

บทที่ 2

การสร้างภาพจากการกระเจิงกลับของรังสีบีตา

2.1 อันตรกิริยาของอนุภาคบีตากับสสาร

อนุภาคบีตาเป็นอนุภาคที่มีประจุเป็นลบขนาด 1.6×10^{-19} คูโลมภ์ และมีมวลเท่ากับ 9.1×10^{-28} กรัม เท่ากับอิเล็กตรอน อนุภาคบีตาจะถูกปล่อยออกมาจากนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี มีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่าอนุภาคมีประจุตัวอื่นๆ ส่วนใหญ่จะมีความเร็วสูงถึงประมาณ 0.99 เท่าของความเร็วแสง อนุภาคบีตาที่ปลดปล่อยออกมาจากสารกัมมันตรังสีจะแบ่งสัดส่วนพลังงานกับอนุภาคอื่นในกระบวนการสลายตัว จึงมีลักษณะการแจกแจงพลังงานเฉพาะอนุภาคแบบต่อเนื่องกัน (continuous distribution of energies) และให้สเปกตรัมพลังงานแบบต่อเนื่อง (continuous energy spectrum) ที่มีพลังงานสูงสุดเป็นค่าเฉพาะของแต่ละต้นกำเนิด และค่าเฉลี่ยพลังงานของอนุภาคบีตาจะมีค่าประมาณหนึ่งในสามของค่าพลังงานสูงสุด^[1] เมื่อกลุ่มอนุภาคบีตาดกกระทบตัวกลาง ความเข้มของอนุภาคบีตาจะเปลี่ยนแปลงไปด้วยผลของอันตรกิริยาในตัวกลาง 2 แบบคือ การดูดกลืน (absorption) และ การกระเจิง (scattering) ของอนุภาค

2.1.1 การดูดกลืน (absorption) อนุภาคบีตา คือการที่อนุภาคบีตาสูญเสียพลังงานให้กับอะตอมของตัวกลางจนหมด จึงถูกจับไว้โดยนิวเคลียสของธาตุ ความสามารถในการดูดกลืนจะมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียล กับความหนาแน่น(ρ) และความหนา(x) ของตัวกลาง ในกรณีที่ตัวกลางมีความหนาแน่นและความหนาน้อยๆ อนุภาคบีตาจะถูกดูดกลืนในตัวกลางได้บางส่วน และบางส่วนจะทะลุผ่าน (transmission) ตัวกลางออกมาได้ เนื่องจากการทะลุผ่านตัวกลางของอนุภาคบีตาจะเกิดได้กับตัวกลางที่ประกอบด้วยธาตุเบา ซึ่งมีความหนาและความหนาแน่นไม่มากนัก สามารถประยุกต์ใช้กับเทคนิคการตรวจวัดความหนาของวัสดุบางอย่างได้ เช่น แผ่นกระดาษ แผ่นทองเหลือง แผ่นอลูมิเนียม เป็นต้น ความสัมพันธ์ของความเข้มของอนุภาคบีตาลังทำอันตรกิริยากับตัวกลางจะเป็นไปตามสมการ^[2]

$$I = I_0 e^{-\mu x} \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ I = ความเข้มอนุภาคบีตาหลังผ่านตัวกลาง
 I_0 = ความเข้มของอนุภาคบีตา ก่อนผ่านตัวกลาง
 μ = สัมประสิทธิ์ในการดูดกลืนพลังงาน
 x = ความหนาของตัวกลาง

2.1.2 การกระเจิง (scattering) อนุภาคบีตาจะเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงได้ 2 แบบ คือ

2.1.2.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) หรือเรียกว่า “การกระเจิงแบบรัทเทอร์ฟอร์ด (Rutherford scattering)” เป็นอันตรกิริยาที่อนุภาคบีตาเข้าชนอะตอมของตัวกลางแล้วไม่สูญเสียพลังงาน แต่ทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนไป เนื่องจากอนุภาคบีตาเป็นอนุภาคที่มีประจุลบและบริเวณรอบนิวเคลียสปกคลุมด้วยสนามประจุลบของกลุ่มอิเล็กตรอน จึงเกิดแรงผลักรังสีประจุไฟฟ้า ทำให้อนุภาคบีตาเปลี่ยนทิศทาง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงทิศทางของอนุภาคบีตาขึ้นกับ ความเร็วของอนุภาคบีตา และลักษณะการเคลื่อนเข้าใกล้ นิวเคลียสของอะตอมตัวกลาง ซึ่งบางกรณีจะเกิดการกระเจิงย้อนกลับออกจากตัวกลาง เรียกว่า “การกระเจิงกลับ (Back scattering)” โดยจะมีโอกาสเกิดขึ้นได้มากขึ้นเมื่อนิวเคลียสของอะตอมกลางมีเลขอะตอมสูงขึ้น กล่าวคือ มวลอะตอมมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนนิวเคลียสของอนุภาคบีตา โอกาสในการเกิดกระเจิงแบบยืดหยุ่น ขึ้นอยู่กับภาคตัดขวางของตัวกลาง (differential cross-section) ดังนี้^[3]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{(Ze^2)^2}{16E^2} \sin^{-4} \frac{\theta}{2} \dots\dots\dots(2)$$

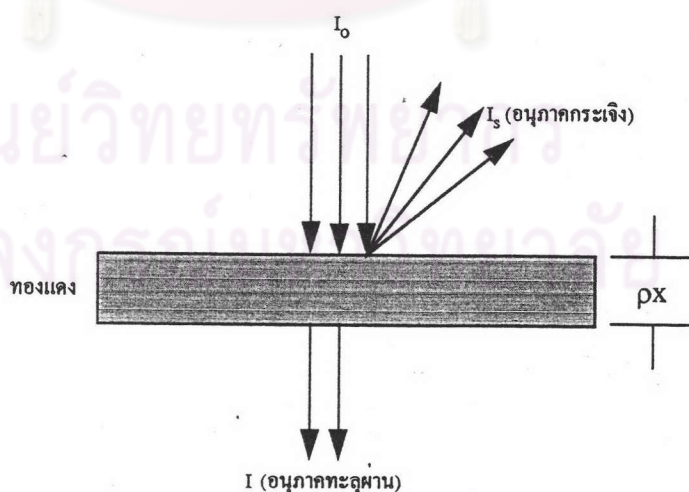
- เมื่อ Ω = มุมทรงตันรอบทิศทางการกระเจิง
 θ = มุมการกระเจิง
 E = พลังงานของอนุภาคบีตา
 Z = เลขอะตอมของตัวกลาง
 e = ประจุของอนุภาค

2.1.2.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) เป็นอันตรกิริยาที่เกิดเมื่ออนุภาคบีตาชนกับอะตอมของตัวกลาง แล้วถ่ายเทพลังงานบางส่วน ให้กับสนามกลุ่มนิวเคลียสหรืออิเล็กตรอน ทำให้อนุภาคบีตามีพลังงานลดลง และเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่

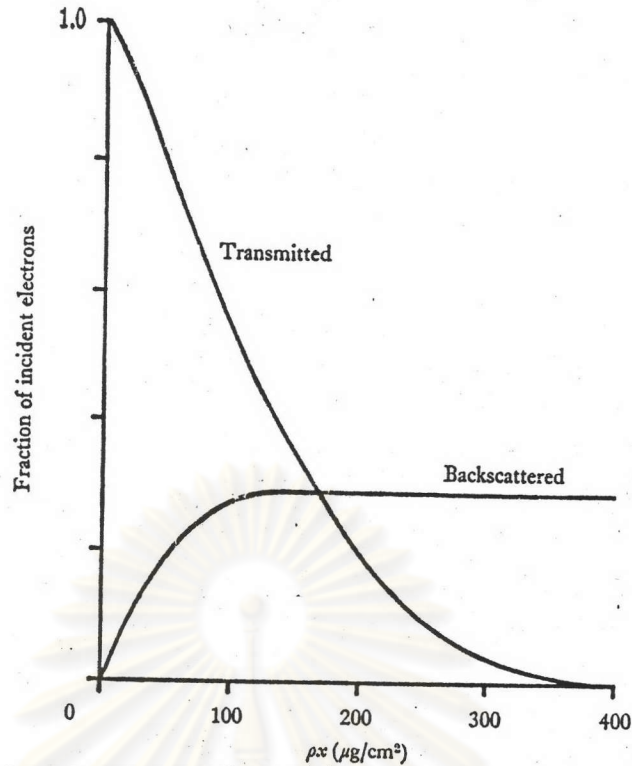
อนุภาคบีตาที่ลดพลังงานอย่างรวดเร็วในสนามคูลอมบ์ จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เรียกว่า “เบรมสตราลุง (Bremsstrahlung)” ซึ่งจะมีโอกาสเกิดได้มากขึ้นเมื่อเลขอะตอมของตัวกลางสูงขึ้น และอะตอมส่วนหนึ่งเกิดไอออไนซ์จากผลของอนุภาคบีตา ทำให้อิเล็กตรอนชั้นหนึ่งชั้นใดในวงโคจรรอบอะตอมหลุดออก และอะตอมต้องจัดภาวะสมดุลตัวเอง โดยการแทนชั้นพลังงานที่สูญเสียอิเล็กตรอนไปด้วยการลดพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นถัดๆ ไปเข้ามาแทนที่ และปลดปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะระดับพลังงานออกมา เรียกว่า “รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray)” โอกาสของการเกิดการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นขึ้นอยู่กับ ภาคตัดขวางของตัวกลางตามสมการ^[3]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Ze^4}{4E^2} (\sin^{-4} \phi + \cos^{-4} \phi) \cos \phi \dots\dots\dots (3)$$

จากอันตรกิริยาที่กล่าวมา จะเห็นว่า ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงนั้นมีจำนวนอิเล็กตรอนในอะตอมมาก โอกาสที่อนุภาคบีตาชนกับอิเล็กตรอนและนิวเคลียสของธาตุจึงมีมากกว่าธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ ดังนั้นธาตุที่มีเลขอะตอมสูงจึงทำให้เกิดการกระเจิงของรังสีได้มากกว่า นอกจากนี้ตัวกลางที่มีความหนาต่างกัน จะให้ปริมาณรังสีกระเจิงต่างกัน จึงสามารถนำความสัมพันธ์ของความหนาแน่นน้ำหนักกับความเข้มรังสีกระเจิงไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสภาพสีกกร่อน หรือสิ่งบกพร่องภายในวัสดุได้ ดังแผนภาพอันตรกิริยาและเส้นกราฟเปรียบเทียบผลการเกิดอันตรกิริยาในรูปที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แผนภาพการทำอันตรกิริยาของอนุภาคบีตากับแผ่นทองแดง



รูปที่ 2.2 เสนอกราฟเปรียบเทียบอันตรกิริยาของอนุภาคบีตาในตัวกลางซึ่งเป็นแผ่นทองแดงที่มีความหนาต่างๆกัน^[4]

2.2 หลักการกระเจิงกลับของรังสีบีตา

การกระเจิงกลับของรังสีบีตา (อนุภาคบีตา) มีโอกาสเกิดได้มากจากอันตรกิริยาการกระเจิงแบบยืดหยุ่น มักจะเกิดบริเวณผิววัสดุหรือบริเวณที่ไม่ลึกมากนัก โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามพลังงานของรังสีบีตา และเลขอะตอมของธาตุ ภายหลังจากเกิดอันตรกิริยา รังสีบีตาจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางกระเจิงแบบสุ่มภายในเนื้อของตัวกลางแสดงได้ด้วยสมการการแพร่กระจาย (diffusion depth; Z_d)^[4] ดังสมการ

$$Z_d = \frac{12X_r}{z+8} \dots\dots\dots(4)$$

เมื่อ X_r คือ Bethe range

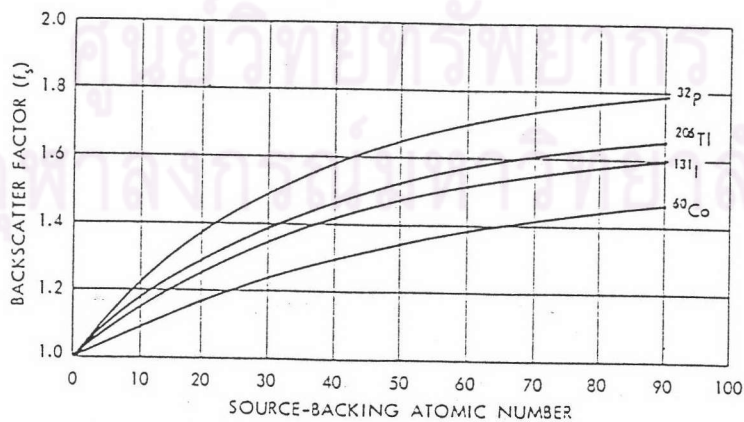
Z คือ เลขอะตอมของธาตุในตัวกลาง

จากสมการจะเห็นว่ารังสีบีตาจะแพร่เข้าไปในธาตุเบาได้ลึกกว่าธาตุหนัก หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า รังสีบีตา จะกระเจิงจากธาตุหนักได้ลึกกว่าธาตุเบา

ความสามารถในการกระเจิงกลับของรังสีบีตา พิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ(η) ซึ่งขึ้นกับพลังงานของรังสีบีตา เลขอะตอมของธาตุในชิ้นงาน และความหนาของชิ้นงาน โดยจะมีค่าประมาณ 30% ของค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านสูงสุดที่พลังงานเดียวกัน และในธาตุหนักจะมีค่าของ η สูงกว่าธาตุเบา ดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.3

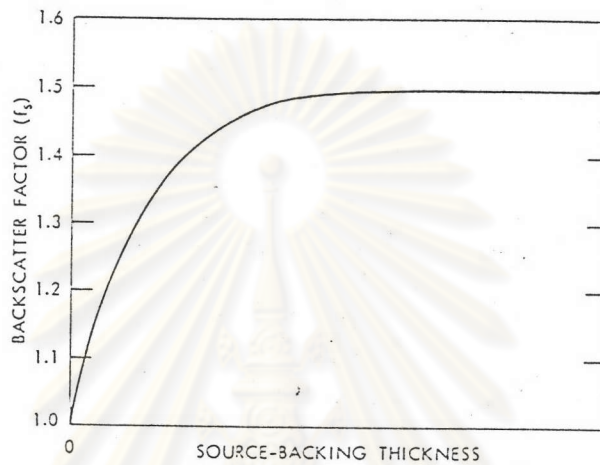
ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของรังสีบีตา สำหรับธาตุต่างๆ^[4]

Z	η	Z	η	Z	η	Z	η
1	0.010	24	0.282	47	0.412	70	0.482
2	0.021	25	0.291	48	0.415	71	0.485
3	0.031	26	0.300	49	0.419	72	0.487
4	0.043	27	0.309	50	0.423	73	0.490
5	0.054	28	0.317	51	0.426	74	0.492
6	0.066	29	0.325	52	0.430	75	0.495
7	0.079	30	0.332	53	0.433	76	0.498
8	0.093	31	0.339	54	0.436	77	0.501
9	0.107	32	0.345	55	0.439	78	0.504
10	0.121	33	0.350	56	0.443	79	0.507
11	0.136	34	0.355	57	0.446	80	0.509
12	0.150	35	0.360	58	0.449	81	0.510
13	0.164	36	0.365	59	0.452	82	0.512
14	0.176	37	0.370	60	0.455	83	0.513
15	0.189	38	0.375	61	0.458	84	0.515
16	0.201	39	0.379	62	0.461	85	0.516
17	0.212	40	0.384	63	0.463	86	0.517
18	0.223	41	0.388	64	0.466	87	0.518
19	0.233	42	0.392	65	0.469	88	0.519
20	0.243	43	0.396	66	0.472	89	0.520
21	0.253	44	0.400	67	0.474	90	0.521
22	0.263	45	0.404	68	0.477	91	0.522
23	0.273	46	0.408	69	0.479	92	0.523



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของรังสีบีตาและเลขอะตอมของธาตุในชิ้นงาน เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีบีตาต่างๆกัน^[2]

ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของรังสีบีตานั้นขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีบีตา และเลขอะตอมของธาตุในชิ้นงานแล้ว ยังขึ้นกับความหนาของชิ้นงาน ดังแสดงในเส้นกราฟ ความสัมพันธ์รูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของรังสีบีตากับความหนาของชิ้นงาน^[2]

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาเพิ่มขึ้น ถ้าความหนาของชิ้นงานเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับของรังสีจะมีค่าคงที่ ความหนาของชิ้นงานที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์เริ่มคงที่นี้ เรียกว่า ความหน่อิ่มตัว (Saturation thickness) และเมื่อจัดระบบวัดด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับ ความเข้มของปริมาณรังสีกระเจิงจากผลของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับจะเป็นไปตามสมการ^[2]

$$R = R_s(1 - e^{-kx}) + R_0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

- เมื่อ
- R_s = ปริมาณรังสีอิ่มตัวเมื่อความหนาของชิ้นงานมีค่าอนันต์
 - k = ค่าคงที่จากการทดลอง (cm^2/mg)
 - x = ความหนาของชิ้นงาน (mg/cm^2)
 - R_0 = ปริมาณรังสีเมื่อไม่มีชิ้นงาน

ค่า k จากสมการที่ (5) ขึ้นกับพลังงานของรังสีบีตาหรือชนิดของต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ และส่วนผสมของชิ้นงาน จากผลการวัดด้วยเทคนิคกระเจิงกลับ ส่วนค่า R_0 จะแปรตามความเข้มของรังสี (source intensity) ชนิดของหัววัดรังสี และระยะห่างระหว่างหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดรังสี ปริมาณรังสีอิมิตัว R_s ของธาตุบริสุทธิ์ หาค่าได้จากสมการดังนี้

$$R_s = \eta \times R_0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

โดยค่า η คือสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ (ได้จากเส้นกราฟรูปที่ 2.3)

ความเที่ยงตรงและเสถียรภาพของระบบวัด พิจารณาจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนา (standard deviation; σ_x) ต่อความหนา ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าเบี่ยงเบนของอัตรานับรังสีและเวลาในการนับรังสี ดังสมการ

$$\frac{\sigma(x)}{x} = \frac{1}{x} \times \frac{\partial(x)}{\partial(R)} \frac{R}{t} \quad \dots\dots\dots(7)$$

แทนสมการที่ (5) ลงในสมการที่ (7) จะได้

$$\frac{\sigma(x)}{x} = \frac{e^{-kx}}{xRk} \times \frac{R(1-e^{-kx})}{t} \quad \dots\dots\dots(8)$$

เมื่อ $\sigma(x)$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนา

x = ความหนาของชิ้นงาน

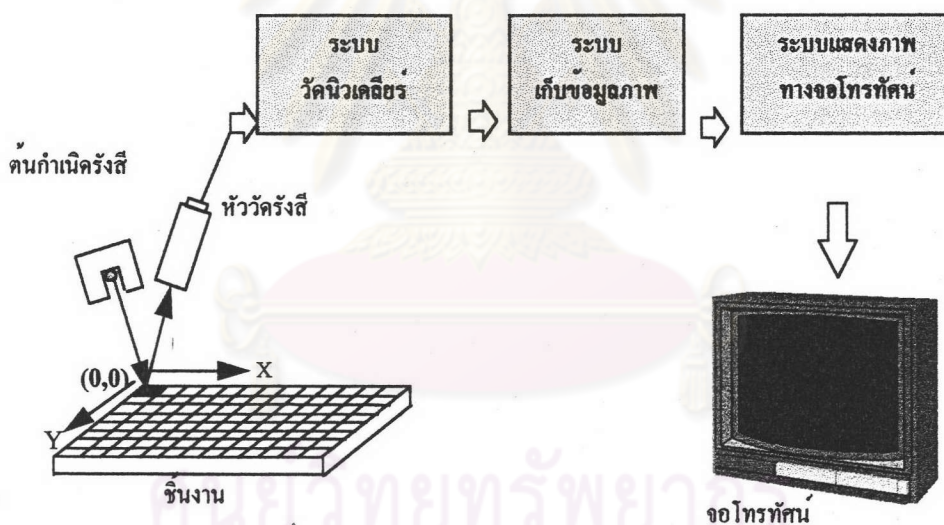
R = อัตรานับรังสี

t = เวลาคำนับรังสี

ผลที่ได้จากสมการที่ (8) เป็นค่าแสดงความแม่นยำ (accuracy) และความไว (sensitivity) ของระบบวัด โดยใช้เทคนิคกระเจิงกลับของรังสี

2.3 หลักการสร้างภาพจากการกระเจิงกลับของรังสีบีตา

จากอันตรกิริยาของการกระเจิงกลับของรังสีบีตา พบว่าปริมาณของรังสีกระเจิงกลับขึ้นอยู่กับปัจจัย 4 ประการคือ 1. ความเข้มของรังสี 2. ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี 3. เลขอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในชิ้นงาน 4. ความหนาของชิ้นงาน ดังนั้นถ้าบังคับลำรังสีบีตาจากต้นกำเนิดเคลื่อนไปกระทบชิ้นงานที่แบ่งเป็นช่องตารางเล็กๆ กลายเป็นตาราง โดยกำหนดตำแหน่งให้เป็นไปตามระบบ โคออดิเนต (co-ordinate) บนระนาบ X-Y ดังแสดงในรูป 2.5 แล้วนำข้อมูลรังสีกระเจิงที่วัดได้แต่ละจุดจากการเคลื่อนตำแหน่งของชุดต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีบนระนาบ X-Y นั้น ไปผ่านการประมวลผลและกำหนดตำแหน่งเป็นจุดภาพ จะเกิดการเรียงตำแหน่งจุดภาพเป็นภาพสองมิติของลักษณะชิ้นงานที่แสดงถึง ความแตกต่างของปริมาณรังสีกระเจิง หรือคอนทราสต์(contrast) ของภาพแต่ละจุดภาพ

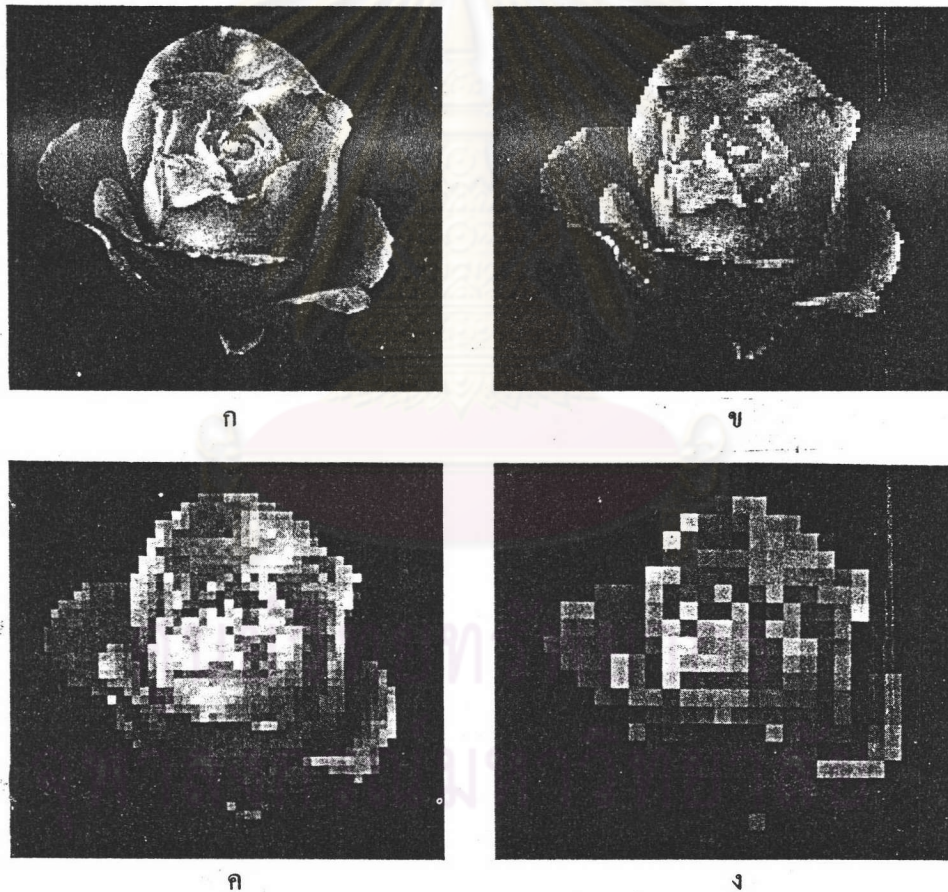


รูปที่ 2.5 การจัดอุปกรณ์สำหรับการสร้างภาพจากการกระเจิงกลับของรังสีบีตา

การสร้างภาพในระบบสองมิตินั้น มีสิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบระบบสร้างภาพ 2 อย่างคือ ความชัดเจนและความละเอียดของภาพ ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ต้องจัดให้สอดคล้องกับคุณภาพของอุปกรณ์สร้างข้อมูลภาพจากชิ้นงาน

2.3.1 ความละเอียดของภาพ

ภาพจากการกระเจิงกลับของรังสีบีตา เป็นภาพที่เกิดขึ้นจากการเฉลี่ยอัตรานับรังสี ณ จุดภาพอย่างต่อเนื่อง จากภาพในระบบอนาล็อก (analog image) แล้วให้แปลงเป็นภาพในระบบเชิงตัวเลข (digital image) เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลภาพในหน่วยความจำ ดังนั้นความละเอียดของภาพจึงขึ้นกับความละเอียดของจุดภาพ (pixel) ที่เกิดจากการแบ่งจุดภาพตามแนวนอนและแนวตั้งของกรอบภาพ ถ้ามีการแบ่งจำนวนจุดภาพละเอียด ภาพก็จะให้รายละเอียดสูง ดังแสดงในภาพเปรียบเทียบรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาพเปรียบเทียบความละเอียดของจุดภาพขนาดต่างๆ^[5]

- ก) ภาพขนาด 256 x 256 จุด ข) ภาพขนาด 128 x 128 จุด
 ค) ภาพขนาด 64 x 64 จุด ง) ภาพขนาด 32 x 32 จุด

2.3.2 ความชัดเจนของภาพ

ความชัดเจนของภาพขึ้นอยู่กับระดับความแตกต่างของสัญญาณ ของแต่ละจุดภาพซึ่งเรียกว่าความเปรียบต่างหรือ คอนทราสต์ (contrast) ในระบบเชิงตัวเลข ความละเอียดของระดับคอนทราสต์ ขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของการแปลงสัญญาณเชิงตัวเลขจากระดับคอนทราสต์ ถ้ามีจำนวนบิตสูง ภาพที่ได้จะมีความชัดเจนสูง



ก



ข



ค



ง

รูปที่ 2.7 ความชัดเจนของภาพเชิงตัวเลข^[5]

ก) 16 ระดับ หรือ 4 บิต ข) 8 ระดับ หรือ 3 บิต

ค) 4 ระดับ หรือ 2 บิต ง) 2 ระดับ หรือ 1 บิต

จากหลักการเบื้องต้นในการสร้างภาพจากเทคนิคการกระเจิงกลับของรังสีปีดานั้น จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมการสแกนเก็บข้อมูลวัดรังสีที่ตำแหน่งจุดภาพเล็กๆจากชิ้นงานบนระนาบ

X-Y ให้เข้าจังหวะ(synchronize) กับระบบเก็บข้อมูลภาพ และระบบสร้างภาพของจอโทรทัศน์ด้วย จึงต้องการวงจรควบคุมหลายส่วน ทั้งระบบขับเคลื่อนทางกล และระบบสแกนด้วยอิเล็กทรอนิกส์ ควบคุมการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งต่างๆ มาเก็บไว้ที่หน่วยความจำให้สอดคล้องกัน ในขณะที่เดียวกันยังต้องนำข้อมูลภาพแต่ละตำแหน่งบนหน่วยความจำ ไปสร้างภาพให้สัมพันธ์กับระบบทำงานของจอโทรทัศน์ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน ปัจจุบันจึงมักนำระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller System) มาช่วยจัดการระบบและสามารถประมวลผลข้อมูล เพื่อแสดงภาพบนจอโทรทัศน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 การแสดงภาพทางจอโทรทัศน์

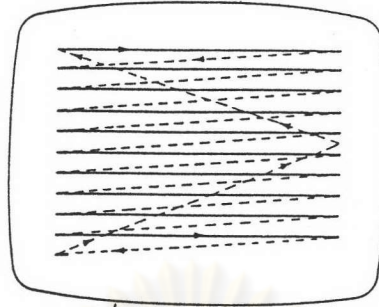
โทรทัศน์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณภาพ (video signal) ให้เป็นภาพที่มองเห็นได้ ตามมาตรฐานการสร้างภาพโทรทัศน์

2.4.1 องค์ประกอบของภาพโทรทัศน์

ภาพที่ปรากฏบนจอโทรทัศน์ เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนสแกนไปกระทบสารเรืองแสง ที่ฉาบไว้บนจอแสดงภาพซึ่งเป็นสุญญากาศ ทำให้สารเรืองแสงเปล่งแสงให้มีความสว่างสอดคล้องกับระดับสัญญาณ คลื่นแสงที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงที่ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นได้ เนื่องจากคุณสมบัติของสารเรืองแสงนี้ จะเกิดปรากฏการณ์เรืองแสงต่อเนื่องอยู่ชั่วขณะหนึ่ง แม้ว่าอิเล็กตรอนจะสแกนผ่านไปแล้ว แต่ด้วยความเฉื่อยของสายตา ทำให้ตาสามารถมองเห็นเป็นภาพต่อเนื่องได้ รูปแบบของการสแกนลำอิเล็กตรอนจากขอบบนซ้ายของจอภาพถึงขอบล่างขวาของจอภาพ แบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ

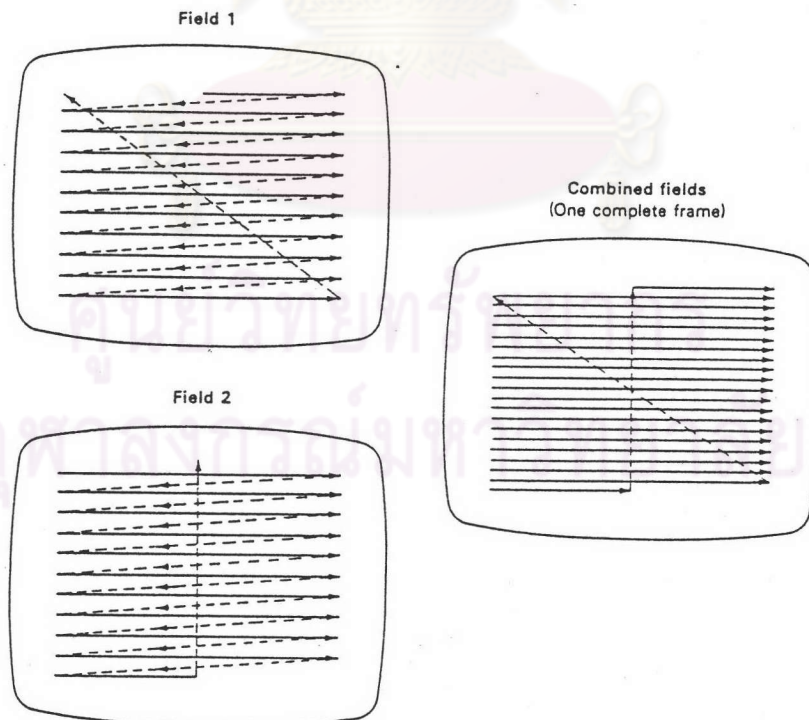
ก. ระบบเรียงเส้น (non-interlace or horizontal linear scanning)

เป็นระบบสแกนลำอิเล็กตรอนจากขอบบนซ้ายของจอภาพถึงขอบล่างขวาของจอภาพเส้นต่อเส้นเป็น 1 ภาพ (frame) มีความถี่ของแต่ละภาพเท่ากับ 50 Hz ในรูปที่ 2.8 แสดงการสแกนลำอิเล็กตรอนของระบบเรียงเส้น แต่ละเส้นของการสแกนลำอิเล็กตรอน จะมีลักษณะเรียงลำดับเส้น ไม่มีการสอแตรกลำอิเล็กตรอนที่สแกน เมื่อจบเส้นภาพลำอิเล็กตรอนจะสแกนกลับด้วยความเร็วสูงไปยังด้านซ้าย เพื่อเริ่มเส้นภาพทางแนวนอนเป็นลำดับต่อไป เรียกลักษณะในการสับคลับว่า "รีเทรซ (retrace)" และจะเริ่มต้นที่ขอบบนซ้ายของจอภาพใหม่อีกครั้ง หลังจากลำอิเล็กตรอนสแกนจนกระทั่งถึงขอบล่างขวาของภาพ ครบ 1 ภาพ



รูปที่ 2.8 แสดงภาพการสแกนลำอิเล็กตรอนของระบบเรียงเส้น

ข. ระบบอินเตอร์เลส (interlace) เป็นระบบสแกนลำอิเล็กตรอนที่นิยมใช้เป็นมาตรฐานกับระบบโทรทัศน์ปัจจุบัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับระบบเรียงเส้น เพียงแต่ว่าการสแกนลำอิเล็กตรอนบนหน้าจอก็จะมีลักษณะการสแกนแบบสอคแทรก ดังแสดงในรูปที่ 2.9 ประกอบด้วย 2 ฟิวด์ (field) ต่อหนึ่งภาพ โดยเรียกแต่ละฟิวด์ว่า ฟิวด์คี่ (odd field) และฟิวด์คู่ (even field) ตามลำดับ ซึ่งมีความถี่ของฟิวด์เท่ากับ 50 Hz และความถี่ของภาพเท่ากับ 25 Hz

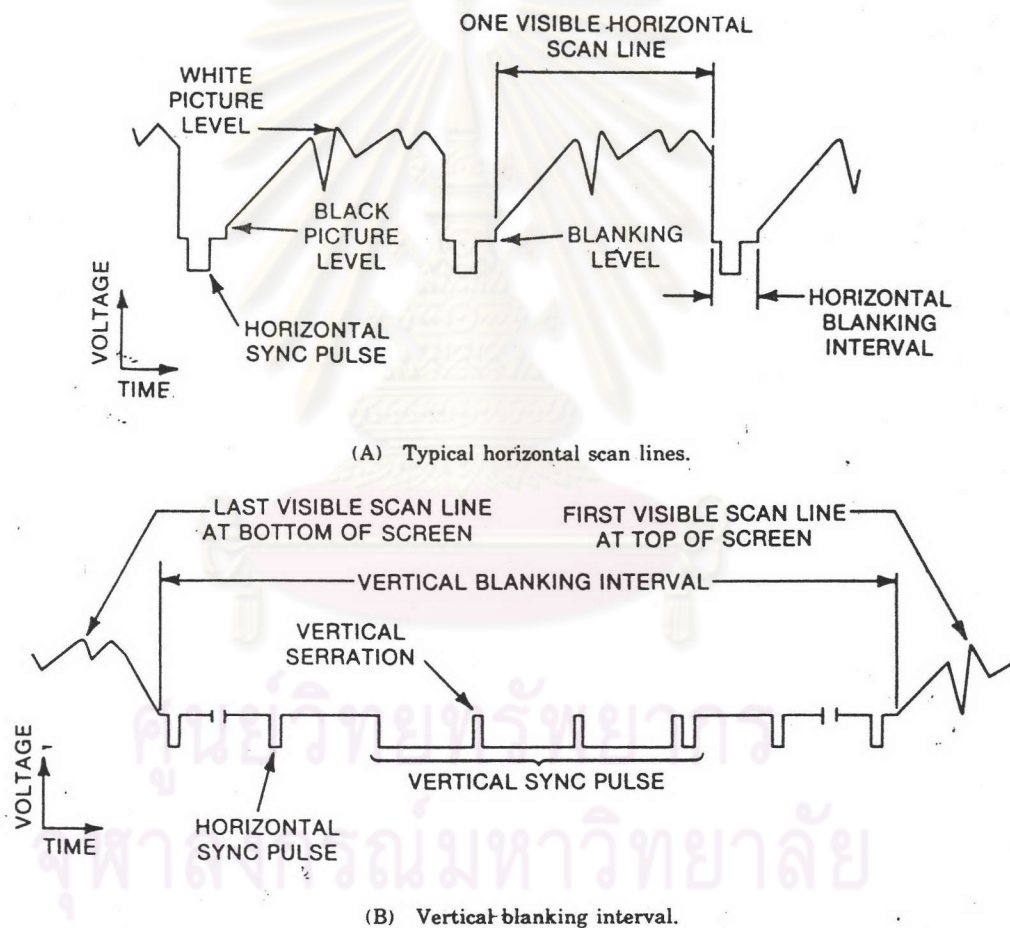


รูปที่ 2.9 แสดงภาพการสแกนลำอิเล็กตรอนในระบบอินเตอร์เลส

ภาพการเคลื่อนไหวบนจอโทรทัศน์นั้น เกิดจากการเปลี่ยนสัญญาณแต่ละภาพอย่างรวดเร็ว จนสามารถมองเห็นเป็นภาพต่อเนื่อง โดยที่แต่ละสัญญาณภาพนั้นจำเป็นต้องมีสัญญาณองค์ประกอบต่างๆ ทั้งแนวตั้งและแนวนอน เพื่อให้การสร้างภาพเป็นไปได้อย่างถูกต้อง

2.4.2 ลักษณะของสัญญาณภาพพร้อมองค์ประกอบ (composite video signal)

สัญญาณภาพพร้อมองค์ประกอบ เป็นสัญญาณภาพที่รวมองค์ประกอบของสัญญาณเข่าจิ้งหะ (sync. pulse) และมีการจัดระดับของสัญญาณองค์ประกอบอย่างเป็นสัดส่วน ดังในรูปที่ 2.10

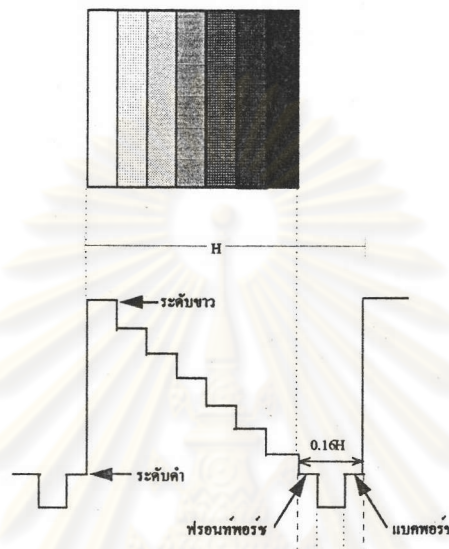


รูปที่ 2.10 รูปแสดงลักษณะของสัญญาณภาพพร้อมองค์ประกอบ

2.4.2.1 องค์ประกอบของสัญญาณภาพ

ก. สัญญาณความส่องสว่าง (luminance signal) เป็นสัญญาณควบคุมความสว่างและความมืดของภาพบนจอภาพ โดยจะสว่างมากขึ้น ถ้าสัญญาณมีระดับสูง และจะมีคลงเมื่อ

สัญญาณมีระดับดำ ดังในรูปที่ 2.11 แสดงระดับสัญญาณความส่องสว่างที่เปลี่ยนเป็นขั้นๆ และภาพที่ปรากฏบนจอภาพ จะมีลักษณะเป็นแถบภาพที่มีการเปลี่ยนความส่องสว่าง จากระดับสูงไปยังระดับดำ ที่เรียกว่า “เกรย์สเกล(gray scale)” ความแตกต่างระหว่างความดำและขาว คือคอนทราสต์ของภาพนั่นเอง



รูปที่ 2.11 แสดงภาพเปรียบเทียบสัญญาณความส่องสว่างและภาพที่ปรากฏบนจอภาพ

ข. ฟรอนท์พอร์ช (front porch) และแบคพอร์ช (back porch) เป็นส่วนมีคตรงบริเวณขอบของสัญญาณความส่องสว่างทั้งสองด้าน มีหน้าที่จำกัดขอบเขตด้านข้างของขอบภาพทางด้านขวาและซ้าย ตามลำดับ โดยทั่วไปฟรอนท์พอร์ชจะมีช่วงเวลาสั้นกว่าแบคพอร์ช 3 เท่า ถ้ากำหนดให้ช่วงเวลาของเส้นภาพหนึ่งเส้นเท่ากับ H จะได้ช่วงเวลาของฟรอนท์พอร์ชเป็น $0.02H$ และแบคพอร์ชเป็น $0.06H$

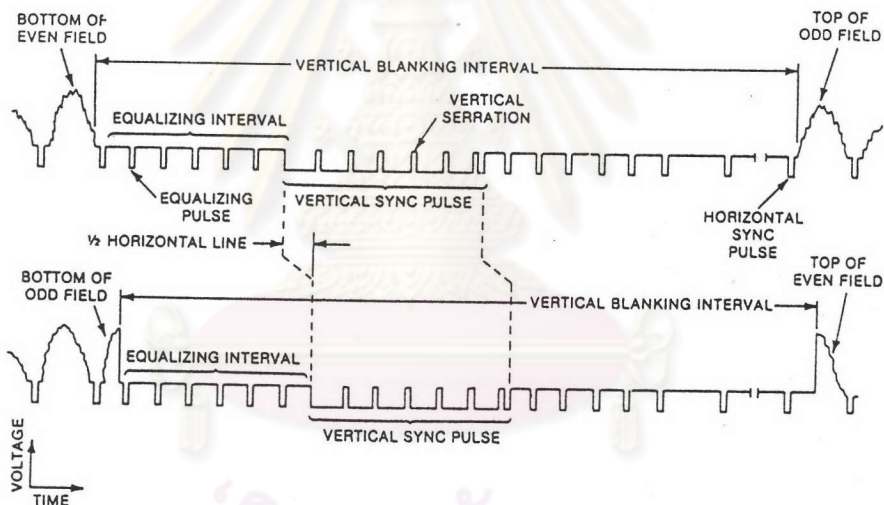
ค. สัญญาณเข้าจิ้งหหวะ (synchronization signal) เป็นสัญญาณที่กำหนดการสแกนลำอิเล็กตรอนให้สอดคล้องกับต้นทางของสัญญาณ สัญญาณเข้าจิ้งหหวะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. สัญญาณเข้าจิ้งหหวะแนวนอน (horizontal sync. pulse) เป็นสัญญาณเข้าจิ้งหหวะในช่วงสับคลับของลำอิเล็กตรอน หลังจากที่ทำกรสแกนลำอิเล็กตรอนจากขอบซ้ายของจอภาพ ไปสิ้นสุดที่ขอบขวาของจอภาพ มีลักษณะเป็นพัลส์ที่ต่ำกว่าระดับมืดของฟรอนท์พอร์ช และแบคพอร์ช โดยทั่วไปจะมีความกว้างของสัญญาณเท่ากับ $0.08H$ และมีความถี่เท่ากับ $15,625 \text{ Hz}$

2. สัญญาณเข้าจังหวะแนวตั้ง (vertical sync. pulse) เป็นสัญญาณที่ใช้เข้าจังหวะการสับคัลป์ของลำอิเล็กตรอน หลังจากที่ทำกรกวาดภาพครบ 1 ฟิวด์แล้ว โดยทั่วไป ช่วงเวลาของสัญญาณเข้าจังหวะแนวตั้งจะเท่ากับ $3H$ และมีความถี่เท่ากับ 50 Hz

ง. สัญญาณอิกวอไลซิงพัลส์ (equalizing pulse)

เป็นสัญญาณเข้าจังหวะอีกแบบหนึ่ง ที่มีส่วนช่วยในการเข้าจังหวะ การสับคัลป์ของลำอิเล็กตรอนให้เหมาะกับฟิวด์คู่และฟิวด์คี่ ทั้งนี้เนื่องจากในฟิวด์คี่จะมีเส้นภาพเส้นสุดท้ายเพียงครึ่งเดียวเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้การสับคัลป์ของลำอิเล็กตรอน ไปเริ่มบริเวณจุดกึ่งกลางของจอภาพตอนบนของฟิวด์คู่เป็นไปอย่างถูกต้อง จึงจำเป็นต้องมีอิกวอไลซิงพัลส์ ลักษณะของสัญญาณแสดงในรูปที่ 2.12^[6]

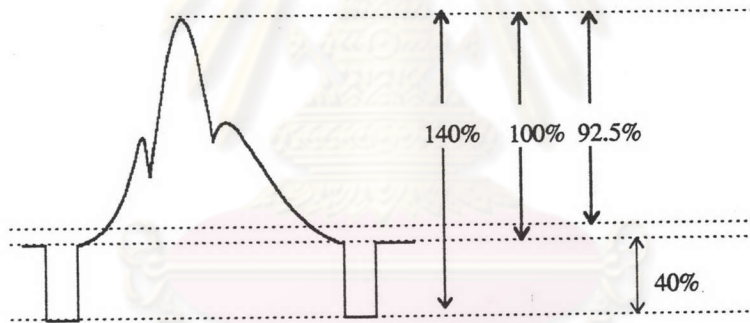


รูปที่ 2.12 แสดงรายละเอียดของสัญญาณภาพ พร้อมองค์ประกอบบริเวณสัญญาณอิกวอไลซิงพัลส์

อิกวอไลซิงพัลส์จะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ช่วงเวลาละ $3H$ อยู่ก่อนหน้าและหลังช่วงเวลาเข้าจังหวะแนวตั้ง ระยะห่างระหว่างอิกวอไลซิงพัลส์แต่ละลูกมีค่าเท่ากับ $0.5H$ มีความถี่เป็นสองเท่าของสัญญาณเข้าจังหวะทางแนวนอน คือเท่ากับ $31,250\text{ Hz}$ หลังจากช่วงเวลาอิกวอไลซิงพัลส์ แล้วจะมีสัญญาณเข้าจังหวะแนวนอนอีก 12 ฟิวด์ ซึ่งในช่วงเวลาดังกล่าวจะไม่มีสัญญาณส่องสว่าง (blank) จึงเป็นเหตุให้ไม่สามารถมองเห็น 12 เส้นภาพตอนบนของจอภาพ

2.5 มาตรฐานระดับของสัญญาณภาพ (amplitude)

มาตรฐานระดับของสัญญาณภาพ กำหนดขึ้นโดย Institute of Radio Engineers (IRE) ซึ่งต่อมาภายหลังได้เปลี่ยนชื่อมาเป็น Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) ถึงกระนั้นก็ตามมาตรฐานระดับของสัญญาณภาพที่ยังคงนิยมเรียกว่า “IRE scale” มาตรฐานนี้จะมีการแบ่งระดับ (amplitude) ของสัญญาณออกเป็น 140 หน่วย และกำหนดให้สัญญาณเข้าจิ้งหะมีค่าเป็น 40 หน่วย ซึ่งต่ำกว่าระดับศูนย์ ประมาณ 29% ของความสูงของสัญญาณทั้งหมด ส่วนระดับมืด (black level) ของสัญญาณส่องสว่าง (luminance signal) มีค่าเท่ากับ 7.5 หน่วย หรือประมาณ 5% ของความสูงของสัญญาณทั้งหมด ส่วนความสูงของสัญญาณส่องสว่าง ทั้งหมดมีค่าเป็น 92.5 หน่วย หรือเท่ากับ 66% ของความสูงของสัญญาณทั้งหมด ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.13

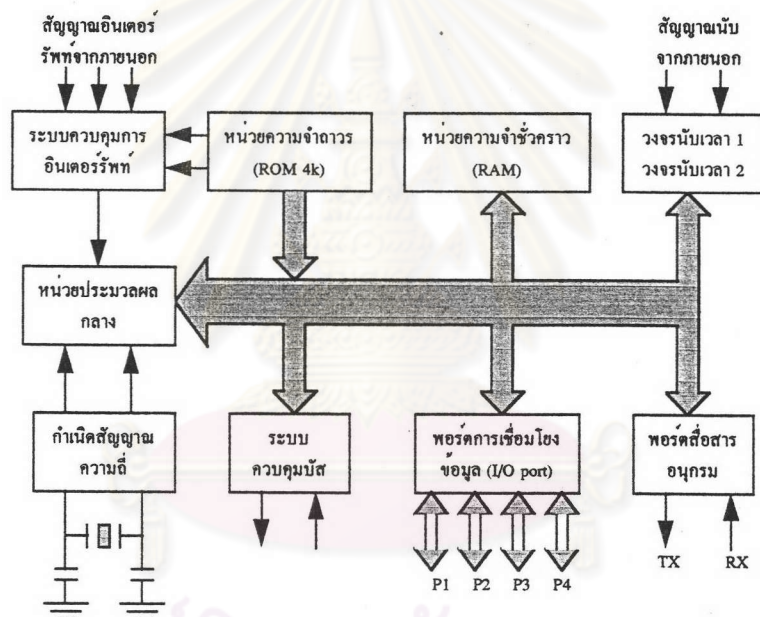


รูปที่ 2.13 มาตรฐานระดับของสัญญาณภาพพร้อมองค์ประกอบ

ในการแสดงภาพของระบบสแกนลำอิเล็กตรอนแบบเรียงเส้น สัญญาณจะประกอบด้วยสัญญาณความส่องสว่างและสัญญาณเข้าจิ้งหะเท่านั้น ส่วนสัญญาณอิกวอไลซิงพัลส์ เป็นสัญญาณที่กำหนดเพิ่มขึ้นเพื่อการเข้าจิ้งหะสแกนของลำอิเล็กตรอนแบบอินเตอร์เลส ซึ่งประกอบด้วย 2 พัลส์ต่อ 1 จอภาพ ด้วยเหตุนี้ จึงทำให้ระบบสแกนแบบอินเตอร์เลส มีความต่อเนื่องของภาพเคลื่อนไหวมากกว่าระบบสแกนลำอิเล็กตรอนแบบเรียงเส้น

2.6 การใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการเก็บข้อมูลภาพ

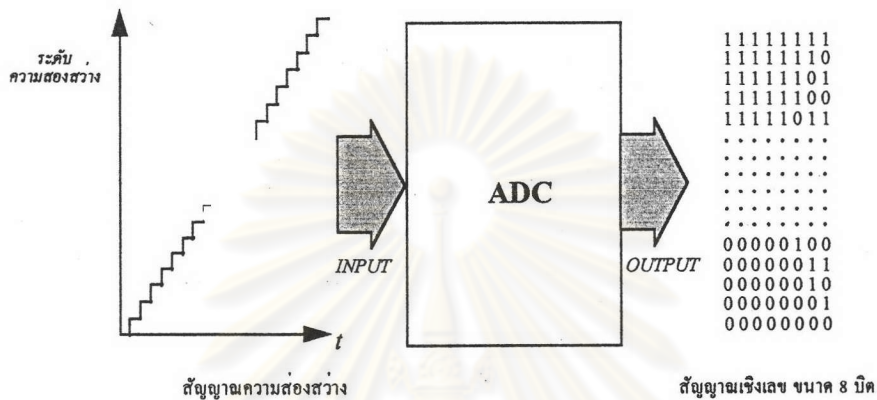
ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นไมโครโปรเซสเซอร์ประเภทหนึ่งที่ได้รับการออกแบบเพื่อใช้ในงานควบคุมขนาดเล็ก เหมาะกับงานภาคสนาม เนื่องจากโครงสร้างภายใน ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.14 ประกอบด้วยหน่วยงานหลักเช่นเดียวกับระบบคอมพิวเตอร์ ได้แก่ หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit; CPU) หน่วยความจำชั่วคราว (Random Access Memory; RAM) หน่วยความจำถาวร (Read Only Memory; ROM) พอร์ตการโอนถ่ายข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก (Input-Output Port) และวงจรกำเนิดสัญญาณติดต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 2.14 แสดงแผนภาพของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51^[7]

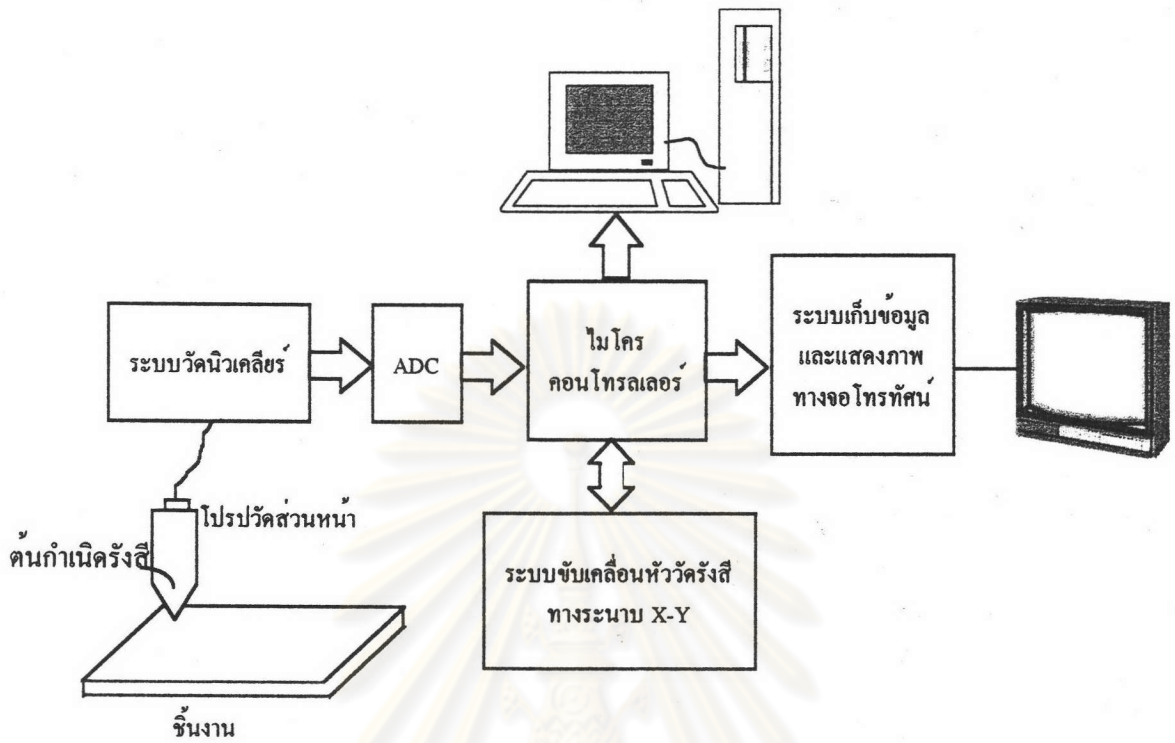
จากที่กล่าวมาแล้วว่าสัญญาณโทรทัศนประกอบด้วยส่วนใหญ่อะไรๆ 2 ส่วนคือ สัญญาณเข้าจิ้งหะและสัญญาณความส่องสว่าง วิธีการที่จะเก็บภาพไว้ได้นั้น ต้องทำการแปลงสัญญาณภาพโทรทัศนแบบอนาลอกให้เป็นสัญญาณเชิงตัวเลขก่อน โดยจะทำการแปลงเฉพาะสัญญาณส่องสว่างเท่านั้น ไม่มีการแปลงสัญญาณเข้าจิ้งหะ ทั้งแนวนอนและแนวตั้ง อุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงสัญญาณภาพเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขนี้เรียกว่า “หน่วยแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณเชิงตัวเลข (Analog to Digital Converter; ADC)” ดังนั้น สัญญาณเชิงตัวเลขที่แปลงได้ จึงแสดงถึงระดับความมืดและความสว่างของสัญญาณภาพ ความละเอียดจะมากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับ

จำนวนบิต (bit) ของสัญญาณเชิงตัวเลขที่แปลงได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 สัญญาณเชิงตัวเลขที่แปรตามระดับของสัญญาณส่องสว่างนี้ จะถูกบันทึกลงในหน่วยความจำ ตามตำแหน่งแอดเดรสที่กำหนดให้สอดคล้องกับการทำงานของระบบการสร้างภาพ



รูปที่ 2.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงตัวเลขขนาด 8 บิต กับสัญญาณความส่องสว่าง

การทำงานของระบบสร้างภาพดั้งเดิมมักจะอาศัย วงจรอิเล็กทรอนิกส์เพียงอย่างเดียว ควบคุมลำดับการทำงานของระบบต่างๆ ได้แก่ การสร้างสัญญาณสแกนเพื่อควบคุมระบบขับเคลื่อนหัวอ่านสัญญาณ ให้เคลื่อนไปบนพื้นที่ของระนาบ X-Y ที่กำหนด การถ่ายโอนข้อมูลเชิงตัวเลขที่แปลงได้เก็บลงหน่วยความจำ ควบคุมการถ่ายโอนข้อมูลเชิงตัวเลข รวมทั้งจัดระบบมาตรฐานสัญญาณให้สอดคล้องกับการแสดงภาพทางจอโทรทัศน์ และการโอนถ่ายข้อมูลเชิงตัวเลขของภาพไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer; PC) เพื่อทำการเก็บสำรองข้อมูลของแต่ละภาพ หรือปรับปรุงคุณภาพของภาพด้วยกระบวนการทางภาพ (image processing) เป็นต้น ที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า การทำงานของระบบสร้างภาพ จำเป็นต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับควบคุมจำนวนมาก ดังนั้นการออกแบบซอฟต์แวร์ให้ทำงานเลียนแบบ การทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ บนไมโครคอนโทรลเลอร์ จะช่วยลดการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนลง และออกแบบวงจรสร้างภาพได้สะดวกขึ้นดังแผนภาพแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภาพการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในระบบการสร้างภาพจากข้อมูลการกระเจิงกลับของรังสี