูปแบบด้วยกันโดยจะต้องเลือกรูปแบบที่ดีที่สุด ซึ่งจะขึ้นตามเงื่อนไขของรูปแบบ Mask ตามตารางที่ **2-5** ดังนี้

ตารางที่ 2-5 รูปแบบ Mask

อ้างอิงรูปแบบ Mask	เงื่อนไข
000	(i + j) mod 2 = 0
001	i mod 2 = 0
010	j mod 3 = 0
011	(i + j)mod 3=0
100	((i div 2) + (j div 3)) mod 2 = 0
101	(i * j) mod 2 + (i * j) mod 3 = 0
110	((i * j) mod 2 + (i * j) mod 3) mod 2 = 0
111	((i * j) mod 3 + (i * j) mod 2) mod 2 = 0

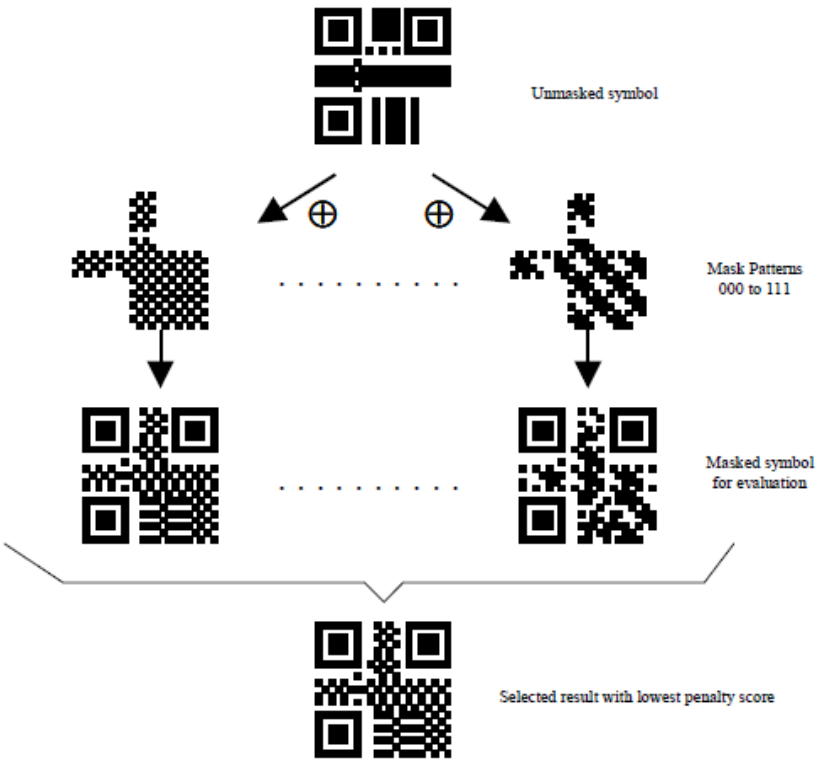
*i , j คือ ตำแหน่งที่อ้างอิงของโมดูลใน QR Code ถ้าโมดูลที่ตำแหน่ง i , j เป็นไปตามเงื่อนไขข้างต้น โมดูลที่ตำแหน่งนั้นจะสลับสีภายในโมดูล

จากตารางที่ 2-5 ทำให้สามารถหา Mask ของ QR Code เวอร์ชั่น 1 ใน QR Code ได้ดังภาพที่ 2-27 ดังนี้



ภาพที่ 2-27 รูปแบบ Masking ใน QR Code เวอร์ชั่น 1

โดยขั้นตอน Masking นั้นยังสามารถใช้ Mask ที่มา XOR กับบิตที่วางในโครงสร้าง QR Code ไว้แล้วในหัวข้อ 2.1.10 ซึ่งจะไม่ทำการ Mask ที่บริเวณ Function Patterns ดังแสดงในภาพที่ 2-28



ภาพที่ 2-28 แสดงขั้นตอนการ Mask

เมื่อทำการ Mark กับทั้ง 8 รูปแบบแล้ว ต้องทำตามเงื่อนไขในตารางที่ **2-6** ด้านล่าง เพื่อเลือกคะแนนที่น้อยที่สุด

ตัวแปร N1 - N4 เป็นตัวแทนของค่าการถ่วงน้ำหนักโทษของคะแนน (N1 = 3, N2 = 3, N3 = 40, N4 = 10)

ตารางที่ 2-6 ตารางการให้คะแนนในการเลือกรูปแบบ Mask

รูปแบบ	เงื่อนไข	คะแนนต่อจุด
โมดูลที่อยู่ติดกันแถวหรือคอลัมน์ที่มีสีเดียวกัน	ติดกันมากกว่า 5 โมดูลขึ้นไปจำนวนของโมดูล = (5 + i)	N1 + i
บล็อกของโมดูลสีเดียวกัน	บล็อกขนาด m x n	N2 x (m – 1) x (n -1)
อัตราส่วน 1 : 1 : 3 : 1 : 1 (ดำ, ขาว, ดำ, ขาว, ดำ) ในหลักหรือแถว		N3
สัดส่วนของโมดูลมืดในโมดูลทั้งหมด	50 ± (5 x k)% ถึง 50 ± (5 x (k + 1))%	N4 x k

2.1.14 การเข้ารหัสในส่วน Format Information

Format Information ประกอบด้วยข้อมูล 15 บิต ที่เรียงต่อกัน 5 บิตเป็น Data bit และ 10 บิตเป็น Error Correction โดยใช้ (5,15) BCH Code ในการเข้ารหัสในส่วน Format Information โดยจะอ้างอิงจากภาคผนวก C ใน International standard ISO/IEC 18004 โดยข้อมูล 2 บิตแรกจะเป็นข้อมูลของ Error Correction Level ดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 ตารางตัวชี้วัด Error Correction Level สำหรับ QR Code

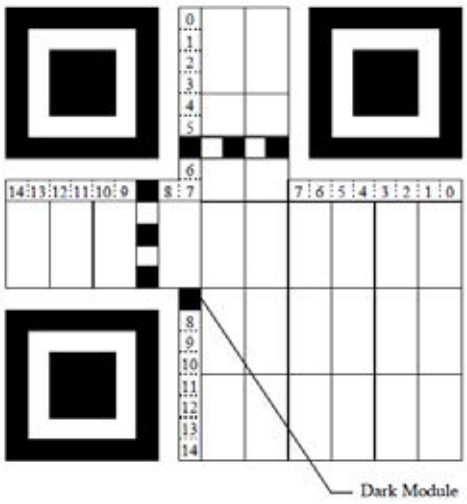
Error Correction Level	Binary indicator
L	01
M	00
Q	11
H	10

ข้อมูลบิตที่ 3 ถึงบิตที่ 5 ของ Format Information จะเป็นข้อมูล Mask Pattern ตามตารางที่ 2-6 ส่วน 10 บิตที่เหลือได้จากการคำนวณ Error Correction แล้วนำมารวมกับ 5 บิตแรก เมื่อได้ข้อมูลครบทั้ง 15 บิตแล้วให้ทำการ XOR กับ Mask Pattern 101010000010010

จากตัวอย่าง

สมมุติ Error Correction Level M:	00
รูปแบบ Data mask pattern:	101
ข้อมูล (Data):	00101
BCD bits:	0011011100
ลำดับบิตที่ยังไม่ผ่านการ Mask:	001010011011100
Mask pattern สำหรับ XOR:	101010000010010
รูปแบบ Format Information:	100000011001110

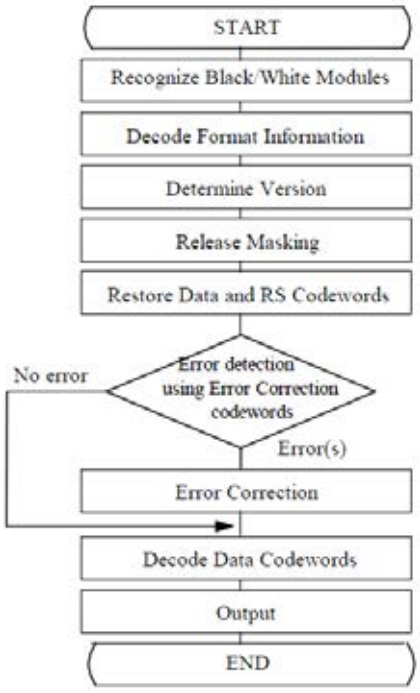
จาก Format Information ที่ได้จากด้านบนจะสามารถนำไปวางใน QR Code ตามลำดับบิตดังในภาพที่ 2-29 โดยในการวางจะทำการวาง 2 ชุด โดยบิตที่น้อยที่สุดจะวางที่ตำแหน่ง 0 และบิตที่มากที่สุดจะวางตำแหน่งบิตที่ 14 โดย Dark Module ที่ตำแหน่ง (4V + 9, 8) โดย V แสดงเวอร์ชั่นของ QR Code จะไม่มีส่วนเกี่ยวข้องในการเข้ารหัส



ภาพที่ 2-29 ตำแหน่ง Format Information

โดยรูปแบบ Format Information ทั้งหมดจะแสดงในภาคผนวก C

2.1.15 **การถอดรหัส** QR Code (Decoding procedure)



ภาพที่ 2-30 ลำดับขั้นตอนในการถอดรหัสใน QR Code

ขั้นตอนการถอดรหัสการอ่าน QR Code ทำได้โดยย้อนกลับจากการเข้ารหัส ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

ก. หาตำแหน่งของภาพและทำให้โมดูลเรียนรู้แสงสว่างและมืดแล้วทำการแปลงเป็นอาร์เรย์บิต "0" และ บิต "1"

ข. อ่าน Format Information (ในส่วนของประเภท Masking Pattern และระดับ Error Correction)

ค. อ่านข้อมูลเวอร์ชั่นของ QR Code

ง. ทำการถอด Masking โดยใช้ โอเปอเรเตอร์ XOR

จ. อ่านตำแหน่งในรูปแบบการวางโมดูลตามหลักเกณฑ์

ฉ. หากพบข้อผิดพลาดใช้ Error Correction Codewords ที่สอดคล้องกับระดับใดๆ

ช. แบ่ง Codewords ข้อมูลออกเป็นส่วนๆ ตามตัวชี้วัดและโหมดนับจำนวนตัวอักษร

ซ. สุดท้ายจะสามารถถอดรหัสตัวอักษรข้อมูลตามโหมดในการใช้งานและส่งผลออกมา

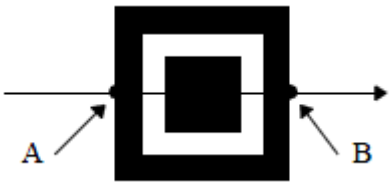
2.1.16 การอ้างอิงอัลกอริทึม (Algorithm) การถอดรหัสของ QR Code

ในการอ้างอิงอัลกอริทึมในการถอดรหัส QR Code จะหาสัญลักษณ์ใน QR Code และทำการถอดรหัสโดยทำการอ้างอิงจากรูปมืด (Dark) และสว่าง (Light) ใน QR Code

ก. พิจารณา Global Threshold ใน QR Code ที่ต้องการถอดรหัส โดยหาค่ากลางจากค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด แล้วทำการแปลงเป็นพิกเซลเป็น สว่าง (Light) และมืด (Dark) โดยใช้เกณฑ์ Global Threshold

ข. ทำการค้นหาส่วน Finder Pattern ซึ่งประกอบด้วย Finder Pattern ที่ตำแหน่ง 3 ตำแหน่งสำหรับการหามุมทั้ง 4 ของ QR Code โดย Finder Pattern พื้นที่ของแต่ละส่วนจะมีอัตราส่วน 1 : 1 : 3 : 1 : 1 โดยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.5 (เช่น ช่วง 0, 5 - 1, 5 สำหรับ Single Module Box และ 2, 5 - 3, 5 สำหรับ Three Module Box)

1) เมื่อพบตำแหน่งที่สนใจในจุดแรก (A) และจุดสุดท้าย (B) ที่ขอบภายนอกของ Finder Pattern ดังภาพที่ 2-31 จากในแกน X เราสามารถหาจุดศูนย์ได้จากการลากเส้นผ่านจากจุดทั้งสอง



ภาพที่ 2-31 การ Scan line ใน Finder Pattern

2) ทำซ้ำในขั้นตอน 1) โดยแต่จะพิจารณาแกน Y

3) ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของ Pattern เกิดจากการลากเส้นจากจุด A และ B ทั้งแกน X และแกน Y ตัดกัน

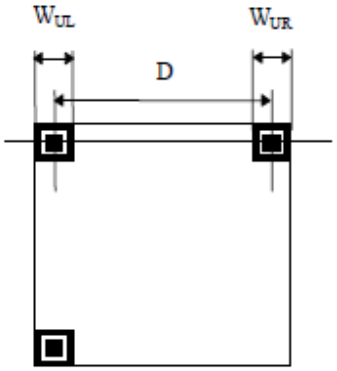
4) ทำซ้ำขั้นตอน 1) – 3) สำหรับ Finder Pattern ใน 2 ตำแหน่ง ที่เหลือ

5) ถ้าไม่มีพื้นที่ที่สนใจ ให้กลับไปทำการแปลงพิกเซลเป็น สว่าง (Light) และมืด (Dark) ใหม่ก่อนทำขั้นตอน ข

6) ถ้าพบ Finder Pattern เพียง 1 ตำแหน่งอีก 2 ตำแหน่งค้นหาไม่พบ ขั้นตอนจะเปลี่ยนอ้างอิงการถอดรหัสของ Micro QR Code

ค. กำหนดตำแหน่งในการหมุนของสัญลักษณ์ โดยทำการวิเคราะห์จุดศูนย์กลางของคู่ Finder Pattern เพื่อหา Finder Pattern ในตำแหน่งมุมซ้ายบนและหามุมในการหมุนของสัญลักษณ์

ง. ทำการกำหนด 1) D ระยะระหว่างศูนย์กลางของ Finder Pattern มุมบนซ้ายและศูนย์กลางของ Finder Pattern มุมบนขวาและ 2) ความกว้างของ Pattern W_{UL} และ W_{UR} ดังแสดงในภาพที่ 2-32



ภาพที่ 2-32 Finder Pattern ด้านบน

จ. ทำการคำนวณ Nominal X dimension ของ QR Code จากสมการ 2.4

$$X = (Wul + Wur) / 14) \quad (2.6)$$

ฉ. ทำการกำหนดเวอร์ชั่น (V) ของ QR Code จากสมการ 2.5

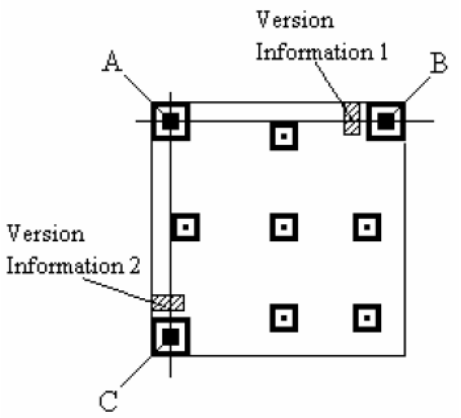
$$V = [(D / X) - 10)] / 4) \quad (2.7)$$

ช. ถ้าค่าเวอร์ชั่นของ QR Code เป็น 6 หรือน้อยกว่าให้กำหนดเป็นเวอร์ชั่นของ QR Code แต่ถ้าค่าเวอร์ชั่น เป็น 7 หรือมากกว่า ให้ทำถอดรหัสส่วนของ Version Information ตามขั้นตอนดังนี้

1) หาขนาดของโมดูลด้วยการหารความกว้าง W_{UR} ด้วย 7 จากสมการ 2.6

$$CP_{UR} = W_{UR} / 7 \quad (2.8)$$

2) ทำการหาเส้น Guide Line ของ AC จากจุด A, C และ AB จากจุด A, B โดยแต่ละเส้นจะผ่านกึ่งกลางของ Finder Pattern ทั้ง 3 ตำแหน่ง ดังภาพที่ 2-33 ซึ่ง Sampling Grid ที่ผ่านจุดศูนย์กลางของ Module ในพื้นที่ Version Information 1 สามารถคำนวณได้จากเส้นที่ขนานกับ Guide Line และขนาดของโมดูล CP_{UR} ซึ่งค่าไบนารี “0” และ “1” สามารถกำหนดได้จากโมดูลสว่าง (Light) หรือโมดูลมืด (Dark) บน Sampling Grid



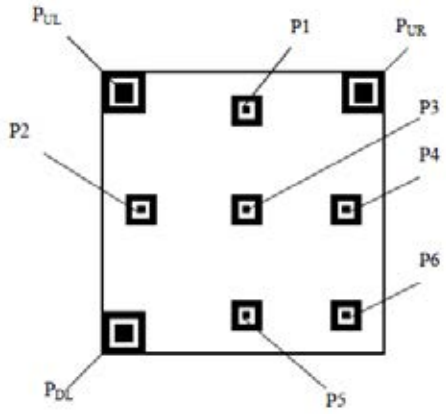
ภาพที่ 2-33 Finder Pattern และ Version Information

3) ทำการหาเวอร์ชั่น โดยการตรวจหา Error Correcting ตามในภาคผนวก D.2 ใน International standard ISO/IEC 18004

4) ถ้าหากค่า Error มากกว่า Error correction ที่มีการตรวจพบ ให้ทำการคำนวณความกว้างที่ Finder Pattern ที่อยู่มุมล่างซ้าย โดยทำขั้นตอนเหมือนกับขั้นตอน ก. ข. และ ค. เพื่อถอดรหัส Version Information 2

ซ. ใน QR Code เวอร์ชั่น 1 ให้กำหนดค่า X เป็นค่าประมาณช่องว่างจุดศูนย์กลางโมดูลมืดและโมดูลสว่างของ Timing Pattern ทางด้านบนและกำหนดค่า Y เป็นค่าประมาณ

ระหว่างจุดศูนย์กลางโมดูลมืดและโมดูลสว่างของ Timing Pattern ทางด้านซ้าย ทำการสร้าง Sampling Grid ให้ลากผ่านแนวนอนของ Timing Pattern ด้านบน แล้วทำการลากเส้นขนานในตำแหน่งช่องว่างจุดศูนย์กลางในแนวแกนตั้ง Y ซึ่งมี 6 เส้นและทำการลากเส้นผ่าน Timing Pattern ทางด้านซ้าย แล้วทำการลากเส้นขนานในตำแหน่งช่องว่างจุดศูนย์กลางในแนวแกนนอน X ซึ่งมี 6 เส้นจากการอ้างอิงในแนวตั้ง ซึ่งจะถูกกำหนดไว้ในแต่ละเวอร์ชั่นของ QR Code สำหรับในเวอร์ชั่นที่มากกว่าเวอร์ชั่น 1 ให้กำหนดกึ่งกลางของแต่ละ Alignment Pattern จากที่กำหนดไว้ใน ภาคผนวก E ใน International standard ISO/IEC 18004 และสร้าง Sampling Grid ด้วยระยะห่างที่เท่ากันระหว่างจุด ดังแสดงในภาพที่ 2-34 ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



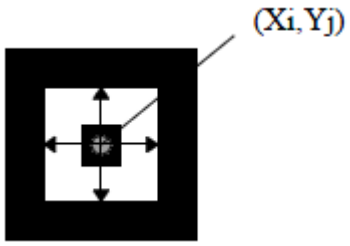
ภาพที่ 2-34 Finder Pattern และ Alignment Patterns

1) ทำการหาขนาดของโมดูล CP_{UL} โดยคำนวณจากความกว้าง Pattern ของ W_{UL} ของ Finder Pattern ทางซ้ายบน (P_{UL}) หารด้วย 7 ดังสมการ 2.9

$$CP_{UL} = W_{UL} / 7 \tag{2.9}$$

2) ทำการกำหนด Alignment Patterns P1 และ P2 ดังภาพที่ 2-32 ซึ่งจะขึ้นอยู่กับจุดศูนย์กลาง A ของ Finder Pattern มุมซ้ายบน (P_{UL}) เส้นที่ขนาดกับ AB และ AC รวมถึงขนาดของโมดูล CP_{UL}

3) ทำการค้นหาขอบนอกของสี่เหลี่ยมสีขาวของ Alignment Pattern P1 และ Alignment Patterns P2 โดยเริ่มจากพิกเซลจุดศูนย์กลาง X_i และ Y_i ดังภาพที่ 2-35



ภาพที่ 2-35 จุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern

4) ทำการประมาณจุดศูนย์กลาง Alignment Pattern ของจุด P3 โดยจะขึ้นอยู่กับศูนย์กลางของ Finder Pattern มุมซ้ายบน (P_{UL}) และจุดศูนย์กลางของ Alignment Patterns P1 และ Alignment Patterns P2 จากขั้นตอนที่ 3)

5) ทำการหาพิกัดของ Alignment Patterns P3 ตามขั้นตอนที่ 3

6) ทำการหา L_X ระยะทางจากกึ่งกลางระหว่าง Alignment Pattern P2 และ Alignment Pattern P3 และทำการหา L_Y ระยะทางจากกึ่งกลางระหว่าง Alignment Pattern P1 และ Alignment Pattern P3 ต่อมาทำการแบ่ง L_X กับ L_Y เพื่อหา CP_X และ CP_Y ของพื้นที่บนซ้ายใน QR Code ดังแสดงในภาพ 2-36 ได้ดังนี้

$$CP_X = L_X / AP \tag{2.10}$$

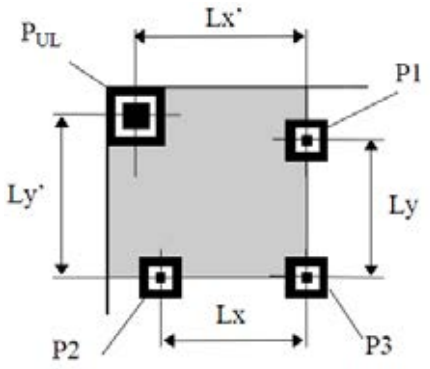
$$CP_Y = L_Y / AP \tag{2.11}$$

AP คือ ที่ว่างของ Module ระหว่างจุดศูนย์กลางของ Alignment pattern (สามารถดูได้ที่ตารางภาคผนวก E.1 ใน International standard ISO/IEC 18004)

ในทำนองเดียวกันจะสามารถหา L_X, ซึ่งเป็ระยะห่างในแกนนอนระหว่างจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern มุมซ้ายบน (P_{UL}) และจุดศูนย์กลางของ Alignment pattern P1 และ L_Y, ซึ่งเป็ระยะห่างในแกนตั้งระหว่างจุดศูนย์กลางของ Finder Pattern มุมซ้ายบน (P_{UL}) และจุดศูนย์กลางของ Alignment pattern P2 โดยจะสามารถแบ่ง L_X, และ L_Y, เพื่อหา CP_X, และ CP_Y, ของพื้นที่บนซ้ายใน QR Code ดังสมการดังนี้

$CP_{X'} = L_{X'}$ / คอลัมน์ของจุดศูนย์กลางใน Alignment Pattern P1 - คอลัมน์ของจุดศูนย์กลางใน Finder Pattern (P_{UL}) (2.10)

$CP_{Y'} = L_{Y'}$ / คอลัมน์ของจุดศูนย์กลางใน Alignment Pattern P2 - คอลัมน์ของจุดศูนย์กลางใน Finder Pattern (P_{UL}) (2.11)

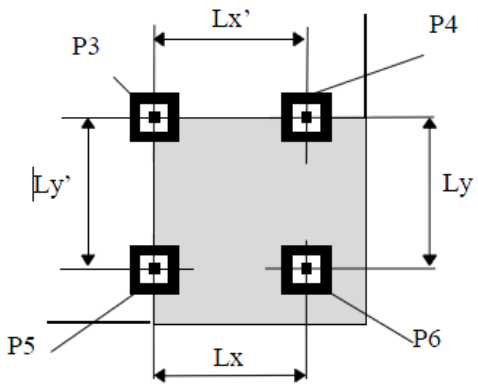


ภาพที่ 2-36 พื้นที่ซ้ายบนของ QR Code

7) ทำการกำหนด Sampling grid ให้ครอบคลุมพื้นที่ซ้ายบนของ QR Code โดยให้ขึ้นอยู่กับขนาดโมดูลที่คำนวณได้จาก CP_X $CP_{X'}$, CP_Y และ $CP_{Y'}$,

8) ในทำนองเดียวกันกำหนด Sampling grid สำหรับพื้นที่ขวาบนของ QR Code (ครอบคลุมถึง Finder Pattern (P_{UR}) Alignment Pattern P1 P3 และ P4) และพื้นที่ซ้ายล่างของ QR Code (ครอบคลุมถึง Finder Pattern (P_{DL}) Alignment Pattern P2 P3 และ P5)

9) จาก Alignment Pattern P6 ดังแสดงใน ภาพที่ 2-37 สามารถทำการประมาณจุดศูนย์กลางได้จาก $CP_{X'}$ และ $CP_{Y'}$ ซึ่งแต่ละค่าสมารถหาได้จาก Alignment Pattern P3 P4 และ P5 ซึ่ง Guide Line ผ่านจุดศูนย์กลางของ Alignment Pattern P3 P4 และ Alignment Pattern P3 P5 ตามลำดับ โดยเป็นคู่อันดับศูนย์กลางของ Pattern



ภาพที่ 2-37 พื้นที่ขวาล่างของ QR Code

10) ทำซ้ำขั้นตอน 5) – 8) ทำการกำหนด Sampling grid สำหรับพื้นที่ขวาล่างของ QR Code

11) ด้วยหลักการเดียวกัน สามารถใช้การตรวจสอบพื้นที่ของ QR Code ที่ยังไม่ครอบคลุมโดยใช้ Sampling grid ได้

ฌ.ทำการ Global Threshold ใน QR Code ตัวอย่างขนาด 3 x 3 พิกเซล แล้วทำการแบ่งกลุ่มเป็นกลุ่มมืด (Dark) แทนด้วย 1 และกลุ่มสว่าง (Light) แทนด้วย 0

ญ.ทำการถอดรหัส Format Information ที่อยู่ใกล้บริเวณ Finder Pattern ด้านซ้ายบน จะทำให้ทราบ Error Correction Level และ Data Mask Pattern ที่ใช้บน QR Code ถ้าค่า Error มากกว่าค่า Error Coorection ของ Format Information จะทำการย้ายไปถอดรหัสที่อยู่ใกล้บริเวณ Finder Pattern ขวาบนและ Finder Pattern ซ้ายล่าง

ฎ. ในกรณี Format Information ไม่สามารถอ่านได้ ให้ดำเนินการโดยใช้การถอดรหัสรูปแบบ Mirror Image Symbol ในตำแหน่งแถวและหลักที่เป็นคู่อันดับ Transposed

ฏ. ทำการ XOR ส่วน Data Mask Pattern ในบริเวณ Encoding Region ใน QR Code เพื่อทำการถอด Data Masking และเพื่อนำข้อมูลในส่วน Data Codewords และ Error Codewords ออกมา ขั้นตอนนี้จะเป็นวิธีตรงกันข้ามกับขั้นตอนในการเข้ารหัสใน QR Code

ฐ. ทำการกำหนด Codewords ตามกฎว่าด้วยการจัดวางในหัวข้อ 2.1.12

1) ทำการจัดลำดับ Codewords ใหม่โดยจัดให้เป็น Blocks ตามข้อข้อกำหนดของเวอร์ชั่นและ Error Correction Level

2) ตรวจหาข้อผิดพลาดและกู้ข้อผิดพลาดตาม Annex B ใน International standard ISO/IEC 18004 เพื่อทำการแก้ไขข้อผิดพลาดให้ถูกต้องสำหรับเวอร์ชั่นและ Error Correction Level

3) ทำการกู้ข้อมูลกลับให้เป็น Bitstream โดยเรียงตาม Data Blocks ตามลำดับ

4) ทำการแบ่ง Bitstream ออกเป็นส่วนต่างๆ ซึ่งมีการระบุโหมด (Mode Indicator) ความยาวตัวอักษร ซึ่งถูกกำหนดด้วย Character Count Indicator

5) ทำการถอดรหัสแต่ละส่วนตามโหมด (Mode) ที่กำหนดไว้

2.2 ทฤษฎีรูปภาพสี

2.2.1 รูปภาพดิจิตอล

รูปดิจิตอล (Digital Image) [8] จะถูกแทนในรูปเมทริกซ์ดังภาพที่ 2-38 โดย f(i,j) คือสมาชิกตำแหน่งแถวที่ i และคอลัมน์ที่ j ในกรณีที่รูปเป็นรูปเฉดสีเทา (Gray scale) f(i,j) จะเป็นค่าระดับเทา (Gray level) ที่ตำแหน่งแถวที่ i และคอลัมน์ที่ j

ก.

$$f(i,j) = \begin{bmatrix} f(1,1) & f(1,2) & \dots & f(1,N) \\ f(2,1) & f(2,2) & \dots & f(2,N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(M,1) & f(M,2) & \dots & f(M,N) \end{bmatrix}$$

ข.

ภาพที่ 2-38 การแทนรูปเฉดเทาด้วยเมทริกซ์ ก.รูปเฉดเทา ข.เมทริกซ์ f แทนในรูป ก.

2.2.2 ระบบสี RGB

รูปสีในโหมด RGB นั้นจะประกอบด้วยอะเรย์ M x N x 3 ซึ่งแต่ละชั้นนั้นจะแทนด้วยชั้น (Layer) สีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน วัตถุประสงค์หลักของรูปแบบสี RGB เป็นตัวแทนและแสดงรูปในระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น โทรทัศน์และคอมพิวเตอร์ ในหลักการรับรู้สีของมนุษย์ ซึ่งเกิดจากหลักการหักเหของแสงในสายรุ้ง ซึ่งสามารถแยกชั้น (Layer) และแสดงสีในแต่ละชั้นสี ได้จากฟังก์ชั่น Colormap ในโปรแกรม MATLAB [9] จะได้ดังภาพที่ 2-39

ภาพที่ 2-39 แสดงชั้นสีในระบบ RGB ของรูป Lena และ Histogram ของแต่ละ Layer

2.2.3 ระบบสี YUV

ในการรับภาพของระบบกล้องในโทรศัพท์มือถือ แอนดรอยด์นั้น กล้องโทรศัพท์จะแปลงข้อมูล RGB โดยเซ็นเซอร์จะแปลงสัญญาณภาพไปเป็นสัญญาณอนาล็อกในระบบ YUV หรือ (YPbPr ในแบบอะนาล็อกหรือ YCbCr ในแบบดิจิตอล) สำหรับการแสดงผลบนจอนั้นจะต้องถูกแปลงกลับมาเป็นระบบ RGB อีกครั้ง

ระบบสัญญาณสีในระบบ YUV ตอนเริ่มแรกถูกออกแบบโดยวิศวกรที่ต้องการส่งสัญญาณภาพสีในระบบโทรทัศน์ขาวดำ ซึ่งข้อดีของสัญญาณระบบ YUV นั้นมีต้องการช่วงกว้าง

แบนด์วิธในการส่งสัญญาณที่น้อยกว่าสัญญาณระบบ RGB มาก โดยระบบสัญญาณสีในระบบ YUV นั้นจะถูกสร้างมาจากการรวมระบบสัญญาณสี RGB เข้าด้วยกันซึ่งทำให้เกิดสัญญาณภาพ Y ย่อมาจาก Luminance (Brightness) โดยจะแสดงถึงความสว่างและมืดในภาพ สัญญาณ U จะเกิดจากการตัดสัญญาณ Y จากสัญญาณสีน้ำเงิน (B-Y) ส่วนสัญญาณ V เกิดจากการตัดสัญญาณ Y จากสัญญาณสีแดง (R-Y) ซึ่งในสัญญาณภาพ Y เหมาะกับภาพ Monochrome ซึ่งในกรณีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้ภาพสัญญาณ U และ V

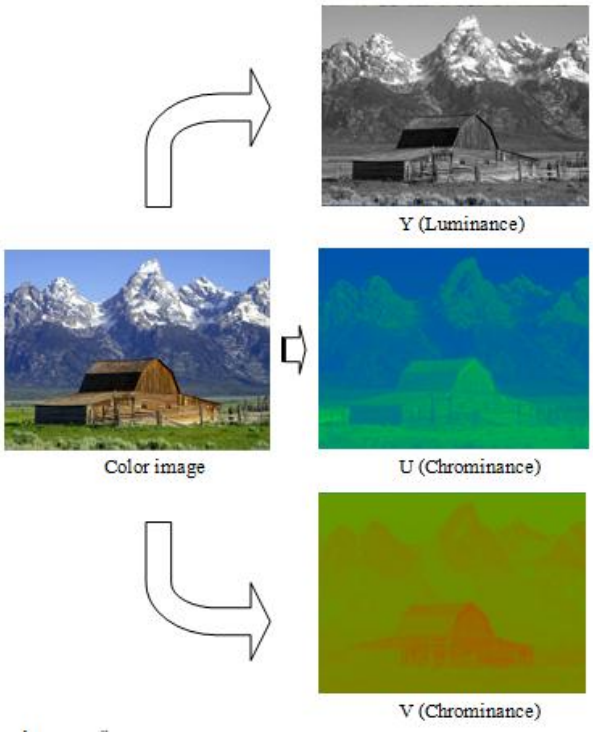
โดยการแปลงระบบสัญญาณ RGB เป็นระบบสัญญาณ YUV สามารถคำนวณได้โดยสมการ 2.12 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} Y' \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.14713 & -0.28886 & 0.436 \\ 0.615 & 0.51499 & 0.10001 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

โดยทางกลับกันสามารถแปลงระบบสัญญาณ YUB เป็นระบบสัญญาณ RGB ได้ดังสมการ 2.13 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1.13983 \\ 1 & -0.39465 & -0.58060 \\ 1 & 2.03211 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y' \\ U \\ V \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

ในการเปลี่ยนแปลงของแสงนั้นจะมีเฉพาะค่า Y (Luminance) เท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยตัวอย่างเป็นแสดงการแปลงรูปสีไปเป็นสัญญาณ Y ซึ่งเป็นค่า Gray scale ซึ่งมีค่าเป็น 0 - 255 ดังแสดงในภาพที่ 2-40



ภาพที่ 2-40 แสดงชั้นสีในระบบ YUV ของรูป Lena และ Histogram ของแต่ละ Layer

2.2.4 Intensity Transformation

Intensity Transformation เป็นกระบวนการปรับปรุงรูปใน Spatial domain ให้เหมาะสมกับงานเฉพาะทางด้าน โดยเป็นการปรับความเข้มของแสง ซึ่งในงานวิจัยเราจะใช้การปรับรูปแบบ Power-Law (Gamma Correction) ซึ่ง Gamma Correction นั้นไม่เป็นสมการเชิงเส้นใช้ในการเข้ารหัสและถอดรหัส Luminance ในระบบวีดีโอหรือรูป โดยมีสมการดัง 2.14

$$S = Cr^{\gamma} \tag{2.14}$$

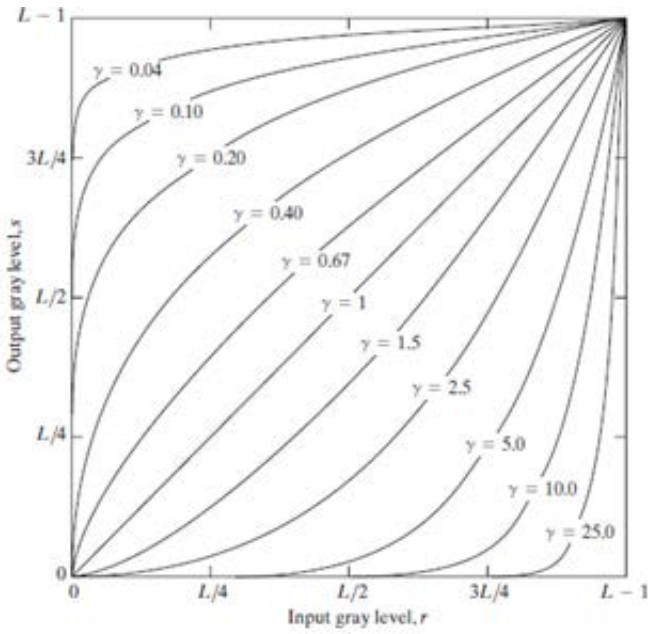
γ , C คือ ค่าคงที่บวก

S คือ Output Intensity Level

r คือ Input Intensity Level

L คือ ระดับ Gray scale

เส้นโค้งของ Grayscale ในภาพที่ 2-41 มีทั้งไว้เพิ่มความสว่างของรูป (เมื่อ $\gamma < 1$) และปรับรูปให้มืดลง (เมื่อ $\gamma > 1$)



ภาพที่ 2-41 กราฟแสดงสมการ Power–Law (Gamma)

2.3 ขั้นตอนการปรับปรุงภาพก่อนถอดรหัสในโทรศัพท์มือถือ

ขั้นตอนการปรับปรุงรูปก่อนถอดรหัสในโทรศัพท์มือถือมีขั้นตอนเริ่มต้นดังนี้

2.3.1 Gray scale เป็นขั้นตอนแรกในการปรับปรุงรูป QR Code ที่ถูกจับภาพด้วยเซนเซอร์ของกล้องจะแสดงรูปเป็นภาพสี ซึ่งไม่มีความจำเป็นสำหรับการอ่าน ของ QR Code ซึ่งใช้โมดูลสว่างและมืดโดยจะปรับรูปเป็นแบบเฉดสีเทา (Gray scale) มีค่าตั้งแต่ [0-255] คือ ค่า Y (Luminance) หรือ Gray scale ในหัวข้อ 2.2.3

2.3.2 Binarization เป็นขั้นตอนทำ Binary image ที่ทำต่อการ Gray scale โดยจะใช้วิธีการแบ่งค่าสองค่า [0,1] โดยวิธีตัดขีดแบ่ง (Threshold) โดยใน International Standard of QR Code จะแบ่งค่าโดยใช้ค่ากลางระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุด (โดยค่ากลางของรูป Gray scale เท่ากับ 127)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของเราจะสนใจงานที่เกี่ยวข้องกับการใส่รูปและสัญลักษณ์ลงใน QR Code ด้วยวิธีการต่างๆ โดยงานวิจัยที่พบส่วนส่วนใหญ่จะเป็นวิธีการใส่รูปประเภทที่เป็น Dot pixel คือ มีแค่ 1 บิตหรือ 2 สีโดยหาตำแหน่งที่ดีที่สุดที่ใส่รูปลงบน QR Code ที่ทำให้ใช้ค่า Error Correction น้อยที่สุดและยังสามารถอ่านข้อมูลใน QR Code ได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ด้วยอุปกรณ์ทั่วไปที่สามารถสำหรับอ่าน QR Code โดยงานวิจัยหล่าวนั้นได้สรุปวิธีคิดและกระบวนการสั้นๆ ดังนี้

ผลงานวิจัยของ Satoshi Ono และคณะ [19] ในปี 2008 เป็นการนำเสนอวิธีเกี่ยวกับการตกแต่งรูป QR Code โดยจะเสนอหลักเกณฑ์หา ตำแหน่ง ขนาดและมุมที่เหมาะสมใน QR Code เวอร์ชั่น H โดยใช้วิธี real coded genetic algorithm รูปที่ใส่นั้นสามารถใส่รูปได้สูงสุดได้ 3 รูป โดย QR Code โดย พบว่าเมื่อมีการใส่รูปลงไปมากขึ้น ความสำเร็จที่ จะถอดรหัสด้วย Psytec decoder, open source decoder และ Psytec decoder + open source decoder จะลดลงและใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น โดย Psytec decoder + open source decoder มีความสามารถที่อ่านสำเร็จสูงสุด 96% ใช้เวลาคำนวณถึง 5,623 วินาทีแต่อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่า open source decoder นั้นจะมีความสามารถในการอ่านต่ำสุดแค่ 32% ใช้เวลาคำนวณ 1,361 วินาที

ผลงานวิจัยของ Satoshi Ono และคณะ [20] ในปี 2010 เป็นการนำเสนอที่ให้ผู้ใช้นำรูปใบหน้าไปใส่ใน QR Code เพื่อค้นหาตำแหน่งที่เหมาะสม โดยระบบจะให้ผู้ใช้สามารถเลือกการออกแบบตามที่ต้องการ โดยการเลือกจากระบบที่แสดง โดยใช้เวลา 10 ถึง 20 นาที โดย QR Code เป็นเวอร์ชั่น H ระบบสำหรับ QR Code จะใช้ IEC (Interactive Evolutionary Computation) และ CBR (Case-Based Reasoning) เพื่อการประเมินผลโดยปัญหา คือ มาตรฐานที่ใช้ประเมินระบบ IEC เพราะเกณฑ์การประเมินแต่ละคนไม่เหมือนกัน ดังนั้น จึงใช้การแก้เป็นปัญหาสำหรับแต่ละกรณี

ผลงานวิจัยของ Toshihiko Wakahara และ Noriyasu Yamamoto [21] ในปี 2010 เป็นการนำเสนอแนวคิดการสร้างรูป Dott multiplexed และการประเมินผลลักษณะที่ซ้ำซ้อนในการเข้ารหัสของ QR Code โดยมีการแสดงว่าพื้นที่ที่เหลือจากการเข้ารหัสที่ซ้ำซ้อน มีบิตที่ซ้ำซ้อนมีมากขึ้นในเวอร์ชั่นที่สูงขึ้น นักวิจัยจึงใช้พื้นที่ว่างนี้ในการใส่รูป Dott multiplexed ลงไปในการเข้ารหัส QR Code ด้วย ทำให้รูป Dott multiplexed นั้นเปรียบเหมือน Dott multiplexed เป็นส่วนหนึ่งของ QR Code โดยไม่ต้องใช้ค่า Error Correction ในการกู้ข้อมูลกลับ

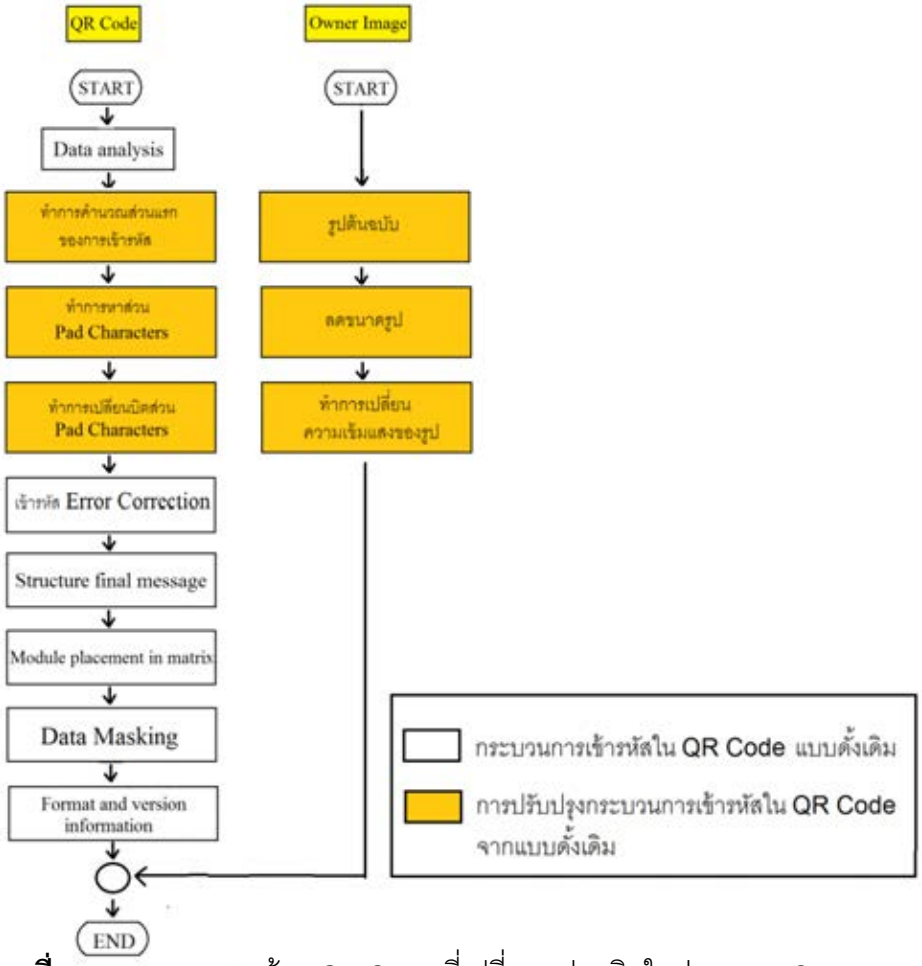
ผลงานวิจัยของ Toshihiko Wakahara และ Noriyasu Yamamoto [22] ในปี 2011 เป็นการเสนอเกี่ยวกับ การปรับปรุงปัญหารูปที่ซ้อนทับใน QR Code ซึ่งภาพเหมือนสัญญาณรบกวนซึ่งลดความสามารถในการอ่านข้อมูล โดยหลีกเลี่ยงการลดลงของความสามารถในการอ่านสำหรับ QR Code โดยการศึกษาที่ตำแหน่งของภาพที่ซ้อนทับที่ดีที่สุด โดยนำข้อดีของ Without Pad Codewords มาใช้โดยมี 3 ส่วน การส่วนแรกเกี่ยวกับ Losing point ของ Mask เปรียบเทียบคะแนน ระหว่าง Pad Codewords (Pad Characters) กับ Without Pad Codewords ผลที่ได้ Without Pad Codewords มีคะแนนน้อยกว่า ส่วนที่ 2 เพื่อทดสอบความรวดเร็วทั้ง Pad Codewords กับ Without Pad Codewords ในการอ่าน QR Code ที่มีการซ้อนทับด้วยรูป ที่ QR Code เวอร์ชั่น 3 ระดับ Error Correction เท่ากับ H (30%) ผลพบว่าจะไม่สามารถอ่านได้ที่จุด Finder Pattern และใกล้จุด Finder Pattern รูปบางส่วนยังสามารถอ่านได้เพราะมีค่า Error Correction อยู่ ส่วนที่ 3 เป็นการสุ่มโดยจะแนะนำให้สุ่มรูปในส่วน Pad Codewords จะได้ค่าที่ดีที่สุด

ผลงานวิจัยของ Damri Samretwit และคณะ [23] ในปี 2011 เป็นการเสนอเกี่ยวกับการหาตำแหน่ง ขนาดรูปที่วางซ้อนทับระดับ Error Correction ที่เหมาะสมที่สุด ในเวอร์ชั่น 3 ที่ตัวอักษร 15 ตัวอักษรผลที่ได้พบว่าการวางที่ตำแหน่งกลางซ้ายดีที่สุด เพราะ ทับส่วน Remainder bits, Timing Pattern และ Format Information

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะแบ่งขั้นตอนเป็น 3 ขั้นตอน คือ กระบวนการปรับปรุงการเข้ารหัสส่วน Pad Charcator ใน QR Code กระบวนการปรับปรุงรูปก่อนฝังรูปและทดสอบความสามารถอ่าน QR Code เมื่อฝังรูปขนาดต่างๆกัน



ภาพที่ 3-1 กระบวนการสร้าง QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตในส่วน Pad Characters

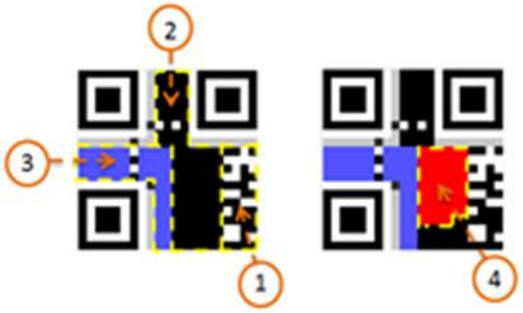
ภาพที่ 3-1 แสดงขั้นตอนการสร้าง QR Code โดยสัญลักษณ์ ▭ เป็นขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการเข้ารหัส ซึ่งใช้การเปลี่ยนแปลงบิตในส่วน Pad Characters และสัญลักษณ์ ▭ เป็นกระบวนการเข้ารหัสใน QR Code แบบดั้งเดิม โดยการดำเนินงานวิจัยจะมีกระบวนการดังต่อไปนี้

3.1 กระบวนการปรับปรุงการเข้ารหัสส่วน Pad Character ใน QR Code

3.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis)

ส่วนนี้จะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลขาเข้า (Input Data) เพื่อระบุประเภทอักขระ (Charactor) ที่แตกต่างกัน โดยใน ISO/IEC 18004:2000 (E) และ ISO/IEC 18004:2006 (E) ได้มีการระบุโหมด (Modes) ในหัวข้อ 2.1.9.ก ที่มีความแตกต่างกันของอักขระ (Charactor) เพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการแปลงข้อมูลไปเป็น Binary string โดยต้องทำการเลือก Error Correction Level ถ้าผู้ใช้ที่ได้ระบุเวอร์ชั่น (Version) ของ QR Code ที่ใช้ QR Code จะเลือกเวอร์ชั่นน้อยที่สุดที่ข้อมูลสามารถบรรจุได้หมด โดยรายละเอียดของเวอร์ชั่นและความจุสามารถดูได้จากภาคผนวก ก ตาราง ก-1 Codeword capacity of all versions of QR Code 2005

3.1.2 การเข้ารหัสส่วนข้อมูล (Data encoding) โดยวิธีการปรับปรุงกระบวนการเข้ารหัสในส่วน Pad Character



ภาพที่ 3-2 แสดงส่วนต่างๆ ของ QR Code ที่ใช้ในการเปลี่ยน Pad Character
1. ส่วนแรกของการเข้ารหัส 2. ส่วน Pad Character
3. ส่วน Error Correction 4. พื้นที่ที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงบิต

วิธีการปรับปรุงกระบวนการเข้ารหัสในส่วน Pad character มี 3 ขั้นตอนดังนี้

ก. การคำนวณส่วนแรกของการเข้ารหัส (Calculating in the firth part of encoding)

ขั้นตอนนี้จะเป็นการเข้ารหัสส่วน Data Codeword ซึ่งเป็นการแปลง อักขระข้อมูล (Data Characters) ไปเป็น Bit stream ตามหลักเกณฑ์ที่กำหนดในหัวข้อ 2.1.9.ก ถึงหัวข้อ 2.1.9.ค.5 ซึ่งแสดงดังภาพ 3-2 ในส่วนที่ 1

ข. การหาส่วน Pad Character (Finding Pad Character)

ขั้นตอนนี้จะเป็นการหาบริเวณพื้นที่ใน QR Code ที่สามารถเปลี่ยนแปลงบิตในส่วน Pad Character โดย Pad Character จะใช้ในการเติมจำนวน Data Codewords ตามที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละเวอร์ชั่น (Version) ซึ่งแสดงดังภาพ 3-2 ในส่วนที่ 2 โดยที่จำนวน Data Codewords ที่เพิ่มสามารถดูได้จากตารางที่ **2-2** ตัวอย่าง Number of symbol characters and input data capacity for QR Code

ค. การเปลี่ยนแปลงบิตใน Pad Character (Changing Pad Character)

ขั้นตอนนี้เป็นการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิตและการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด ที่สามารถเปลี่ยนแปลงบิต ในภาพ 3-2 ในส่วนที่ 4 เป็นพื้นที่ที่ใช้เปลี่ยนแปลงบิตที่ไว้สำหรับการฝังรูป บิตที่เปลี่ยนจะแทนด้วยบิต 0 ซึ่งเป็นโมดูลสีดำ (Dark module) โดยเมื่อเปลี่ยนแปลงบิตแล้วยังสามารถที่จะอ่านด้วย QR Code Reader ทั่วไปได้

1) การเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิต ขนาดของพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตจะสามารถเพิ่มขึ้นได้ตามขนาดที่กำหนดไว้ แต่จะไม่เกินบริเวณพื้นที่ภายในส่วน Pad Character ในหัวข้อ ข ถ้าเกินบริเวณ Pad Character ส่วนที่เกินนั้นจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงบิต

ก. ข. ค.

ภาพที่ 3-3 แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิต ใน Pad Character ของ QR Code เวอร์ชั่น 1-M เข้ารหัส 6 ตัวอักษร

ก. ขนาด 4 x 3 โมดูล ข. ขนาด 7 x 5 โมดูล ค. ขนาด 10 x 8 โมดูล

ใน QR Code เวอร์ชั่น 1-M เข้ารหัส 6 ตัวอักษร ภาพที่ 3-3 ก และ ข แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิตที่ไม่เกินส่วน Pad Character ในทางกลับกันภาพที่ 3-3 ค แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิตที่เกินส่วน Pad Character ส่วนที่เกินจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงบิต ในการเลือกขนาดลักษณะนี้จะใช้กับการเข้ารหัสบล๊อกเดียว ดังหัวข้อ 2.1.11 ซึ่งใช้ใน QR Code เวอร์ชั่น 1-L, เวอร์ชั่น 1-M, เวอร์ชั่น 1-Q, เวอร์ชั่น 1-H, เวอร์ชั่น 3-L, เวอร์ชั่น 3-M

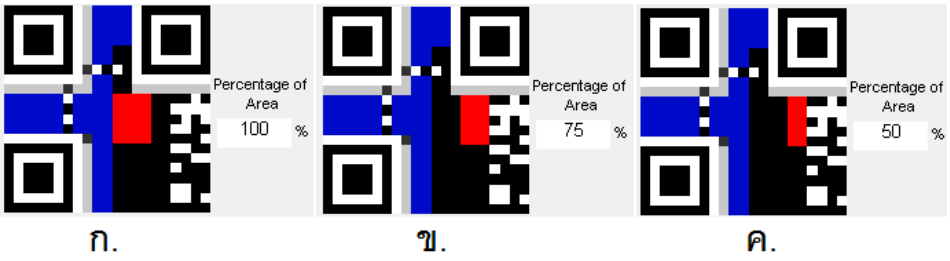
ภาพที่ 3-4 แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิต ใน Pad Character ของ QR Code เวอร์ชั่น 3-Q เข้ารหัส 6 ตัวอักษร
ก. ขนาด 7 x 5 โมดูล ข. ขนาด 10 x 8 โมดูล ค. ขนาด 14 x 10 โมดูล

ใน QR Code เวอร์ชั่น 3-Q เข้ารหัส 6 ตัวอักษร ภาพที่ 3-4 ก แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิตที่ไม่เกินส่วน Pad Character ในทางกลับกันภาพที่ 3-4 ข และ ค แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิตที่เกินส่วน Pad Character ส่วนที่เกินจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงบิต ในการเลือกขนาดลักษณะนี้จะใช้กับการเข้ารหัสสองบล๊อก ดังหัวข้อ 2.1.11 ซึ่งใช้ใน QR Code เวอร์ชั่น 3-Q, เวอร์ชั่น 3-H, เวอร์ชั่น 6-L

ภาพที่ 3-5 แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิต ใน Pad Character ของ QR Code เวอร์ชั่น 6-M เข้ารหัส 18 ตัวอักษร
ก. ขนาด 12 x 9 โมดูล ข. ขนาด 15 x 13 โมดูล ค. ขนาด 24 x 18 โมดูล

ใน QR Code เวอร์ชั่น 6-M เข้ารหัส 18 ตัวอักษร ภาพที่ 3-5 ก แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิตที่ไม่เกินส่วน Pad Character ในทางกลับกันภาพที่ 3-5 ข และ ค แสดงการเลือกขนาดที่เปลี่ยนบิตที่เกินส่วน Pad Character ส่วนที่เกินจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงบิต ในการเลือกขนาดลักษณะนี้จะใช้กับการเข้ารหัสสี่บล๊อก ดังหัวข้อ 2.1.11 ซึ่งใช้ใน QR Code เวอร์ชั่น 6-M, เวอร์ชั่น 6-Q, เวอร์ชั่น 6-H

2) การเลือกตำแหน่งที่สามารถเปลี่ยนแปลงบิต ในเวอร์ชั่นที่มีการเข้ารหัสเพียง 1 บล็อก (Block) และการเข้ารหัสหลายบล็อก จะให้ด้านซ้ายของพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิต อยู่ติดกับพื้นที่ Error Correction Codeword เนื่องการทดลองจะมีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนบิตให้ได้มากที่สุด โดยจะมีการคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์พื้นที่ใน Pad Character ผลจะแสดงพื้นที่ที่อยู่ติดกับ Error Correction Codeword จะเปลี่ยนแปลงบิตได้มากที่สุด ถ้าทำการเลื่อนตำแหน่งไปด้านขวาจะเปลี่ยนแปลงบิตได้น้อยลง ดังตัวอย่างใน Version 1 ดังภาพที่ 3-6 Version 3 ดังภาพที่ 3-7 และ Version 6 ดังภาพที่ 3-8

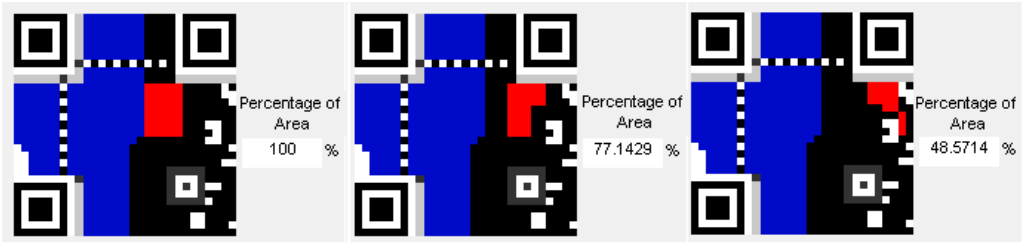


ภาพที่ 3-6 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนนอนของ QR Code เวอร์ชั่น 1-M เข้ารหัส 6 ตัวอักษร ขนาด 5 x 4 โมดูล

ก. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 100%

ข. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 75%

ค. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 50%

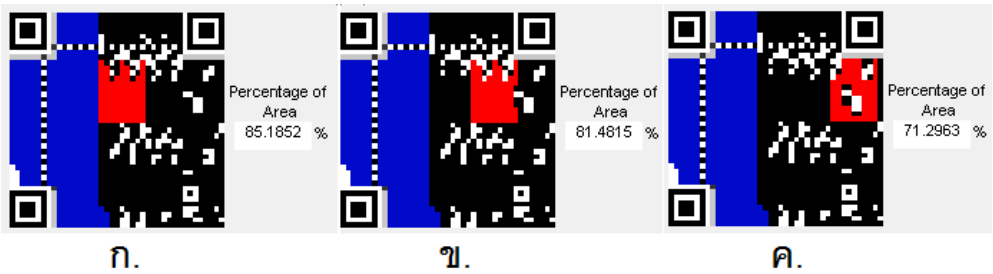


ภาพที่ 3-7 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนนอนของ QR Code เวอร์ชั่น 3-Q เข้ารหัส 6 ตัวอักษร ขนาด 7 x 5 โมดูล

ก. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 100%

ข. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 77.1429%

ค. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 48.5714%



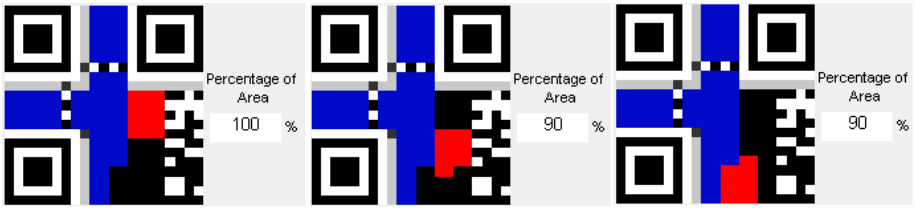
ภาพที่ 3-8 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนนอนของ QR Code เวอร์ชั่น 6-M เข้ารหัส 35 ตัวอักษร ขนาด 12 x 9 โมดูล

ก. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 85.1852%

ข. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 81.4815%

ค. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 71.2963%

ตามผลที่ได้จากการหาตำแหน่งในแนวแกนนอนพบว่าเมื่อให้จุดซ้ายบนของพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิต อยู่ติดกับพื้นที่ Error Correction Codeword จะได้เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตมากที่สุด ดังนั้นในการทดลองจะทำการอ้างอิงจากตำแหน่งนี้ ในหาตำแหน่งแนวตั้งนั้น จะทำการปรับตำแหน่งขึ้นลงในแนวแกนตั้ง โดยตำแหน่งที่เลือกสามารถปรับเพื่อหาเปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่สามารถเปลี่ยนแปลงบิตที่มากที่สุดใน Pad Character ตัวอย่างใน Version 1 ดังภาพที่ 3-9 Version 3 ดังภาพที่ 3-10 และ Version 6 ดังภาพที่ 3-11



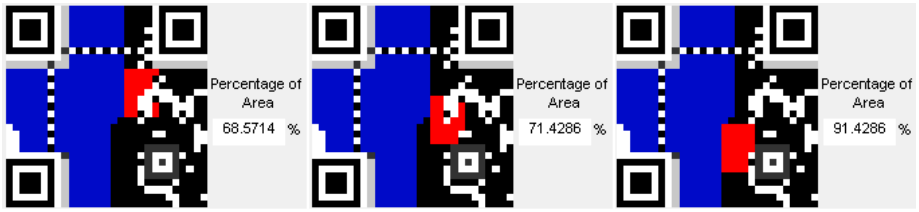
ก. ข. ค.

ภาพที่ 3-9 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนตั้งของ QR Code เวอร์ชั่น 1-Q เข้ารหัส 6 ตัวอักษร ขนาด 5 x 4 โมดูล

ก. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 100%

ข. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 90%

ค. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 90%



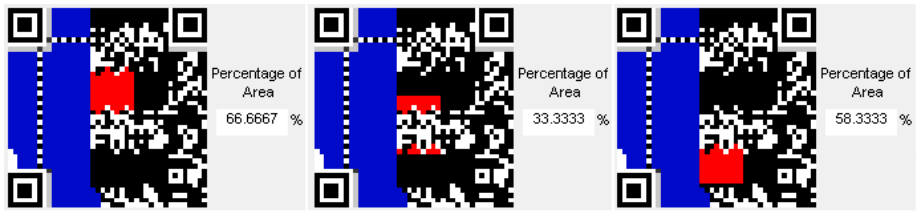
ก. ข. ค.

ภาพที่ 3-10 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนตั้งของ QR Code เวอร์ชั่น 3-Q เข้ารหัส 15 ตัวอักษร ขนาด 7 x 5 โมดูล

ก. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 68.5714%

ข. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 71.4286%

ค. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 91.4286%



ก. ข. ค.

ภาพที่ 3-11 แสดงการเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนตั้งของ QR Code เวอร์ชั่น 6-M เข้ารหัส 84 ตัวอักษร ขนาด 12 x 9 โมดูล

ก. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 66.6667%

ข. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 33.3333%

ค. เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตเท่ากับ 58.3333%

ซึ่งจะเห็นได้ว่า การเลื่อนตำแหน่งในแนวแกนตั้งของ QR Code ในเวอร์ชั่นต่างๆ เปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตจะไม่สามารถหาตำแหน่งเปอร์เซ็นต์พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตที่เหมาะสมที่แน่นอนได้ ดังนั้นในการทดลองจะใช้การปรับตำแหน่งโดยทำการเลือกตำที่เหมาะสมเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ในแนวแกนตั้งที่สูงสุด ที่ติดกับพื้นที่ Error Correction Codeword

3.1.3 การเข้ารหัส Error Correction

ทำการแบ่งลำดับ Codeword ตามจำนวนบล๊อก (Number of blocks) ที่ถูกกำหนดการคำนวณตามกระบวนการในหัวข้อ 2.1.10 โดยจะสร้าง Error Correction Codewords สำหรับแต่ละบล๊อก (block) จนถึงลำดับสุดท้ายของ Data Codeword

3.1.4 โครงสร้าง Final Message ของ QR Code (Structure Final Message)

ทำการแทรก Data และ Error Correction Codewords จากแต่ละบล๊อก (block) ในหัวข้อ 2.1.11.ค และทำการเพิ่ม Remainder Bits ที่จำเป็น

3.1.5 การวางโมดูลในเมทริกซ์ (Module placement in matrix)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการวางโมดูลลงในเมทริกซ์ ดังในหัวข้อ 2.1.12 พร้อมด้วย Finder Pattern, Separators, Timing Pattern และถ้ามี Alignment Patterns

3.1.6 ขั้นตอนการ Masking (Data Masking)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเลือก Mask pattern จากการคำนวณ เพื่อทำการกระจายโมดูลขาว / ดำ ตามขั้นตอนในหัวข้อ 2.1.13

3.1.7 Format และ Version Information

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการสร้าง Format Information สามารถดูจากหัวข้อ 2.1.14 และจะได้สัญลักษณ์ที่สมบูรณ์ดังภาพที่ 3-12 โดย QR Code ที่ได้จะเป็น Binary Image ซึ่งแสดงค่าเป็น 0 และ 1

ภาพที่ 3-12 แสดง QR Code เมื่อเปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส

3.2 กระบวนการปรับปรุงภาพก่อนฝังรูป

3.2.1 ภาพต้นฉบับ (Original Image)

ลักษณะเป็นรูปภาพขนาดต่างๆ สำหรับฝังรูปลงใน QR Code ที่ผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงบิต

3.2.2 การลดขนาดรูป (Resize Image)

ทำการลดขนาดรูปโดยใช้ฟังก์ชันในโปรแกรม Matlab

3.2.3 การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของภาพ (Adjustment Of Intensity Of Light In The Image)

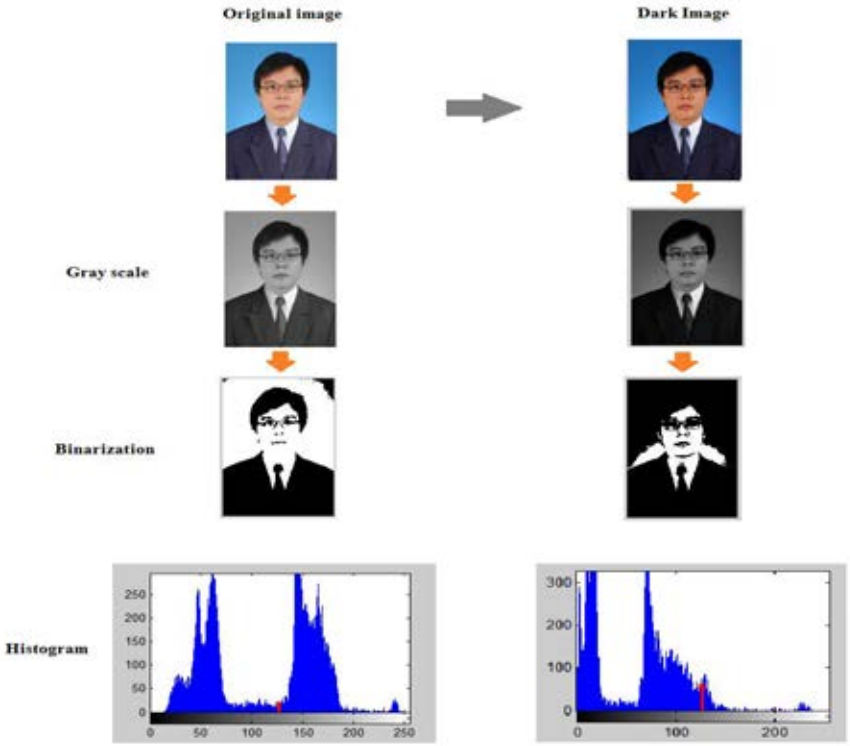
ในกระบวนการปรับความเข้มแสงโดยวิธี Intensity Transformation ของภาพ ในหัวข้อ 2.2.4 มีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์จาการเปลี่ยนแปลงบิตในส่วน Pad Character ในการฝังรูปเพื่อให้มีลักษณะเมื่ออ่านจากกล้อง (หัวข้อ 2.3) เหมือนกับพื้นหลังที่ซ้อนทับหลังที่มีการเปลี่ยนแปลงบิต โดยจะใช้การปรับรูปแบบ Power-Law (Gamma Correction) ดังสมการที่ 2.6

$$S = Cr^{\gamma} \tag{2.6}$$

ในการทดลองจะให้ค่าคงที่ C มีค่าเท่ากับ 1 ทุกกรณีและทำการปรับภาพให้มืดลง ($\gamma > 1$) โดยรูปที่จะฝังบน QR Code ในงานวิจัยจะใช้รูปถ่ายสีที่มีการเพิ่มความเข้มแสง (Intensity) จากรูปต้นฉบับ โดยจะกำหนดให้จำนวนพิกเซล (Pixel) ที่มีค่าความสว่างของรูปเมื่อแปลงเป็น Binary image มีพิกเซลมืด (Dark Pixel) มากกว่าหรือเท่ากับ 85% ของรูป โดยเราจะสามารถหาจำนวนพิกเซลมืด ได้จาก ฮิสโตแกรม (Histogram) ดังภาพที่ 3-13

ภาพที่ 3-13 ฮิสโตแกรม (Histogram) แสดงจำนวนบิตสีดำและสีขาวในรูป

จากภาพที่ 3-13 จากเห็นได้ว่าจำนวนพิกเซลมืด (Dark Pixel) ที่ตำแหน่ง 0 จะมากกว่า pixel พิกเซลสว่าง (Light Pixel) ที่ตำแหน่ง 1 ประมาณ 7 เท่า หรือพิกเซลมืด (Dark Pixel) ประมาณ 85% ของรูป ซึ่งภาพที่ 3-14 จะการเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างรูปต้นฉบับกับรูปที่ปรับความเข้มแสง (Intensity) ให้มืดลงโดยใช้วิธี Power-Law เมื่อ γ = 1.5 และ C = 1



ภาพที่ 3-14 แสดงความแตกต่างของรูปต้นฉบับที่ใช้ในการระบุตัวตนกับรูปมืด (Dark image)

3.3 กระบวนการการฝังรูปลงบนพื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิต

เมื่อผ่านกระบวนการเข้ารหัสส่วนข้อมูล (Data encoding) โดยวิธีการปรับปรุงกระบวนการเข้ารหัสในส่วน Pad Character และกระบวนการปรับปรุงรูปก่อนฝังรูป ต่อมาจะเป็นกระบวนการฝังรูปลงบน QR Code โดยมีกระบวนการดังนี้

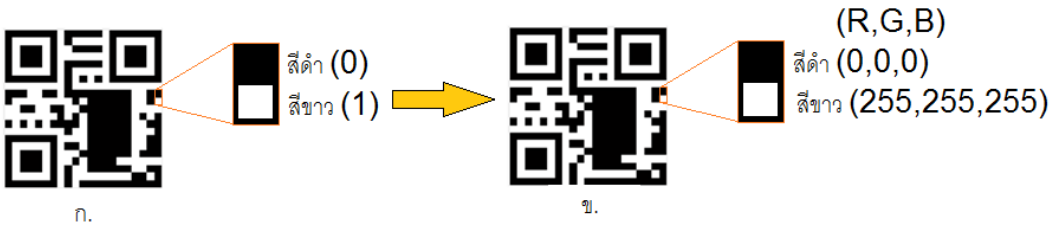
3.3.1 การแบ่งระดับชั้นสี RGB ของรูปที่มีผ่านกระบวนการปรับปรุงรูป

ขั้นตอนนี้จะเป็นการแบ่งระดับชั้นสี RGB ของรูป โดยจะแบ่งออกเป็นชั้นสีแดง ชั้นสีเขียวและชั้นสีน้ำเงินดังภาพ 3-15

ภาพที่ 3-15 การแบ่งระดับชั้นสี RGB ของรูป

3.3.2 ทำการแปลงรูปแบบ (Format) ของ QR Code ที่ใช้วิธีการปรับปรุงกระบวนการเข้ารหัส

โดยปกติ QR Code ทั่วไปจะมีรูปแบบเป็น Binary Image (1-bit) คือ ลักษณะเป็น สีขาวและสีดำซึ่งจะแสดงเป็นค่า (1,0) ตามลำดับ ซึ่งในงานมีความต้องการที่ต้องการใช้รูปภาพสี (8-bit) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องแปลงเป็นระบบสี RGB โดยจะใช้ฟังก์ชันบน Matlab ในการเปลี่ยน Format ของรูปจะได้ผลลัพธ์ดังภาพ 3-16



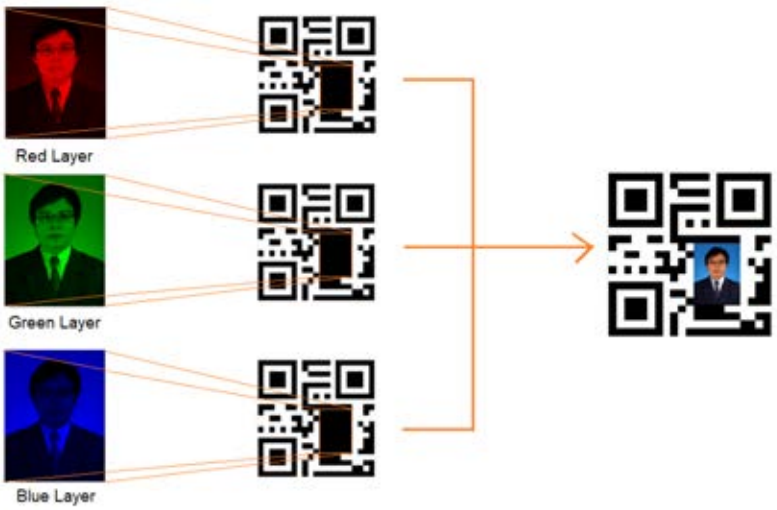
ภาพที่ 3-16 การแปลงรูปแบบ (Format) ของ QR Code
ก. แสดงรูปแบบ Binary ข. แสดงรูปแบบ RGB

3.3.3 การแบ่งระดับชั้นสี RGB ของ QR Code ที่ใช้วิธีการปรับปรุงกระบวนการเข้ารหัส

ขั้นตอนนี้จะเป็นการแบ่งระดับชั้นสี RGB ของ QR Code โดยจะแบ่งออกเป็นชั้นสีแดง ชั้นสีเขียวและชั้นสีน้ำเงิน ขั้นตอนนี้จะดำเนินการเหมือนขั้นตอน 3.3.1 แต่เปลี่ยนการรูปภาพเป็น QR Code

3.3.4 การฝังรูปลงบน QR Code

การฝังจะฝังแบบจุดต่อจุดพิกเซล ซึ่งจะทำการฝังทั้งใน 3 ชั้น ได้แก่ สีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน โดยจะเริ่มฝังจากจุดอ้างอิงมุมซ้ายบนของพื้นที่จะต้องการเปลี่ยนแปลงบิตดังตัวอย่างดังภาพที่ 3-17



ภาพที่ 3-17 การฝังรูปบน QR Code

3.4 การวัดค่าประสิทธิภาพ

ก. การวัดประสิทธิภาพความสามารถในการฝังรูป

เป็นการทดสอบการฝังรูปบน QR Code ที่ใช้การเปลี่ยนแปลงบิต ที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ เพื่อดูความสามารถในการอ่านโดยใช้เครื่องอ่าน QR Code ทั่วไปและหาขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดสามารถวางบน QR Code เวอร์ชั่นนั้นๆ

ข. การวัดเปอร์เซ็นต์ Error correction ในระดับ L, M, Q และ H

เป็นการคำนวณเปอร์เซ็นต์ Error correction ในระดับ L, M, Q และ H โดยจะทำการเปรียบเทียบกับค่าในอุดมคติ (การคำนวณเปอร์เซ็นต์ Error Corection อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.6)

ค. การเปรียบเทียบในเวอร์ชั่น 3 กับงานวิจัยอื่น

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการฝังรูปลงใน QR Code เมื่อมีการเปรียบแปลงบิตในส่วน Pad Character กับงานวิจัยของ Damri Samretwit Toshihiko และ Wakahara เรื่อง Measurement of Reading Characteristics of Multiplexed Image in QR Code. โดยจะเลือกรูปที่ตำแหน่งดีที่สุดในการฝังรูปใน QR Code ทั่วไป โดยจะเปรียบเทียบขนาดที่ฝังรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังได้ใน QR Code ที่เวอรชัน 3 โดยเข้ารหัส 15 ตัวอักษรและเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ Error correction ในระดับ L, M, Q และ H ของทั้ง 2 ประเภท (การคำนวณเปอร์เซ็นต์ Error Corection อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.6

ง. การสร้างเป็นนามบัตรสำหรับระบุตัวตน

เป็นการสร้างนามบัตร QR Code โดยใช้วิธีการเปลี่ยนแปลงบิต โดยจะใช้ QR Code เวอร์ชั่น 6 ทำการทดลองเปลี่ยนข้อความและรูปภาพ แล้วทำการทดสอบด้วยโปรแกรมอ่าน QR Code ทั่วไป

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองและผลการทดลองของการฝังรูปบน QR Code ที่มีการเปลี่ยนแปลงบิตที่ขนาดรูปต่างๆ เพื่อหารูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังได้ การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ Error Correction การเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น

4.1 เครื่องมือในการทดลอง

4.1.1 ฮาร์ดแวร์ในการทดสอบงานวิจัย คือ Dell 5110 (15 inch) ซีพียู Intel(R) Core(TM) i7 processor 2636QM หน่วยความจำ 8 GB ฮาร์ดดิสก์ 500 GB บนระบบปฏิบัติการ Microsoft Window 7 64 bit

4.1.2 ซอฟต์แวร์ในคอมพิวเตอร์ที่ใช้การเขียนโปรแกรม คือ โปรแกรม Matlab เวอร์ชั่น 7.9.0 (R2009b)

4.1.3 ฮาร์ดแวร์สำหรับการอ่าน QR Code ในการทดสอบงานวิจัย คือ Samsung Galaxy S Plus i9001

4.1.4 ซอฟต์แวร์สำหรับการอ่าน QR Code ในการทดสอบงานวิจัย คือ ZXing Version 2.0 ใช้ในการเก็บข้อมูลงานงานวิจัยและโปรแกรมทดสอบอื่นๆ เช่น QR Droid และ Scan

4.1.5 รูปภาพในการทดลองมีดังต่อไปนี้

ก. QR Code จะใช้จำนวน 3 เวอร์ชั่น เป็นไฟล์รูปภาพนามสกุล .PNG ซึ่งมีขนาด 8 บิตต่อหนึ่งจุดรูป การเข้ารหัสข้อความในรูปแบบ Alphabetic มีขนาดต่างๆ ขึ้นกับเวอร์ชั่นดังนี้

1) QR Code เวอร์ชั่น 1 ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสขนาด 399 x 399 พิกเซล

2) QR Code เวอร์ชั่น 3 ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสขนาด 551 x 551 พิกเซล

3) QR Code เวอร์ชั่น 6 ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสขนาด 779 x 779 พิกเซล

ข. รูปภาพสีที่ใช้ฝังบน QR Code เป็นไฟล์รูปนามสกุล .PNG ซึ่งมีขนาด 8 บิต ต่อพิเซล โดยจะกำหนดขนาดขึ้นกับโมดูลของ QR Code ซึ่งจะมีขนาดต่างๆ กันดังนี้

1) เวอร์ชั่น 1 มี 6 ขนาดที่ต่างกัน คือ 4 x 3 โมดูล 5 x 4 โมดูล 7 x 5 โมดูล 8 x 6 โมดูล 10 x 8 โมดูลและ 12 x 9 โมดูล

2) เวอร์ชั่น 3 มี 9 ขนาดที่ต่างกัน คือ 5 x 4 โมดูล 7 x 5 โมดูล 8 x 6 โมดูล 10 x 8 โมดูล 12 x 9 โมดูล 14 x 10 โมดูล 15 x 11 โมดูล 15 x 13 โมดูลและ 16 x 14 โมดูล

3) เวอร์ชั่น 6 มี 6 ขนาดที่ต่างกัน คือ 4 x 3 โมดูล 5 x 4 โมดูล 7 x 5 โมดูล 8 x 6 โมดูล 10 x 8 โมดูลและ 12 x 9 โมดูล

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 การฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตและการอ่านด้วยโปรแกรม QR Code Reader

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบความสามารถในการอ่าน QR Code เมื่อ QR Code ถูกเปลี่ยนแปลงบิต ที่มีการเข้ารหัสด้วยจำนวนตัวอักษรต่างๆ โดยจะทำการฝังรูปจำนวน 1 รูป ในแต่ละ QR Code ในส่วนบริเวณ Pad Character โดย QR Code จะใช้จำนวน 3 เวอร์ชั่น ได้แก่ เวอร์ชั่น 1 เวอร์ชั่น 3 และเวอร์ชั่น 6 ที่ระดับ Error Correction L, M, Q และ H ทำการอ่านด้วยโปรแกรม ZXing ที่ระยะการอ่านตั้งแต่ 1 - 20 เซนติเมตร

ก. การทดลองใน QR Code เวอร์ชั่น 1 จะใช้ QR Code ขนาด 399 x 399 พิกเซล เข้ารหัสด้วยจำนวนตัวอักษร 1 ตัวอักษร 6 ตัวอักษร 10 ตัวอักษร 16 ตัวอักษร 20 ตัวอักษรและสูงสุดที่ 25 ตัวอักษร ด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงบิตเพื่อฝังรูปภาพขนาดต่างๆกัน คือ 4 x 3 โมดูล 5 x 4 โมดูล 7 x 5 โมดูล 9 x 6 โมดูล 10 x 8 โมดูลและ 12 x 9 โมดูลที่ระดับ Error Correction L, M, Q และ H ซึ่งจะทำการวัดความสามารถอ่าน QR Code ด้วยโปรแกรม Zxing เพื่อหาขนาดรูปที่ฝังบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตได้และเพื่อหาขนาดของรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังบน QR Code ได้

จากข้อมูลการทดลองทั้งหมดในเวอร์ชั่น 1 จะสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-1 โดยแสดงจำนวนการเข้ารหัสตัวอักษรและขนาดของโมดูลที่สามารถฝังรูปลงใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิต ซึ่ง ✓ และ ✗ แสดงความอ่านสามารถอ่านด้วยโปรแกรมอ่าน QR Code ในระดับ Error Correction L, Error Correction M, Error Correction Q, Error Correction H โดยจากตัวอย่าง จะพบว่าที่ระดับ Error Correction L เมื่อเข้ารหัสจำนวน 1 ตัวอักษรรูปขนาด 4 x 3 โมดูล 5 x 4 โมดูล 7 x 5 โมดูล 9 x 6 โมดูลและ 10 x 8 โมดูลสามารถอ่านได้แต่รูปที่ฝังขนาด 12 x 9 โมดูลไม่สามารถอ่านได้

ตารางที่ 4-1 แสดงขนาดรูปที่สามารถฝังลงใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตที่มีการเข้ารหัสด้วยจำนวนตัวอักษรต่างๆ ใน QR Code เวอร์ชั่น 1

จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level L					
	4x3	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9
1	✓	✓	✓	✓	✓	✗
6	✓	✓	✓	✓	✗	✗
10	✓	✓	✓	✓	✗	✗
16	✓	✓	✗	✗	✗	✗
20	✓	✓	✗	✗	✗	✗
25 (สูงสุด)	✓	✗	✗	✗	✗	✗
จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level M					
	4x3	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9
1	✓	✓	✓	✓	✓	✗
6	✓	✓	✓	✓	✗	✗
10	✓	✓	✓	✓	✗	✗
16	✓	✓	✓	✗	✗	✗
20 (สูงสุด)	✓	✓	✓	✗	✗	✗
จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level Q					
	4x3	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9
1	✓	✓	✓	✓	✓	✗
6	✓	✓	✓	✓	✗	✗

10	✓	✓	✓	✓	✗	✗
16 (สูงสุด)	✓	✓	✓	✗	✗	✗
จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level H					
	4x3	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9
1	✓	✓	✓	✓	✓	✗
6	✓	✓	✓	✓	✗	✗
10 (สูงสุด)	✓	✓	✓	✓	✗	✗

✓ สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้

✗ ไม่สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้

เมื่อทดลองเปรียบเทียบขนาดการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูปบน QR Code ทั่วไป ใน QR Code เวอร์ชั่น 1 ระดับ Error Correction L เข้ารหัสด้วยจำนวน 6 ตัวอักษร

ตารางที่ 4-2 ตารางเปรียบเทียบขนาดการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูปบน QR Code ทั่วไป (Version 1-L)

ขนาดรูปที่ฝังบน QR Code	การฝังรูปบน QR Code ทั่วไป		การฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิต	
4 x 3 โมดูล		✓		✓
5 x 4 โมดูล		✗		✓

7 x 5 โมดูล		✗		✓
9 x 6 โมดูล		✗		✓
10 x 8 โมดูล		✗		✗

จากตารางที่ 4-2 ผลจากการเปรียบเทียบการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูปบน QR Code ทั่วไป ใน QR Code เวอร์ชั่น 1 ระดับ Error Correction L เข้ารหัสด้วยจำนวน 6 ตัวอักษร พบว่าเมื่ออ่านจากโปรแกรมอ่าน QR Code ขนาดรูปที่สามารถฝังบน QR Code ทั่วไปจะมีขนาด 4 x 3 โมดูล แต่เมื่อ ทำการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตขนาดรูปที่สามารถฝังจะมีขนาด 9 x 6 โมดูล

ข. การทดลองใน QR Code เวอร์ชั่น 3 จะใช้ QR Code ขนาด 551 x 551 พิกเซล เข้ารหัสด้วยจำนวนตัวอักษร 6 ตัวอักษร 15 ตัวอักษร 21 ตัวอักษร (ในระดับ Error Correction Q , H) 35 ตัวอักษร 47 ตัวอักษร 61 ตัวอักษรและสูงสุดที่ 77 ตัวอักษร ด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงบิตเพื่อฝังรูปภาพขนาดต่างๆ กัน คือ 5 x 4 โมดูล 7 x 5 โมดูล 9 x 6 โมดูล 10 x 8 โมดูล 12 x 9 โมดูล 14 x 10 โมดูล 15 x 11 โมดูล 15 x 13 โมดูลและ 16 x 14 โมดูล ที่ระดับ Error Correction L, M, Q และ H ซึ่งจะทำการวัดความสามารถอ่าน QR Code ด้วยโปรแกรม Zxing เพื่อหาขนาดรูปที่ฝังบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตได้และเพื่อหาขนาดของรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังบน QR Code ได้

จากข้อมูลการทดลองทั้งหมดในเวอร์ชั่น 3 จะสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-3 โดยแสดงจำนวนการเข้ารหัสตัวอักษรและขนาดของโมดูลที่สามารถฝังรูปลงใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิต ซึ่ง ✓ และ ✗ แสดงความอ่านสามารถอ่านด้วยโปรแกรมอ่าน QR Code ในระดับ Error Correction L, Error Correction M, Error Correction Q, Error Correction H โดยจากตัวอย่าง จะพบว่าที่ระดับ Error Correction L เมื่อเข้ารหัสจำนวน 6 ตัวอักษร รูปขนาด 5 x 4 โมดูล 7 x 5 โมดูล 9 x 6 โมดูล 10 x 8 โมดูล 12 x 9 โมดูล 14 x 10 โมดูลและ 15 x 11 สามารถอ่านได้ แต่รูปที่ฝังขนาด 15 x 13 โมดูลและ 16 x 14 โมดูลไม่สามารถอ่านได้

ตารางที่ 4-3 แสดงขนาดรูปที่สามารถฝังลงใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตที่มีการเข้ารหัสด้วยจำนวนตัวอักษรต่างๆ ใน QR Code เวอร์ชั่น 3

จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level L								
	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9	14x10	15x11	15x13	16x14
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
47	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
61	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
77 (สูงสุด)	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level M								
	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9	14x10	15x11	15x13	16x14
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
47	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
61 (สูงสุด)	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗
จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level Q								
	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9	14x10	15x11	15x13	16x14
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗

21	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
47 (สูงสุด)	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level H								
	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9	14x10	15x11	15x13	16x14
6	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
21	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
35 (สูงสุด)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗

✓ สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้

✗ ไม่สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้

เมื่อทดลองเปรียบเทียบขนาดการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูปบน QR Code ทั่วไป ใน QR Code เวอร์ชั่น 3 ระดับ Error Correction L เข้ารหัสด้วยจำนวน 15 ตัวอักษร

ตารางที่ 4-4 ตารางเปรียบเทียบขนาดการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูปบน QR Code ทั่วไป (Version 3-L)

ขนาดรูปที่ฝังบน QR Code	การฝังรูปบน QR Code ทั่วไป		การฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิต	
5 x 4 โมดูล		✓		✓
7 x 5 โมดูล		✓		✓

9 x 6 โมดูล		✗		✓
10 x 8 โมดูล		✗		✓
12 x 9 โมดูล		✗		✓
14 x 10 โมดูล		✗		✓
15 x 11 โมดูล		✗		✗

จากตารางที่ 4-4 ผลจากการเปรียบเทียบการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูปบน QR Code ทั่วไป ใน QR Code เวอร์ชั่น 3 ระดับ Error Correction L เข้ารหัสด้วยจำนวน 15 ตัวอักษร พบว่าเมื่ออ่านจากโปรแกรมอ่าน QR Code ขนาดรูปที่สามารถฝังบน QR Code ทั่วไปจะมีขนาด 7 x 5 โมดูลแต่เมื่อทำการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตขนาดรูปที่สามารถฝังจะมีขนาด 14 x 10 โมดูล

ค. การทดลองใน QR Code เวอร์ชั่น 6 จะใช้ QR Code ขนาด 779 x 779 พิกเซล เข้ารหัสด้วยจำนวนตัวอักษร 18 ตัวอักษร 35 ตัวอักษร 52 ตัวอักษร 84 ตัวอักษร 108 ตัวอักษร 154 ตัวอักษรและ 194 ตัวอักษร ด้วยวิธีเปลี่ยนแปลงบิตเพื่อฝังรูปภาพขนาดต่างๆกัน คือ 10 x 8 โมดูล 12 x 9 โมดูล 14 x 10 โมดูล 15 x 11 โมดูล 15 x 13 โมดูล 16 x 14 โมดูล 18 x 15 โมดูล 21 x 16 โมดูล 24 x 18 โมดูล 25 x 19 โมดูลและ 26 x 20 โมดูล ที่ระดับ Error Correction L, M Q และ H ซึ่งจะทำการวัดความสามารถอ่าน QR Code ด้วยโปรแกรม Zxing เพื่อหาขนาดรูปที่ฝังบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตได้และเพื่อหาขนาดของรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังบน QR Code ได้

โดยจากข้อมูลการทดลองทั้งหมดในเวอร์ชั่น 6 จะสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-5 โดยแสดงจำนวนการเข้ารหัสตัวอักษรและขนาดของโมดูลที่สามารถฝังรูปลงใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิต ซึ่ง ✓ และ ✗ แสดงความอ่านสามารถอ่านด้วยโปรแกรมอ่าน QR Code ในระดับ Error Correction L, Error Correction M, Error Correction Q, Error Correction H โดยจากตัวอย่าง จะพบว่าที่ระดับ Error Correction L เมื่อเข้ารหัสจำนวน 18 ตัวอักษรรูปขนาด 10 x 8 โมดูล 12 x 9 โมดูล 14 x 10 โมดูล 15 x 11 โมดูล 15 x 13 โมดูล 16 x 14 โมดูล 18 x 15 โมดูล 21 x 16 โมดูลและ 24 x 18 สามารถอ่านได้แต่รูปที่ฝังขนาด 25 x 19 โมดูลและ 26 x 20 โมดูลไม่สามารถอ่านได้

ตารางที่ 4-5 แสดงขนาดรูปที่สามารถฝังลงใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตที่มีการเข้ารหัสด้วยจำนวนตัวอักษรต่างๆ ใน QR Code เวอร์ชั่น 6

จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level L										
	10 x 8	12 x 9	14 x 10	15 x 11	15 x 13	16 x 14	18 x 15	21 x 16	24 x 18	25 x 19	26 x 20
18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
52	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
84	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
108	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
154	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
194 (สูงสุด)	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level M										
	10 x 8	12 x 9	14 x 10	15 x 11	15 x 13	16 x 14	18 x 15	21 x 16	24 x 18	25 x 19	26 x 20
18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
52	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
84	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
108	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
154 (สูงสุด)	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level Q										
	10 x 8	12 x 9	14 x 10	15 x 11	15 x 13	16 x 14	18 x 15	21 x 16	24 x 18	25 x 19	26 x 20
18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
52	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
84	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
108 (สูงสุด)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗
จำนวนตัวอักษร	Error Correction Level H										
	10 x 8	12 x 9	14 x 10	15 x 11	15 x 13	16 x 14	18 x 15	21 x 16	24 x 18	25 x 19	26 x 20
18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
52	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
84 (สูงสุด)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗

✓ สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้

✗ ไม่สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้

เมื่อทดลองเปรียบเทียบขนาดการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูปบน QR Code ทั่วไป ใน QR Code เวอร์ชั่น 6 ระดับ Error Correction L เข้ารหัสด้วยจำนวน 18 ตัวอักษร

ตารางที่ 4-6 ตารางเปรียบเทียบขนาดการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตกับการฝังรูปบน QR Code ทั่วไป (Version 6-L)

ขนาดรูปที่ฝังบน QR Code	การฝังรูปบน QR Code ทั่วไป		การฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิต	
10 x 8 โมดูล		✓		✓
12 x 9 โมดูล		✓		✓
14 x 10 โมดูล		✗		✓
15 x 11 โมดูล		✗		✓

15 x 13 โมดูล		✗		✓
16 x 14 โมดูล		✗		✓
18 x 15 โมดูล		✗		✓
21 x 16 โมดูล		✗		✓
24 x 18 โมดูล		✗		✓
25 x 19 โมดูล		✗		✗

จากตารางที่ 4-6 ผลจากการเปรียบเทียบการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิต กับการฝังรูปบน QR Code ทั่วไป ใน QR Code เวอร์ชั่น 3 ระดับ Error Correction L เข้ารหัสด้วย

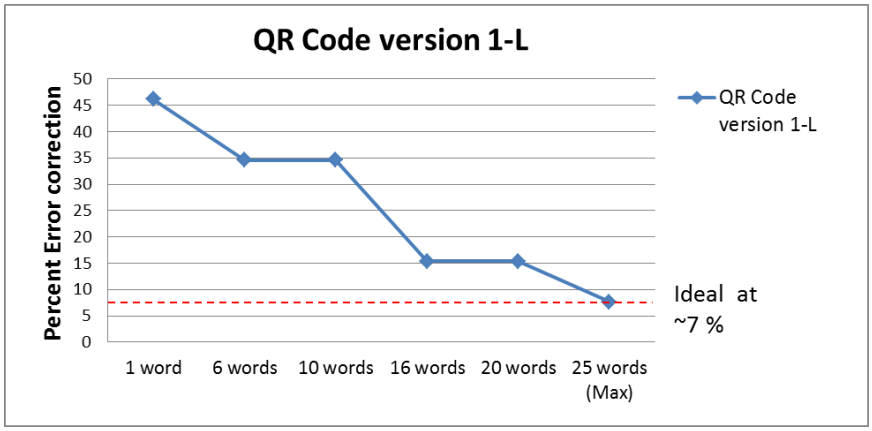
จำนวน 15 ตัวอักษร พบว่าเมื่ออ่านจากโปรแกรมอ่าน QR Code ขนาดรูปที่สามารถฝังบน QR Code ทั่วไปจะมีขนาด 7 x 5 โมดูลแต่เมื่อทำการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตขนาดรูปที่สามารถฝังจะมีขนาด 14 x 10 โมดูล

4.2.2 เปอร์เซ็นต์ Error Correction

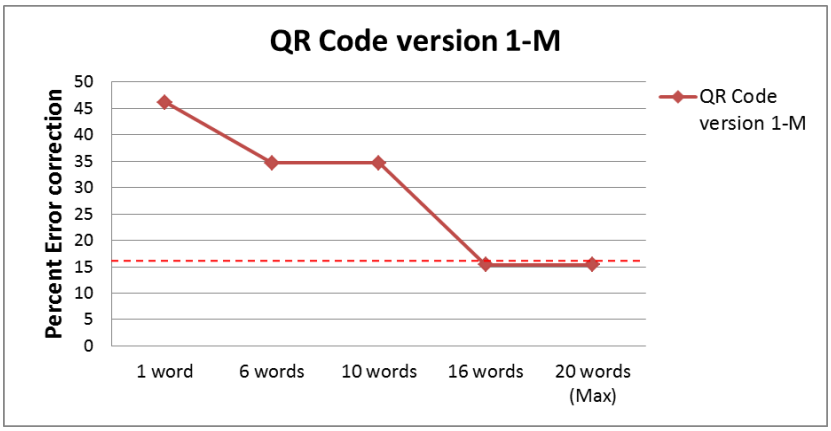
ในหัวข้อนี้เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction ของขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดของ QR Code ที่ระดับ Error Correction L, M, Q และ H และ จำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัส เมื่อฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิต ซึ่งสามารถคำนวณได้จากหัวข้อ เส้นจุดสีแดงแสดง Error Correction ในอุดมคติ (L = 7%, M = 15%, Q = 25%, H = 30%) ซึ่งเป็นผลการทดลองจากหัวข้อการทดลอง 4.2.1

ก. QR Code เวอร์ชั่น 1

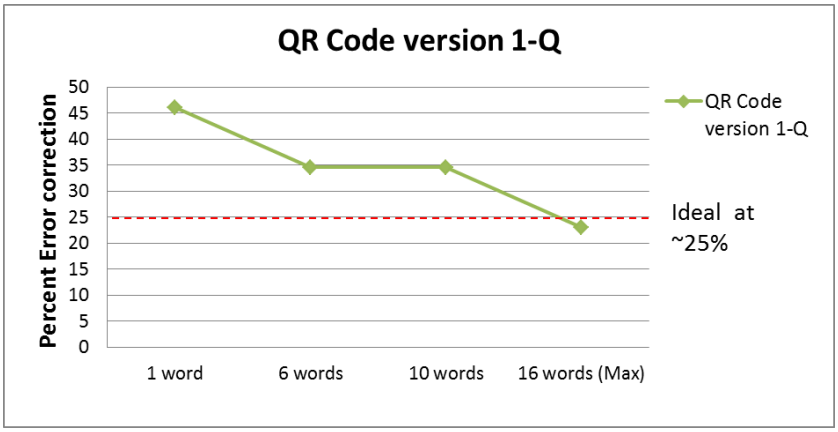
จากตัวอย่างในภาพที่ 4.1 QR Code เวอร์ชั่น 1 ระดับ Error Correction L เข้ารหัสจำนวน 1 ตัวอักษร Error Correction = 46% เข้ารหัสจำนวน 6 ตัวอักษร Error Correction = 35% เข้ารหัสจำนวน 10 ตัวอักษร Error Correction = 35% เข้ารหัสจำนวน 16 ตัวอักษร Error Correction = 15% เข้ารหัสจำนวน 20 ตัวอักษร Error Correction = 15% และเข้ารหัสจำนวน 20 ตัวอักษร Error Correction = 7%



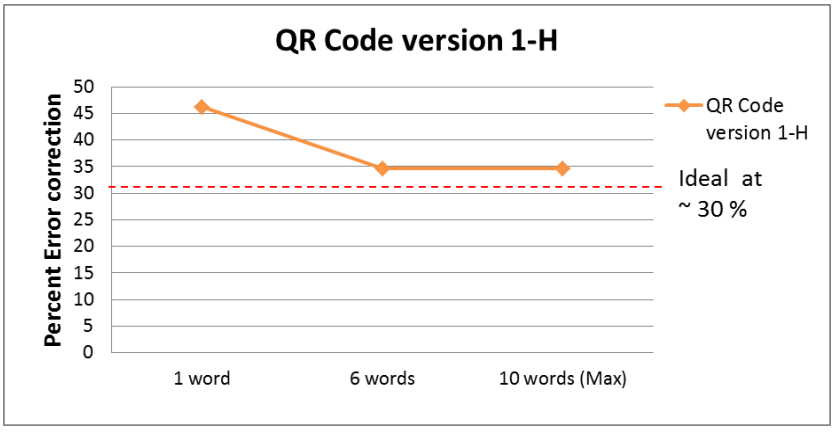
ภาพที่ 4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 1-L



ภาพที่ 4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 1-M



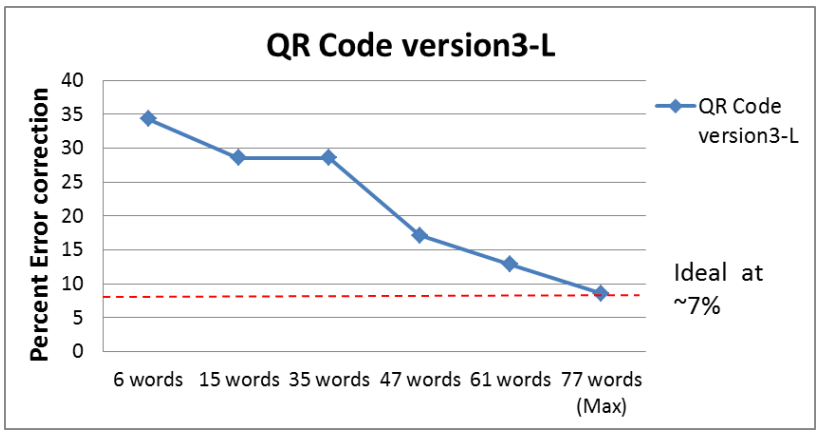
ภาพที่ 4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 1-Q



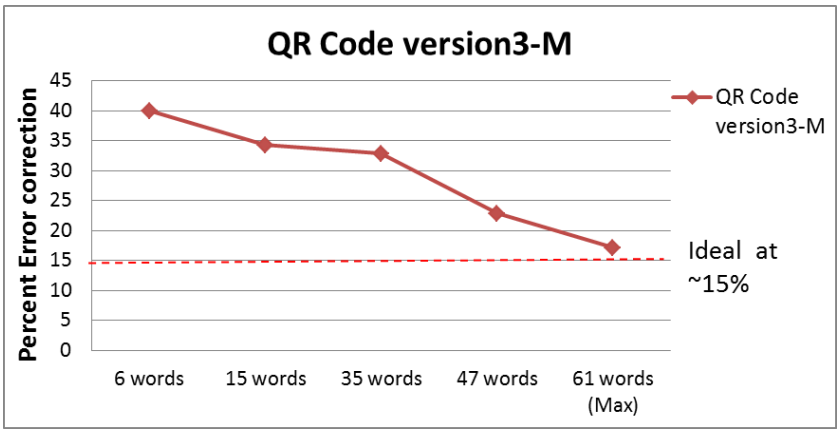
ภาพที่ 4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 1-H

ข. QR Code เวอร์ชั่น 3

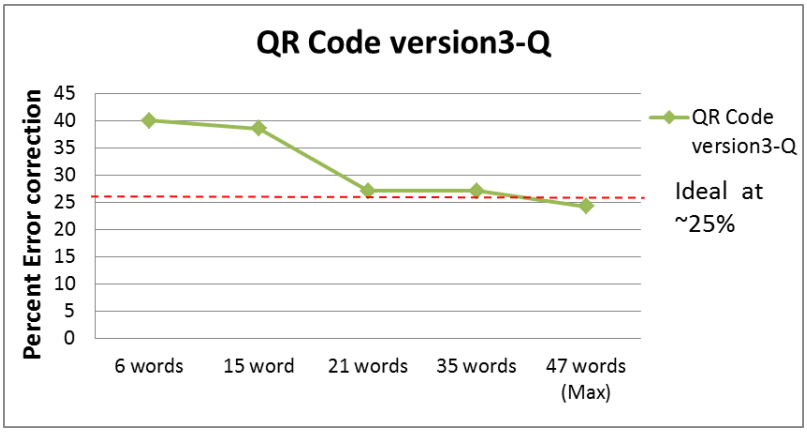
จากตัวอย่างในภาพที่ 4.2 QR Code เวอร์ชั่น 3 ระดับ Error Correction L เข้ารหัสจำนวน 6 ตัวอักษร Error Correction = 35% เข้ารหัสจำนวน 15 ตัวอักษร Error Correction = 28% เข้ารหัสจำนวน 35 ตัวอักษร Error Correction = 28% เข้ารหัสจำนวน 47 ตัวอักษร Error Correction = 17% เข้ารหัสจำนวน 61 ตัวอักษร Error Correction = 12% และเข้ารหัสจำนวน 77 ตัวอักษร Error Correction = 7%



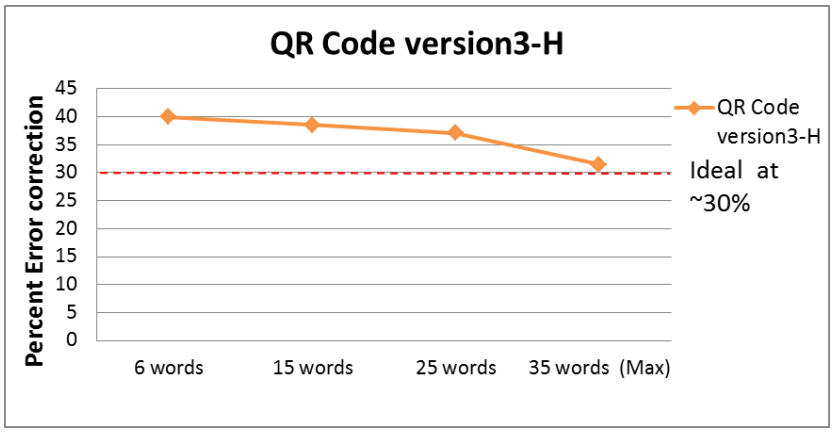
ภาพที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 3-L



ภาพที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 3-M



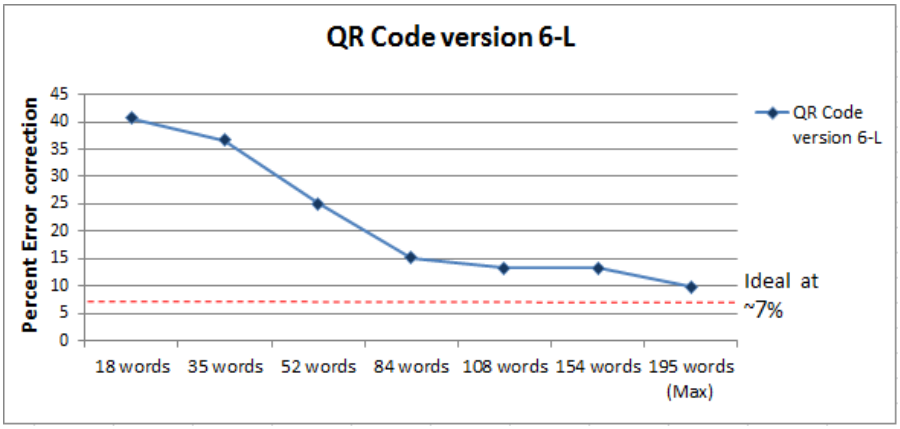
ภาพที่ 4-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 3-Q



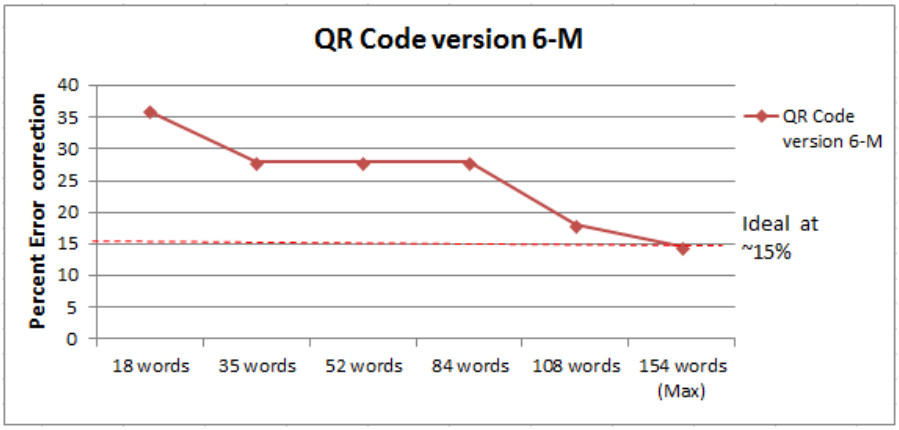
ภาพที่ 4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 3-H

ค. QR Code เวอร์ชั่น 6

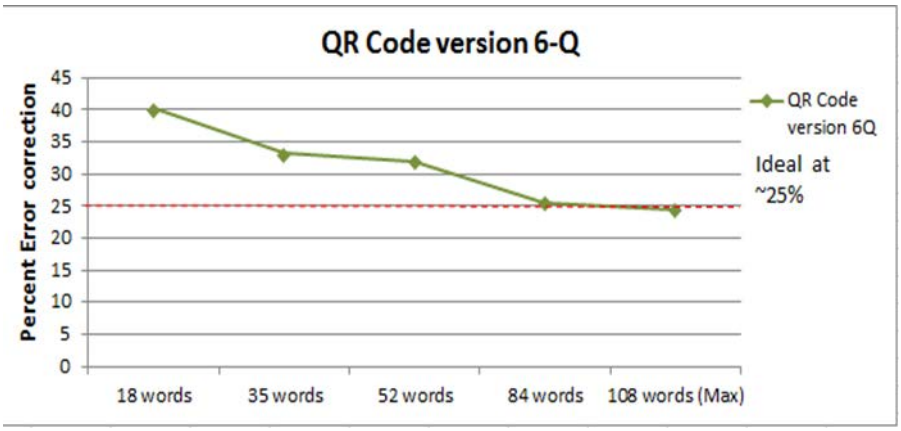
จากตัวอย่างในภาพที่ 4.3 QR Code เวอร์ชั่น 6 ระดับ Error Correction L เข้ารหัสจำนวน 18 ตัวอักษร Error Correction = 40% เข้ารหัสจำนวน 35 ตัวอักษร Error Correction = 36% เข้ารหัสจำนวน 52 ตัวอักษร Error Correction = 25% เข้ารหัสจำนวน 84 ตัวอักษร Error Correction = 15% เข้ารหัสจำนวน 108 ตัวอักษร Error Correction = 13% และเข้ารหัสจำนวน 20 ตัวอักษร Error Correction = 9%



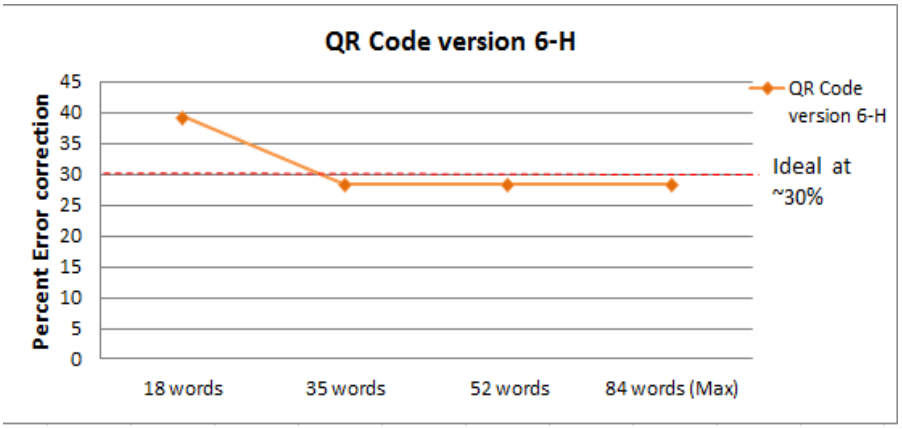
ภาพที่ 4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 6-L



ภาพที่ 4-10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 6-M



ภาพที่ 4-11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 6-Q



ภาพที่ 4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ Error Correction และจำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัสใน QR Code เวอร์ชั่น 6-H

4.2.3 การเปรียบเทียบในเวอร์ชั่น 3 กับงานวิจัยอื่น

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบความสามารถฝังรูประหว่างการฝังรูปบน QR Code ทั่วไปและการฝังรูปบน QR Code ที่มีการเปลี่ยนแปลงบิต ซึ่ง QR Code ทั่วไปจะใช้จากงานวิจัยของ Damri Samretwit และ Toshihiko Wakahara เรื่อง Measurement of Reading Characteristics of Multiplexed Image in QR Code ซึ่งจะใช้ QR Code เวอร์ชั่น 3 ที่มีขนาด 29 x 29 โมดูล เข้ารหัสจำนวน 15 ตัวอักษร โดยจะใช้ผลลัพธ์ที่สามารถฝังรูปที่ได้ขนาดใหญ่ที่สุด คือ การฝังบริเวณกลางซ้ายของ QR Code มาเปรียบเทียบโดยผลการทดลองของ Damri Samretwit และ Toshihiko Wakahara มีผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code ทั่วไปในเวอร์ชั่น 3

ระดับ Error Correction	ขนาดของรูปภาพ (โมดูล)								
	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9	14x10	15x11	15x13	16x14
H	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Q	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
M	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗
L	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗

✓ สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้ ✗ ไม่สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้

QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตที่นำมาเปรียบเทียบนั้นจะเป็น QR Code เวอร์ชั่น 3 ที่มีขนาด 29 x 29 โมดูล จำนวนตัวอักษรที่เข้ารหัสจำนวน 15 ตัวอักษร โดยจะใช้ผลลัพธ์ที่สามารถฝังรูปที่ได้ขนาดใหญ่ที่สุด เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Damri Samretwit และ Toshihiko Wakahara โดยบริเวณที่ฝังรูปจะไม่ฝังบริเวณที่เป็น Function Patterns มีผลลัพธ์ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code เวอร์ชั่น 3 ที่เปลี่ยนบิตในส่วน Pad Character

ระดับ Error Correction	ขนาดของรูปภาพ(โมดูล)								
	5x4	7x5	9x6	10x8	12x9	14x10	15x11	15x13	16x14
H	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Q	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
M	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
L	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗

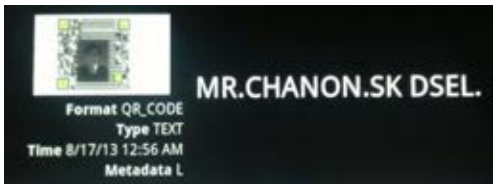
✓ สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้ ✗ ไม่สามารถอ่านด้วยเครื่องอ่าน QR Code ได้

จากตาราง 4-12 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code ทั่วไปในและตารางที่ 4-13 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code ที่เปลี่ยนบิตในส่วน Pad Character พบว่าเมื่อฝังรูปใน QR Code ที่เปลี่ยนบิตในส่วน Pad Character จะสามารถฝังรูปได้ขนาดที่ใหญ่ขึ้นและเห็นได้ชัดเจนในระดับ Error Correction L, Error Correction M, Error Correction Q และรูปที่ฝังขนาดเท่ากันในระดับ Error Correction H

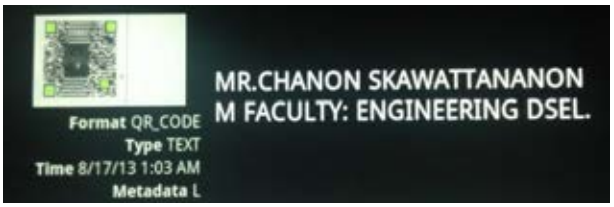
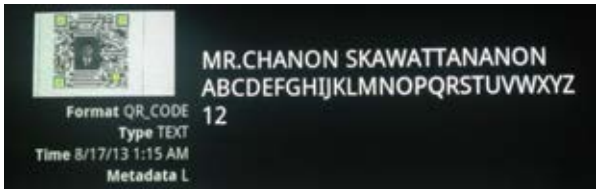
4.2.4 การสร้างเป็นนามบัตรสำหรับระบุตัวตน

ในหัวข้อนี้เป็นการสร้างนามบัตรสำหรับระบุตัวตน โดยใช้ QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิต เวอร์ชั่น 6 ขนาด 33 x 33 โมดูล เข้ารหัสด้วยระดับ Error Correction L จำนวนตัวอักษร 18 ตัวอักษรและ 52 ตัวอักษร โดยอักษรที่เข้ารหัส และ รูปภาพแตกต่างกัน เพื่อทดสอบความสามารถในการอ่านด้วยโปรแกรมอ่าน QR Code

ตารางที่ 4-9 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code เวอร์ชั่น 6 เข้ารหัสจำนวน 18 ตัวอักษร

ข้อความ	เข้ารหัสจำนวน 18 ตัวอักษร	
	รูปภาพ	QR Code เมื่อฝังรูป 24 x 18 โมดูล
MR.CHANON.SK DSEL.		
ผลลัพธ์เมื่ออ่านจาก QR Code reader		
CHULA ENGINEERING.		
ผลลัพธ์เมื่ออ่านจาก QR Code reader		
CHANON ABCDEFGHIJ.		
ผลลัพธ์เมื่ออ่านจาก QR Code reader		

ตารางที่ 4-10 ผลลัพธ์ของการฝังรูปใน QR Code เวอร์ชั่น 6 เข้ารหัสจำนวน 52 ตัวอักษร

ข้อความ	เข้ารหัสจำนวน 52 ตัวอักษร	
	รูปภาพ	QR Code เมื่อฝังรูป 18 x 15 โมดูล
MR.CHANON SKAWATTANANON M FACULTY: ENGINEERING DSEL.		
ผลลัพธ์เมื่ออ่านจาก QR Code reader		
FACULTY OF ENGINEERING CHULALONGKORN UNIVERSITY 2013		
ผลลัพธ์เมื่ออ่านจาก QR Code reader		
MR.CHANON SKAWATTANANON ABCDEFGHIJKLM NOPQRSTUVWXYZ12		
ผลลัพธ์เมื่ออ่านจาก QR Code reader		

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลสรุปงานวิจัย ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะอันจะเป็นแนวทางพัฒนาวิธีการฝังรูปภาพบน QR Code ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อไป

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับปรุงการฝังรูปในสัญลักษณ์ QR Code ด้วยวิธีเปลี่ยนแปลง Pad Charactor มีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มขนาดของรูปที่ฝังให้มีขนาดที่ใหญ่มากขึ้น โดยใช้ประโยชน์การเปลี่ยนแปลงบิตในส่วน Pad Character ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ผลต่อการถอดรหัส การทดลองพบว่าเมื่อเปลี่ยนบิตในส่วน Pad Character จะสามารถฝังรูปได้ขนาดที่ใหญ่มากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมมุติฐาน ดังผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 การทดลองแรก การวัดประสิทธิภาพความสามารถในการฝังรูปในสัญลักษณ์ QR Code เวอร์ชั่น 1 ,เวอร์ชั่น 3 และเวอร์ชั่น 6 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงบิตในส่วน Pad Characters ที่ระยะไม่เกิน 20 เซนติเมตร ทั้ง 3 เวอร์ชั่นของสัญลักษณ์ QR Code ขนาดรูปที่สามารถฝังลงบนสัญลักษณ์ QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตจะขึ้นอยู่กับจำนวนตัวอักษรที่เข้ารหัสและพื้นที่ว่างของ Pad Characters ดังผลการทดลองพบว่าเมื่อเข้ารหัสจำนวนตัวอักษรจำนวนอักษรลดลง จะมีผลทำให้สามารถใส่รูปที่มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจากมาตรฐานการฝังรูปทั่วไป และสามารถอ่านด้วยเครื่องอ่านสัญลักษณ์ QR Code ทั่วไปได้

การทดลองที่สอง การวัดเปอร์เซ็นต์ Error correction (ในระดับ L, M, Q และ H) ในสัญลักษณ์ QR Code เวอร์ชั่น 1 ,เวอร์ชั่น 3 และเวอร์ชั่น 6 เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงบิตในส่วน Pad Characters เปรียบเทียบกับค่าเปอร์เซ็นต์ Error correction ในอุดมคติของ QR Code ทั่วไป (L = 7%, M = 15%, Q = 25% และ H = 30%) โดยการคำนวณเปอร์เซ็นต์ Error correction ของ QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตจะใช้รูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังได้ในแต่ละจำนวนอักษร ซึ่งเปอร์เซ็นต์ Error correction ของ QR Code ที่เปลี่ยนแปลงบิตจะขึ้นอยู่กับจำนวนอักษรที่ทำการเข้ารหัสและขนาดรูปที่ฝังลงบน QR Code (โดยค่า Error Correction สามารถคำนวณได้จากขนาดรูปที่ฝังบน QR Code ดังหัวข้อ 2.1.6) ผลการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์ Error correction จะมีแนวโน้มตามจำนวนอักษร และขนาดรูปที่ทำการฝังกล่าวคือ จำนวนตัวอักษรที่น้อยลงจะทำให้

สามารถฝังรูปที่มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นและทำให้เปอร์เซ็นต์ Error Correction เพิ่มขึ้นตาม โดยจะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ Error Correction จะมากกว่าในอุดมคติในการเข้ารหัสจำนวนตัวอักษรที่น้อย และเมื่อเพิ่มตัวอักษรมากขึ้น เปอร์เซ็นต์ Error Correction จะลดลงจนเข้าใกล้ค่าในอุดมคติ

การทดลองที่สาม เมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดรูปที่สามารถฝังบนสัญลักษณ์ QR Code ในการทดลองของ Damri and Toshihiko โดยใช้ขนาดรูปที่ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของเรา โดยทำการเข้ารหัสจำนวน 15 ตัวอักษรในสัญลักษณ์ QR Code เวอร์ชั่น 3 ยกเว้นฝังรูปในส่วน Finder pattern พบว่าเมื่อทำการเปรียนแปลงบิตจะทำให้สามารถฝังรูปในระดับ Error correction ในระดับ L, M, Q ได้ขนาดใหญ่กว่า แต่ในระดับ H ขนาดที่ฝังรูปจะมีขนาดเท่ากัน

การทดลองที่สี่ เป็นการสร้างเป็นนามบัตรสำหรับระบุตัวตน เป็นการทดลองเข้ารหัสสัญลักษณ์ QR Code ที่มีการเปลี่ยนแปลงบิตในเวอร์ชั่น 6 โดยทดลองทำการเปลี่ยนแปลงข้อความและรูปภาพเพื่อดูความสามารถการอ่านสัญลักษณ์ QR Code ด้วยโปรแกรมอ่าน ได้แก่ Zxing QR Droid และ Scan พบว่า เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงข้อความและรูปภาพ พบว่าจะสามารถอ่านสัญลักษณ์ QR Code ได้ปกติ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง วิธีการปรับปรุงการเข้ารหัสสัญลักษณ์ QR Code ในส่วน Pad Character ถ้าต้องการการฝังรูปบน QR Code ที่เปลี่ยนบิตสิ่งที่ควรพิจารณา

1. พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงบิตในส่วน Pad Character โดยพื้นที่บิตที่เปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับ จำนวนตัวอักษรที่ทำการเข้ารหัส เมื่อทำการเข้ารหัสจำนวนตัวอักษรน้อยจะทำให้พื้นที่ Pad Character มากทำให้สามารถทำการเลือกเปลี่ยนแปลงบิตและฝังรูปได้ขนาดที่ใหญ่เพิ่มขึ้น

2. รูปที่ทำการปรับควรเข้มแสงควรจะปรับให้มีความเข้มแสงที่เข้มเพิ่มขึ้นจากรูปปกติ

การปรับปรุงการเข้ารหัสสัญลักษณ์ QR Code ในส่วน Pad Character ยังมีข้อจำกัดบางประการควรจะมีการปรับปรุงแก้ไขและการศึกษาต่อไปเพื่อทำให้งานมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น คือ สภาวะของแสงที่แตกต่างกันในแต่ละสถานที่ ทำให้ความสามารถการอ่านสัญลักษณ์ QR Code เปลี่ยนแปลงแตกต่างไป ดังนั้นควรจะมีเครื่องมือวัดแสงที่เป็นมาตรฐานต่อไปในอนาคต

รายการอ้างอิง

[1] Denso wave incorporated. About QR Code [Online]. 1994. Available from : http://www.denso-wave.com/en/adcd/ [2012, October 15]

[2] QR Code. Case Study [Online]. Available from : http://www.qrcode.com/en/app-prod.html [2012, October 15]

[3] Tan Jin Soon. 2008. QR Code. Synthesis Journal [online]. Available from: http://www.itsc.org.sg/pdf/synthesis08/Three_QR_Code.pdf [2012, October 15]

[4] ISO/IEC. Information technology-Automatic identification and data capture techniques-Bar code symbology-QR Code. First Edition. 18004. Switzerland: ISO copyright office, 2000.

[5] ISO/IEC. Information technology-Automatic identification and data capture techniques-Bar code symbology-QR Code. First Edition. 18004. Switzerland: ISO copyright office, 2006.

[6] Makhapu, P., Sangthongpattana, K.,Jantarapatin, S. and Mitrpant, C. The embedding of Thai in QR Code. Proceedings of the IEEE International conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON) (May 2011) : 516-519.

[7] Culumovic Zupanovic, I., and Tijan, E. QR Codes as a time management tool in m-learning. Proceedings of the IEEE International conference on MIPRO 35 (May 2012) : 1470-1474.

[8] Costa-Montenegro, E., Gonzalez-Castano, F.J., Conde-Lagoa, D., Barragans-Martinez, A.B., Rodriguez- Hernandez, P.S., and Gil-Castineira, F. QR-Maps: An efficient tool for indoor user location based on QR-Codes and Google maps. Proceedings of the IEEE International conference on Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) (Jan 2011) : 928-932.

[9] ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์. การประมวลผลรูปดิจิตอลด้วย Matlab (Digital image processing using Matlab). ตุลาคม 2550.

[10] Barcode Scanner. QR Code Reader [Online]. Available from : https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.zxing.client.android&feature=search_result#?t=W251bGwsMSwxLDEsImNvbS5nb29nbGUuenhpbmcuY2xpZW 50 LmFuZHJvaWQiXQ [2012, October 15]

[11] RACO .Generator QR Code by RACO Industries [Online]. Available from : http://www.racoindustries.com/barcodegenerator/2d/qr-code.aspx [2012, October 15]

[12] สุพพัต รุ่งเรืองศิลป์. การพัฒนาคิวอาร์โค้ดร่วมกับลายน้ำดิจิตอลเพื่อซ่อนข้อมูล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.

[13] นริศ หนูหอม. การฝังลายน้ำอเนกประสงค์บนรูปภาพดิจิตอลเพื่อตรวจสอบรับรองความเป็นต้นฉบับและพิสูจน์ความเป็นเจ้าของลิขสิทธิ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

[14] ประทาน โชติพันธุ์บัณฑิตย์. การซ่อนข้อมูลและความมั่นคงสำหรับเอกสารสิ่งพิมพ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.

[15] Lumini, A., and Maio, D. Adaptive positioning of a visible watermark in a digital image. Proceedings of the IEEE International conference on Multimedia and Expo (June 2004) : 967.

[16] Wakahara, T., Yamamoto, N.,and Ochi.H. Image Processing of Dotted Picture in the QR Code of Cellular Phone. Proceedings of the IEEE International conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC) (Jan 2010) : 454-458.

[17] QR Tutorial. Generating your Binary String [Online]. Available from : http://www.thonky.com/qr-code-tutorial/part-1-encode-data [2012, October 15]

[18] Yue Liu and Mingjun Liu.Automatic Recognition Algorithm of Quick Response Code Based on Embedded System. Proceedings of the IEEE International conference on Intelligent Systems Design and Applications (Oct 2006) : 783-788.

[19] Ono, S., Morinaga, K.,Nakayama, S.Two-dimensional barcode decoration based on real-coded genetic Algorithm. Proceedings of the IEEE International conference on Evolutionary Computation (June 2008) : 1068-1073

[20] Ono, S., Nakayama, S. A system for decorating QR Code with facial image based on Interactive Evolutionary Computation and Case-Based Reasoning. Proceedings of the IEEE International conference on Nature and Biologically Inspired Computing (NaBIC) (Dec 2010) : 401-406.

[21] T. Wakahara, N. Yamamoto and H. Ochi. Image Processing of Dotted Picture in QR Code of Cellular Phones. IEICE Technical Report, LOIS2010-65 (March 2011) : 1-5.

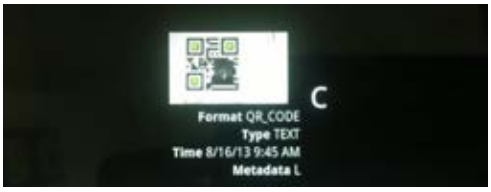
[22] Wakahara, T.Yamamoto, N. Image Processing of 2-Dimensional Barcode. Proceedings of the IEEE International conference on Network-Based Information Systems (NBiS) (Sep 2011) : 484-490.

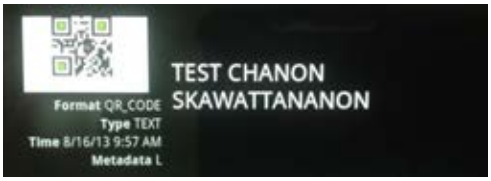
[23] Samretwit, D.Wakahara, T.Measurement of Reading Characteristics of Multiplexed Image in QR Code. Proceedings of the IEEE International conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems (INCoS) (2011) : 552-557.

ภาคผนวก

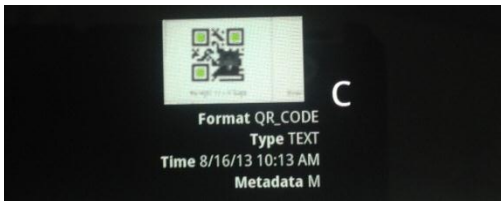
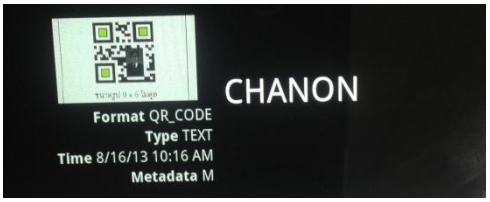
ภาคผนวก ก
แสดงผลการทดลองการฝังรูปเพิ่มเติม

ตาราง ก-1 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัส จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 1-L

ลำดับ	รูปที่ใช้ฝังบน QR Code	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : C (1 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 10 x 8 โมดูล	 Error Correction (%) = 46.15%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON (6 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 9 x 6 โมดูล	Error Correction (%) = 34.62%

	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON1234 (10 ตัวอักษร)	
3.	ขนาดรูป 9 x 6 โมดูล	Error Correction (%) = 34.62%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANONSK:CHULA12 (16 ตัวอักษร)	
4.	ขนาดรูป 5 x 4 โมดูล	Error Correction (%) = 15.38%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON SKAWATTANANON (20 ตัวอักษร)	
5.	ขนาดรูป 5 x 4 โมดูล	Error Correction (%) = 15.38%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : TEST CHANON SKAWATTANANON (25 ตัวอักษร) (เข้ารหัสเต็มพื้นที่ Data Codeword)	
6.	ขนาดรูป 4 x 3 โมดูล	 Error Correction (%) = 7.69%

ตารางที่ ก-2 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 1-M

ลำดับ	**รูปที่ใช้ฝังบน QR Code**	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	**เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing**
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : C (1 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 10 x 8 โมดูล	 Error Correction (%) = 46.15%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON (6 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 9 x 6 โมดูล	 Error Correction (%) = 34.62%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON1234 (10 ตัวอักษร)	
3.	ขนาดรูป 9 x 6 โมดูล	Error Correction (%) = 34.62%

	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANONSK:CHULA12 (16 ตัวอักษร)	
4.	ขนาดรูป 7 x 5 โมดูล	Error Correction (%) = 15.38%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON SKAWATTANANON (20 ตัวอักษร) (เข้ารหัสเต็มพื้นที่ Data Codeword)	
5.	ขนาดรูป 7 x 5 โมดูล	Error Correction (%) = 15.38%

ตารางที่ ก-3 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 1-Q

ลำดับ	รูปที่ใช้ฝังบน QR Code	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : C (1 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 10 x 8 โมดูล	Error Correction (%) = 46.15%

<table>
<tr><td></td><td>QR Code เมื่อทำการฝังรูป</td><td>เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON (6 ตัวอักษร)</td></tr>
<tr><td>2.</td><td>
ขนาดรูป 9 x 6 โมดูล</td><td>

Error Correction (%) = 34.62%</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON1234 (10 ตัวอักษร)</td></tr>
<tr><td>3.</td><td>
ขนาดรูป 9 x 6 โมดูล</td><td>

Error Correction (%) = 34.62%</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANONSK:CHULA12 (16 ตัวอักษร)
(เข้ารหัสเต็มพื้นที่ Data Codeword)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">4.</td><td>QR Code เมื่อทำการฝังรูป</td><td>เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing</td></tr>
<tr><td>
ขนาดรูป 7 x 5 โมดูล</td><td>

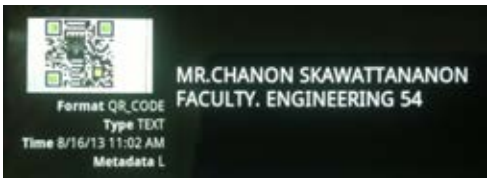
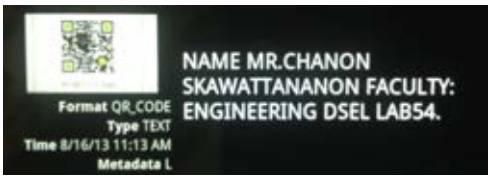
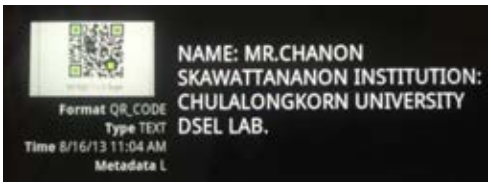
Error Correction (%) = 23.08%</td></tr>
</table>

ตารางที่ ก-4 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 1-H

ลำดับ	รูปที่ใช้ฝังบน QR Code	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : C (1 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 10 x 8 โมดูล	Error Correction (%) = 46.15%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON (6 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 9 x 6 โมดูล	Error Correction (%) = 34.62%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON1234 (10 ตัวอักษร) (เข้ารหัสเต็มพื้นที่ Data Codeword)	
3.	ขนาดรูป 9 x 6 โมดูล	Error Correction (%) = 34.62%

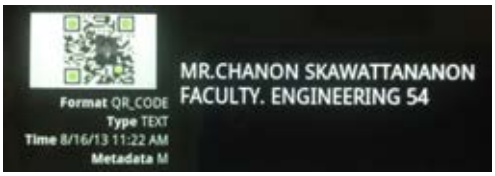
ตารางที่ ก-5 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 3-L

ลำดับ	รูปที่ใช้ฝังบน QR Code	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON (6 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 15 x 11 โมดูล	Error Correction (%) = 37.14%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : WWW.CHULA.AC.TH (15 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 14 x 10 โมดูล	Error Correction (%) = 31.43%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON DSEL. LAB54 (35 ตัวอักษร)	
3.	ขนาดรูป 14 x 10 โมดูล	Error Correction (%) = 32.86%

	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON Faculty. ENGINEERING 54 (47 ตัวอักษร)	
4.	ขนาดรูป 10 x 8 โมดูล	 Error Correction (%) = 20%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : NAME MR.CHANON SKAWATTANANON FACULTY: ENGINEERING DSEL LAB54. (61 ตัวอักษร)	
5.	ขนาดรูป 9 x 6 โมดูล	 Error Correction (%) = 12.86%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : Name: MR.CHANON SKAWATTANANON Institution: CHULALONGKORN UNIVERSITY DSEL LAB. (77 ตัวอักษร)	
6.	ขนาดรูป 7 x 5 โมดูล	 Error Correction (%) = 8.57%

ตารางที่ ก-6 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 3-M

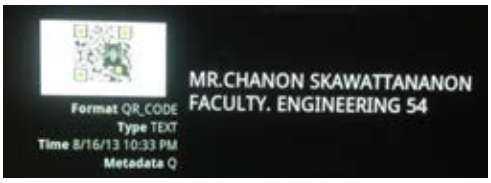
ลำดับ	รูปที่ใช้ฝังบน QR Code	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON (6 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 15 x 13 โมดูล	Error Correction (%) = 40%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : WWW.CHULA.AC.TH (15 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 15 x 11 โมดูล	Error Correction (%) = 34.29%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON DSEL. LAB54 (35 ตัวอักษร)	
3.	ขนาดรูป 14 x 10 โมดูล	Error Correction (%) = 28.57%

	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON Faculty. ENGINEERING 54 (47 ตัวอักษร)	
4.	ขนาดรูป 12 x 9 โมดูล	 Error Correction (%) = 27.14%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : NAME MR.CHANON SKAWATTANANON FACULTY: ENGINEERING DSEL LAB54. (61 ตัวอักษร)	
5.	ขนาดรูป 10 x 8 โมดูล	Error Correction (%) = 17.14%

ตารางที่ ก-7 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 3-Q

ลำดับ	รูปที่ใช้ฝังบน QR Code	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON (6 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 16 x 14 โมดูล	Error Correction (%) = 40%

	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : WWW.CHULA.AC.TH (15 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 15 x 13 โมดูล	Error Correction (%) = 38.57%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON SKAWATTANANON. (21 ตัวอักษร)	
3.	ขนาดรูป 14 x 10 โมดูล	Error Correction (%) = 27.14%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON DSEL. LAB54 (35 ตัวอักษร)	
4.	ขนาดรูป 14 x 10 โมดูล	Error Correction (%)= 27.14%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON Faculty. ENGINEERING 54 (47 ตัวอักษร)	

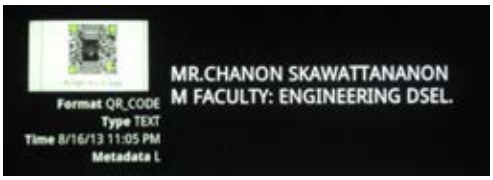
5.	ขนาดรูป 12 x 9 โมดูล	 Error Correction (%) = 21.42%

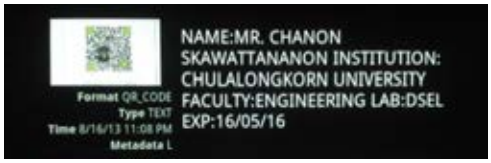
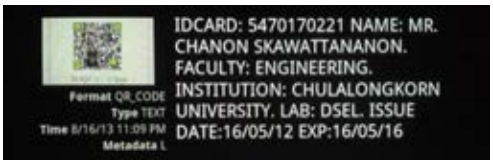
ตารางที่ ก-8 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 3-H

ลำดับ	**รูปที่ใช้ฝังบน QR Code**	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	**เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing**
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON (6 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 16 x 14 โมดูล	Error Correction (%) = 40%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : WWW.CHULA.AC.TH (15 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 15 x 13 โมดูล	Error Correction (%) = 38.57%

	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : CHANON SKAWATTANANON DSEL. (25 ตัวอักษร)	
3.	ขนาดรูป 15 x 13 โมดูล	Error Correction (%) = 37.14%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON DSEL. LAB54 (35 ตัวอักษร)	
4.	ขนาดรูป 15 x 11 โมดูล	Error Correction (%) 32.86%

ตารางที่ ก-9 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 6-L

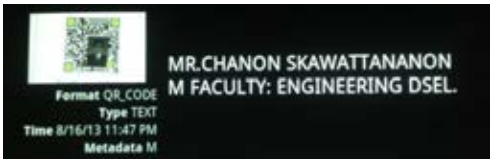
ลำดับ	รูปที่ใช้ฝังบน QR Code	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON.SK DSEL. (18 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 25 x 19 โมดูล	Error Correction (%) = 40.70%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON DSEL. LAB54 (35 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 24 x 18 โมดูล	Error Correction (%) = 36.63%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON M FACULTY: ENGINEERING DSEL. (52 ตัวอักษร)	
3.	ขนาดรูป 18 x 15 โมดูล	 Error Correction (%) = 25%

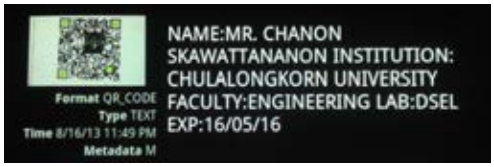
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON FACULTY. ENGINEERING54 INSTITUTION: CHULALONGKORN UNIVERSITY (84 ตัวอักษร)	
4.	 ขนาดรูป 15 x 11 โมดูล	 Error Correction (%) = 15.12%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : NAME:MR. CHANON SKAWATTANANON FACULTY:ENGINEERING INSTITUTION:CHULALONGKORN UNIVERSITY LAB:DSEL EXP:16/05/16 (108 ตัวอักษร)	
5.	 ขนาดรูป 14 x 10 โมดูล	 Error Correction (%) = 13.37%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : IDCARD: 5470170221 NAME: MR.CHANON SKAWATTANANON. FACULTY: ENGINEERING. INSTITUTION: CHULALONGKORN UNIVERSITY. LAB: DSEL. ISSUE DATE:16/05/12 EXP:16/05/16 (154 ตัวอักษร)	
6.	 ขนาดรูป 14 x 10 โมดูล	 Error Correction (%) = 13.37%

	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : IDCARD:5470170221 NAME:MR.CHANON SKAWATTANANON. FACULTY:ENGINEERING. MAJOR:COMPUTER ENGINEERING. INSTITUTION:CHULALONGKORN UNIVERSITY BANGKOK THAILAND. LAB: DSEL. ISSUE DATE:16/05/12 EXP:16/05/16 (195 ตัวอักษร)	
7.	ขนาดรูป 12 x 9 โมดูล	Error Correction (%) = 9.88%

ตารางที่ ก-10 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 6-M

ลำดับ	รูปที่ใช้ฝังบน QR Code	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON.SK DSEL. (18 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 24 x 18 โมดูล	Error Correction (%) = 36.05%

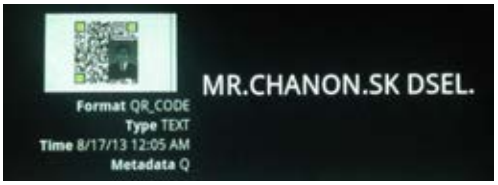
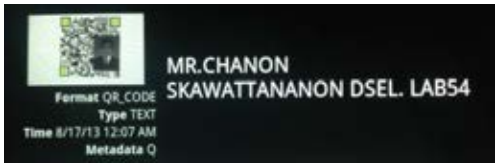
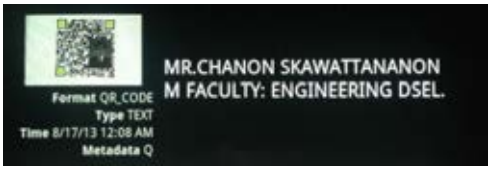
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON DSEL. LAB54 (35 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 21 x 16 โมดูล	Error Correction (%) = 27.91%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON M FACULTY: ENGINEERING DSEL. (52 ตัวอักษร)	
3.	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ขนาดรูป 21 x 16 โมดูล	 Error Correction (%)= 27.91%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON FACULTY. ENGINEERING54 INSTITUTION: CHULALONGKORN UNIVERSITY (84 ตัวอักษร)	
4.	ขนาดรูป 21 x 16 โมดูล	Error Correction (%) = 27.91%

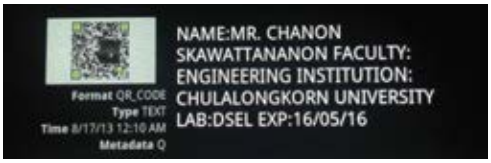
<table>
<tr><td></td><td>QR Code เมื่อทำการฝังรูป</td><td>เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : NAME:MR. CHANON SKAWATTANANON FACULTY:ENGINEERING INSTITUTION:CHULALONGKORN UNIVERSITY LAB:DSEL EXP:16/05/16 (108 ตัวอักษร)</td></tr>
<tr><td>5.</td><td>
ขนาดรูป 15 x 13 โมดูล</td><td> 

Error Correction (%) = 18.02%</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : IDCARD: 5470170221 NAME: MR.CHANON SKAWATTANANON. FACULTY: ENGINEERING. INSTITUTION: CHULALONGKORN UNIVERSITY. LAB: DSEL. ISSUE DATE:16/05/12 EXP:16/05/16 (154 ตัวอักษร)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">6.</td><td>QR Code เมื่อทำการฝังรูป</td><td>เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing</td></tr>
<tr><td>
ขนาดรูป 15 x 13 โมดูล</td><td>

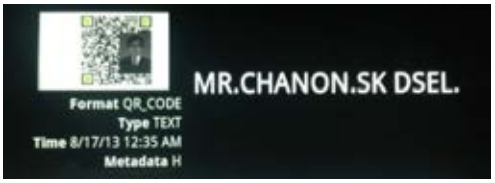
Error Correction (%) = 14.53%</td></tr>
</table>

ตารางที่ ก-11 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 6-Q

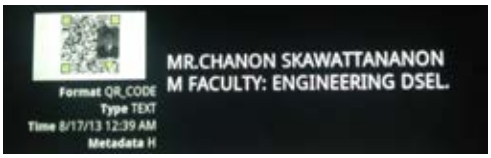
ลำดับ	รูปที่ใช้ฝังบน QR Code	
	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON.SK DSEL. (18 ตัวอักษร)	
1.	ขนาดรูป 25 x 19 โมดูล	 Error Correction (%) = 40.12%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON DSEL. LAB54 (35 ตัวอักษร)	
2.	ขนาดรูป 24 x 18 โมดูล	 Error Correction (%) = 33.14%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON M FACULTY: ENGINEERING DSEL. (52 ตัวอักษร)	
3.	ขนาดรูป 21 x 16 โมดูล	 Error Correction (%) = 31.98%

	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON FACULTY. ENGINEERING54 INSTITUTION: CHULALONGKORN UNIVERSITY (84 ตัวอักษร)	
4.	ขนาดรูป 18 x 15 โมดูล	Error Correction (%) = 25.58%
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : NAME:MR. CHANON SKAWATTANANON FACULTY:ENGINEERING INSTITUTION:CHULALONGKORN UNIVERSITY LAB:DSEL EXP:16/05/16 (108 ตัวอักษร)	
5.	ขนาดรูป 18 x 15 โมดูล	 Error Correction (%) = 24.42%

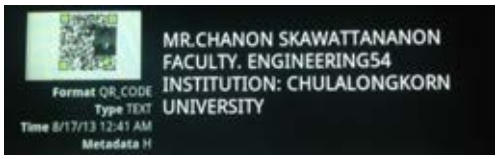
ตารางที่ ก-12 แสดงขนาดรูปที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถฝังใน QR Code ที่เปลี่ยนแปลงการเข้ารหัสที่จำนวนตัวอักษรต่างๆ ในระดับ Error Correction 6-H

<table>
<tr><th>ลำดับ</th><th colspan="2">รูปที่ใช้ฝังบน QR Code</th></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td>QR Code เมื่อทำการฝังรูป</td><td>เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing</td></tr>
<tr><td colspan="2">ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON.SK DSEL. (18 ตัวอักษร)</td></tr>
<tr><td>1.</td><td>
ขนาดรูป 25 x 19 โมดูล</td><td> 

Error Correction (%) = 39.53%</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON DSEL. LAB54 (35 ตัวอักษร)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">2.</td><td>QR Code เมื่อทำการฝังรูป</td><td>เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing</td></tr>
<tr><td>
ขนาดรูป 21 x 16 โมดูล</td><td>

Error Correction (%) = 28.49%</td></tr>
<tr><td colspan="2">ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON M FACULTY: ENGINEERING DSEL. (52 ตัวอักษร)</td></tr>
<tr><td>3.</td><td>
ขนาดรูป 21 x 16 โมดูล</td><td> 

Error Correction (%) = 28.49%</td></tr>
</table>

	QR Code เมื่อทำการฝังรูป	เมื่อทดสอบอ่านด้วยโปรแกรม Zxing
	ตัวอักษรที่ใช้ในการเข้ารหัส : MR.CHANON SKAWATTANANON FACULTY. ENGINEERING54 INSTITUTION: CHULALONGKORN UNIVERSITY (84 ตัวอักษร)	
4.	ขนาดรูป 24 x 18 โมดูล	 Error Correction (%) = 28.49%

ภาคผนวก ข

แสดงตาราง INTERNATIONAL STANDARD ISO/IEC18004

ตาราง ข-1 Codeword capacity of all versions of QR Code 2005

Version	No.of Modules/ side (A)	Function pattern modules (B)	Format and version Information modules(C)	Data modules Except (D=A^2-B-C)	Data capacity (Codewords)[a] (E)	Remainder Bits
M1	11	70	15	36	5	0
M2	13	74	15	80	10	0
M3	15	78	15	132	17	0
M4	17	82	15	192	24	0
1	21	202	31	208	26	0
2	25	235	31	359	44	7
3	29	243	31	567	70	7
4	33	251	31	807	100	7
5	37	259	31	1,079	134	7
6	41	267	31	1,383	172	7
7	45	390	67	1,568	196	0
8	49	398	67	1,936	242	0
9	53	406	67	2,336	292	0
10	57	414	67	2,768	346	0
11	61	422	67	3,232	404	0
12	65	430	67	3,728	466	0
13	69	438	67	4,256	532	0
14	73	611	67	4,651	581	3
15	77	619	67	5,243	655	3
16	81	627	67	5,867	733	3
17	85	635	67	6,523	815	3

18	89	643	67	7,211	901	3
19	93	651	67	7,931	991	3
20	97	659	67	8,683	1,085	3
21	101	882	67	9,252	1,156	4
22	105	890	67	10,068	1,258	4
23	109	898	67	10,916	1,364	4
24	113	906	67	11,796	1,474	4
25	117	914	67	12,708	1,588	4
26	121	922	67	13,652	1,706	4
27	125	930	67	14,628	1,828	4
28	129	1 203	67	15,371	1,921	3
29	133	1 211	67	16,411	2,051	3
30	137	1 219	67	17,483	2,185	3
31	141	1 227	67	18,587	2,323	3
32	145	1 235	67	19,723	2,465	3
33	149	1 243	67	20,891	2,611	3
34	153	1 251	67	22,091	2,761	3
35	157	1 574	67	23,008	2,876	0
36	161	1 582	67	24,272	3,034	0
37	165	1 590	67	25,568	3,196	0
38	169	1 598	67	26,896	3,362	0
39	173	1 606	67	28,256	3,532	0
40	177	1 614	67	29,648	3,706	0

a All codewords are 8 bits in length.

ตาราง ข-2 Error correction characteristics for QR Code 2005

Version	Total number of codewords	Error correction level	Number of error correction codewords	Value of p	Number of error correction blocks	Error correction code per block (c, k, r)[a]
M1	5	Error detection only	2	2	1	(5,3,0)
M2	10	L	5	3	1	(10,5,1)
		M	6	2	1	(10,4,2)
M3	17	L	6	2	1	(17,11,2)
		M	8		1	(17,9,4)
M4	24	L	8	2	1	(24,16,3)
		M	10	0	1	(24,14,5)
		Q	14	0	1	(24,10,7)
1	26	L	7	3	1	(26,19,2)
		M	10	2	1	(26,16,4)
		Q	13	1	1	(26,13,6)
		H	17	1	1	(26,9,8)
2	44	L	10	2	1	(44,34,4)
		M	16	0	1	(44,28,8)
		Q	22	0	1	(44,22,11)
		H	28	0	1	(44,16,14)
3	70	L	15	1	1	(70,55,7)
		M	26	0	1	(70,44,13)
		Q	36	0	2	(35,17,9)
		H	44	0	2	(35,13,11)
4	100	L	20	0	1	(100,80,10)
		M	36		2	(50,32,9)
		Q	52		2	(50,24,13)

		H	64		4	(25,9,8)
5	134	L	26	0	1	(134,108,13)
		M	48		2	(67,43,12)
		Q	72		2	(33,15,9)
					2	(34,16,9)
		H	88		2	(33,11,11)
					2	(34,12,11)
6	172	L	36	0	2	(86,68,9)
		M	64		4	(43,27,8)
		Q	96		4	(43,19,12)
		H	112		4	(43,15,14)
7	196	L	40	0	2	(98,78,10)
		M	72		4	(49,31,9)
		Q	108		2	(32,14,9)
					4	(33,15,9)
		H	130		4	(39,13,13)
					1	(40,14,13)
8	242	L	48	0	2	(121,97,12)
		M	88		2	(60,38,11)
					2	(61,39,11)
		Q	132		4	(40,18,11)
					2	(41,19,11)
		H	156		4	(40,14,13)
					2	(41,15,13)
9	292	L	60	0	2	(146,116,15)
		M	110		3	(58,36,11)
					2	(59,37,11)
		Q	160		4	(36,16,10)
					4	(37,17,10)

		H	192		4	(36,12,12)
					4	(37,13,12)
		L	72		2	(86,68,9)
					2	(87,69,9)
		M	130		4	(69,43,13)
10	346			0	1	(70,44,13)
		Q	192		6	(43,19,12)
					2	(44,20,12)
		H	224		6	(43,15,14)
					2	(44,16,14)
		L	80		4	(101,81,10)
		M	150		1	(80,50,15)
					4	(81,51,15)
11	404	Q	224	0	4	(50,22,14)
					4	(51,23,14)
		H	264		3	(36,12,12)
					8	(37,13,12
		L	96		2	(116,92,12)
					2	(117,93,12)
		M	176		6	(58,36,11)
12	466			0	2	(59,37,11)
		Q	260		4	(46,20,13)
					6	(47,21,13)
		H	308		7	(42,14,14)
					4	(43,15,14)
		L	104		4	(133,107,13)
		M	198		8	(59,37,11)
					1	(60,38,11)
13	532	Q	288	0	8	(44,20,12)

		H	352		4 12 4	(45,21,12) (33,11,11) (34,12,11)
14	581	L M Q H	120 216 320 384	0	3 1 4 5 11 5 11 5	(145,115,15) (146,116,15) (64,40,12) (65,41,12) (36,16,10) (37,17,10) (36,12,12) (37,13,12)
15	655	L M Q H	132 240 360 432	0	5 1 5 5 5 7 11 7	(109,87,11) (110,88,11) (65,41,12) (66,42,12) (54,24,15) (55,25,15) (36,12,12) (37,13,12)
16	733	L M Q H	144 280 408 480	0	5 1 7 3 15 2 3 13	(122,98,12) (123,99,12) (73,45,14) (74,46,14) (43,19,12) (44,20,12) (45,15,15) (46,16,15)
		L	168		1	(135,107,14)

					5	(136,108,14)
		M	308		10	(74,46,14)
17	815			0	1	(75,47,14)
		Q	448		1	(50,22,14)
					15	(51,23,14)
		H	532		2	(42,14,14)
					17	(43,15,14)
		L	180		5	(150,120,15)
					1	(151,121,15)
		M	338		9	(69,43,13)
18	901			0	4	(70,44,13)
		Q	504		17	(50,22,14)
					1	(51,23,14)
		H	588		2	(42,14,14)
					19	(43,15,14)
		L	196		3	(141,113,14)
					4	(142,114,14)
		M	364		3	(70,44,13)
19	991			0	11	(71,45,13)
		Q	546		17	(47,21,13)
					4	(48,22,13)
		H	650		9	(39,13,13)
					16	(40,14,13)
		L	224		3	(135,107,14)
					5	(136,108,14)
		M	416		3	(67,41,13)
20	1,085			0	13	(68,42,13)
		Q	600		15	(54,24,15)
					5	(55,25,15)

		H	700		15	(43,15,14)
					10	(44,16,14)
21	1,156	L	224	0	4	(144,116,14)
		M	442		4	(145,117,14)
		Q	644		17	(68,42,13)
		H	750		17	(50,22,14)
					6	(51,23,14)
					19	(46,16,15)
					6	(47,17,15)
22	1,258	L	252	0	2	(139,111,14)
		M	476		7	(140,112,14)
		Q	690		17	(74,46,14)
		H	816		7	(54,24,15)
					16	(55,25,15)
					34	(37,13,12)
		L	270		4	(151,121,15)
					5	(152,122,15)
		M	504		4	(75,47,14)
23	1,364			0	14	(76,48,14)
		Q	750		11	(54,24,15)
					14	(55,25,15)
		H	900		16	(45,15,15)
					14	(46,16,15)
		L	300		6	(147,117,15)
					4	(148,118,15)
		M	560		6	(73,45,14)
24	1,474			0	14	(74,46,14)
		Q	810		11	(54,24,15)
					16	(55,25,15)

		H	960		30	(46,16,15)
					2	(47,17,15)
25	1,588	L	312	0	8	(132,106,13)
					4	(133,107,13)
		M	588		8	(75,47,14)
					13	(76,48,14)
		Q	870		7	(54,24,15)
					22	(55,25,15)
		H	1,050		22	(45,15,15)
					13	(46,16,15)
26	1,706	L	336	0	10	(142,114,14)
					2	(143,115,14)
		M	644		19	(74,46,14)
					4	(75,47,14)
		Q	952		28	(50,22,14)
					6	(51,23,14)
		H	1,110		33	(46,16,15)
					4	(47,17,15)
27	1,828	L	360	0	8	(152,122,15)
					4	(153,123,15)
		M	700		22	(73,45,14)
					3	(74,46,14)
		Q	1,020		8	(53,23,15)
					26	(54,24,15)
		H	1,200		12	(45,15,15)
					28	(46,16,15)
		L	390		3	(147,117,15)
					10	(148,118,15)
		M	728		3	(73,45,14)

28	1,921			0	23	(74,46,14)
		Q	1,050		4	(54,24,15)
					31	(55,25,15)
		H	1,260		11	(45,15,15)
					31	(46,16,15)
		L	420		7	(146,116,15)
					7	(147,117,15)
		M	784		21	(73,45,14)
29	2,051			0	7	(74,46,14)
		Q	1,140		1	(53,23,15)
					37	(54,24,15)
		H	1,350		19	(45,15,15)
					26	(46,16,15)
		L	450		5	(145,115,15)
					10	(146,116,15)
		M	812		19	(75,47,14)
30	2,185			0	10	(76,48,14)
		Q	1,200		15	(54,24,15)
					25	(55,25,15)
		H	1,440		23	(45,15,15)
					25	(46,16,15)
		L	480		13	(145,115,15)
					3	(146,116,15)
		M	868		2	(74,46,14)
31	2,323			0	29	(75,47,14)
		Q	1,290		42	(54,24,15)
					1	(55,25,15)
		H	1,530		23	(45,15,15)
					28	(46,16,15)

32	2,465	L	510	0	17	(145,115,15)
		M	924		10	(74,46,14)
					23	(75,47,14)
		Q	1,350		10	(54,24,15)
					35	(55,25,15)
		H	1,620		19	(45,15,15)
					35	(46,16,15)
33	2,611	L	540	0	17	(145,115,15)
					1	(146,116,15)
		M	980		14	(74,46,14)
					21	(75,47,14)
		Q	1,440		29	(54,24,15)
					19	(55,25,15)
		H	1,710		11	(45,15,15)
					46	(46,16,15)
34	2,761	L	570	0	13	(145,115,15)
					6	(146,116,15)
		M	1,036		14	(74,46,14)
					23	(75,47,14)
		Q	1,530		44	(54,24,15)
					7	(55,25,15)
		H	1,800		59	(46,16,15)
					1	(47,17,15)
35	2,876	L	570	0	12	(151,121,15)
					7	(152,122,15)
		M	1,064		12	(75,47,14)
					26	(76,48,14)
		Q	1,590		39	(54,24,15)
					14	(55,25,15)

		H	1,890		22	(45,15,15)
					41	(46,16,15)
36	3,034	L	600	0	6	(151,121,15)
					14	(152,122,15)
		M	1,120		6	(75,47,14)
					34	(76,48,14)
		Q	1,680		46	(54,24,15)
					10	(55,25,15)
		H	1,980		2	(45,15,15)
					64	(46,16,15)
37	3,196	L	630	0	17	(152,122,15)
					4	(153,123,15)
		M	1,204		29	(74,46,14)
					14	(75,47,14)
		Q	1,770		49	(54,24,15)
					10	(55,25,15)
		H	2,100		24	(45,15,15)
					46	(46,16,15)
38	3,362	L	660	0	4	(152,122,15)
					18	(153,123,15)
		M	1,260		13	(74,46,14)
					32	(75,47,14)
		Q	1,860		48	(54,24,15)
					14	(55,25,15)
		H	2,220		42	(45,15,15)
					32	(46,16,15)
		L	720		20	(147,117,15)
					4	(148,118,15)
		M	1,316		40	(75,47,14)

39	3,532			0	7	(76,48,14)
		Q	1,950		43	(54,24,15)
					22	(55,25,15)
		H	2,310		10	(45,15,15)
					67	(46,16,15)
		L	750		19	(148,118,15)
					6	(149,119,15)
		M	1,372		18	(75,47,14)
40	3,706			0	31	(76,48,14)
		Q	2,040		34	(54,24,15)
					34	(55,25,15)
		H	2,430		20	(45,15,15)
					61	(46,16,15)

[a] c = total number of codewords, k = number of data codewords,
r = error correction capacity

ภาคผนวก ค

แสดงตารางการแปลงค่าพหุนาม

ตาราง ค-1 ตารางการแปลงค่าพหุนาม

Exponent of α	Integer		Integer	Exponent of α
0	1			
1	2		1	0
2	4		2	1
3	8		3	25
4	16		4	2
5	32		5	50
6	64		6	26
7	128		7	198
8	29		8	3
9	58		9	223
10	116		10	51
11	232		11	238
12	205		12	27
13	135		13	104
14	19		14	199
15	38		15	75
16	76		16	4
17	152		17	100
18	45		18	224
19	90		19	14
20	180		20	52
21	117		21	141
22	234		22	239
23	201		23	129

24	143		24	28
25	3		25	193
26	6		26	105
27	12		27	248
28	24		28	200
29	48		29	8
30	96		30	76
31	192		31	113
32	157		32	5
33	39		33	138
34	78		34	101
35	156		35	47
36	37		36	225
37	74		37	36
38	148		38	15
39	53		39	33
40	106		40	53
41	212		41	147
42	181		42	142
43	119		43	218
44	238		44	240
45	193		45	18
46	159		46	130
47	35		47	69
48	70		48	29
49	140		49	181
50	5		50	194
51	10		51	125

52	20		52	106
53	40		53	39
54	80		54	249
55	160		55	185
56	93		56	201
57	186		57	154
58	105		58	9
59	210		59	120
60	185		60	77
61	111		61	228
62	222		62	114
63	161		63	166
64	95		64	6
65	190		65	191
66	97		66	139
67	194		67	98
68	153		68	102
69	47		69	221
70	94		70	48
71	188		71	253
72	101		72	226
73	202		73	152
74	137		74	37
75	15		75	179
76	30		76	16
77	60		77	145
78	120		78	34
79	240		79	136

80	253		80	54
81	231		81	208
82	211		82	148
83	187		83	206
84	107		84	143
85	214		85	150
86	177		86	219
87	127		87	189
88	254		88	241
89	225		89	210
90	223		90	19
91	163		91	92
92	91		92	131
93	182		93	56
94	113		94	70
95	226		95	64
96	217		96	30
97	175		97	66
98	67		98	182
99	134		99	163
100	17		100	195
101	34		101	72
102	68		102	126
103	136		103	110
104	13		104	107
105	26		105	58
106	52		106	40
107	104		107	84

108	208		108	250
109	189		109	133
110	103		110	186
111	206		111	61
112	129		112	202
113	31		113	94
114	62		114	155
115	124		115	159
116	248		116	10
117	237		117	21
118	199		118	121
119	147		119	43
120	59		120	78
121	118		121	212
122	236		122	229
123	197		123	172
124	151		124	115
125	51		125	243
126	102		126	167
127	204		127	87
128	133		128	7
129	23		129	112
130	46		130	192
131	92		131	247
132	184		132	140
133	109		133	128
134	218		134	99
135	169		135	13

136	79		136	103
137	158		137	74
138	33		138	222
139	66		139	237
140	132		140	49
141	21		141	197
142	42		142	254
143	84		143	24
144	168		144	227
145	77		145	165
146	154		146	153
147	41		147	119
148	82		148	38
149	164		149	184
150	85		150	180
151	170		151	124
152	73		152	17
153	146		153	68
154	57		154	146
155	114		155	217
156	228		156	35
157	213		157	32
158	183		158	137
159	115		159	46
160	230		160	55
161	209		161	63
162	191		162	209
163	99		163	91

164	198		164	149
165	145		165	188
166	63		166	207
167	126		167	205
168	252		168	144
169	229		169	135
170	215		170	151
171	179		171	178
172	123		172	220
173	246		173	252
174	241		174	190
175	255		175	97
176	227		176	242
177	219		177	86
178	171		178	211
179	75		179	171
180	150		180	20
181	49		181	42
182	98		182	93
183	196		183	158
184	149		184	132
185	55		185	60
186	110		186	57
187	220		187	83
188	165		188	71
189	87		189	109
190	174		190	65
191	65		191	162

192	130		192	31
193	25		193	45
194	50		194	67
195	100		195	216
196	200		196	183
197	141		197	123
198	7		198	164
199	14		199	118
200	28		200	196
201	56		201	23
202	112		202	73
203	224		203	236
204	221		204	127
205	167		205	12
206	83		206	111
207	166		207	246
208	81		208	108
209	162		209	161
210	89		210	59
211	178		211	82
212	121		212	41
213	242		213	157
214	249		214	85
215	239		215	170
216	195		216	251
217	155		217	96
218	43		218	134
219	86		219	177

220	172		220	187
221	69		221	204
222	138		222	62
223	9		223	90
224	18		224	203
225	36		225	89
226	72		226	95
227	144		227	176
228	61		228	156
229	122		229	169
230	244		230	160
231	245		231	81
232	247		232	11
233	243		233	245
234	251		234	22
235	235		235	235
236	203		236	122
237	139		237	117
238	11		238	44
239	22		239	215
240	44		240	79
241	88		241	174
242	176		242	213
243	125		243	233
244	250		244	230
245	233		245	231
246	207		246	173
247	131		247	232

248	27
249	54
250	108
251	216
252	173
253	71
254	142
255	1

248	116
249	214
250	244
251	234
252	168
253	80
254	88
255	175

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชานน สกาว์วัฒนานนท์ เกิดวันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2530 มีภูมิลำเนาอยู่ที่กรุงเทพมหานครฯ เป็นบุตรคนที่แรกของนายชัยวัฒน์ สกาว์วัฒนานนท์และนางวรนุช สกาว์วัฒนานนท์ เข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิตที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ในปี 2548 และสำเร็จการศึกษาในปี 2552