

บทที่ 2

ทฤษฎีทั่วไปเกี่ยวกับฟิล์ม



2.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติของฟิล์ม

ฟิล์มทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นฟิล์มที่ใช้สำหรับการบันทึกสีหรือฟิล์มดำรูปทั่วไปก็ตาม มีองค์ประกอบเหมือนกัน 2 ประการ คือ ฐานฟิล์ม (Film base or a support) และอิมัลชัน (Emulsion or a sensitive layer)

2.1.1 ฐานฟิล์ม

มีหน้าที่รองรับอิมัลชันให้มีสภาพปกติตั้งที่อยู่ในขอบเขตที่กำหนด วัสดุที่ใช้ทำฐานฟิล์มที่ดีจะต้องมีคุณสมบัติถูกต้อง และครบถ้วนตามข้อกำหนดเกี่ยวกับแสง ทางเคมี, ทางกายภาพ และเกี่ยวกับความร้อน เช่น จะต้องเป็นวัสดุโปร่งใส และเป็นเนื้อเดียวกันตลอด มีสภาพทางเคมีคงที่ ไม่ทำปฏิกิริยากับอิมัลชัน ทนความชื้น มีสภาพเหนียวและแข็ง แต่สามารถตัดได้ง่ายไม่เปราะ และทนต่ออุณหภูมิสูงเป็นต้น ปกตินิยมทำฐานฟิล์มด้วยแผ่นพลาสติกใส เช่น เซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate) โพลีเอสเตอร์ (Polyester) หรืออื่น ๆ ตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน และตามความเหมาะสม

2.1.2 อิมัลชัน

เป็นส่วนที่มีความไวในการทำปฏิกิริยาต่อแสง หรือรังสี อิมัลชันมีองค์ประกอบ 2 ประการคือ เจลาติน (Gelatin) และเกรน (Grain)

---

<sup>1</sup> C.B. Neblette, Photography, its materials and processes (6<sup>th</sup> ed. New Delhi : Affiliated East-West Press Pvt. Ltd. 1968) p 161

2.1.2.1 เจลาติน เป็นสารประกอบโปรตีน ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอนร้อยละ 50.5 ออกซิเจนร้อยละ 25.2 ไนโตรเจนร้อยละ 17.5 ไฮโดรเจนร้อยละ 6.8 และมีสิ่งแปลกปลอม (Impurities) เช่น เหล็ก ฟอสฟอรัส เป็นต้น<sup>1</sup> เล็กน้อย หรือเป็นสารโพลีเมอร์สังเคราะห์ (Synthetic polymer) เจลาตินมีหน้าที่ดังนี้<sup>2</sup>

- เป็นตัวกลางสำหรับยึดเกรนที่กระจายกระจายอยู่ทั่วไป มีให้เคลื่อนย้าย หรือตกตะกอน

- ป้องกันเกรนที่ยังไม่ถูกรังสี (หรือแสง) จากการกระทำของน้ำยาล้างฟิล์ม

- ขอมให้สารละลายขีมนานถึงเกรนได้ง่าย

- ไวต่อการทำปฏิกิริยาที่สำคัญอันเกิดจากสิ่งแปลกปลอมเพียงเล็กน้อยที่มีในเจลาติน

- จะไม่ก่อให้เกิดผลอันไม่พึงปรารถนาต่อคุณลักษณะเกี่ยวกับการเกิดภาพของจุลผลึกเงินเฮไลต์ (silver halide microcrystals) เช่น การเกิดฟอกซ์ (fogging) การสูญเสียความไวต่อรังสีหรือแสง เป็นต้น

2.1.2.2 เกรน ได้แก่จุลผลึกของเงินเฮไลต์ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือไวต่อรังสีหรือแสง เงินเฮไลต์ที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นเงินโบรไมด์ (AgBr) ขนาดและรูปร่างของผลึกเงินโบรไมด์นั้นไม่จำกัดแน่นอน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมอัดชั้น อย่างไรก็ตามโครงผลึก (Crystal lattice)

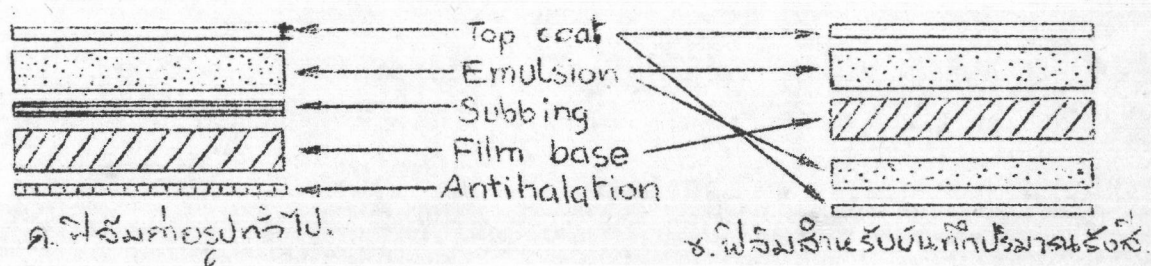
<sup>1</sup> V.F. Kozlov, Photographic dosimetry of ionizing radiation (Jerusalem : Israel Program for Scientific Translation 1966) p.1

<sup>2</sup> R.H. Herz. The photographic action of ionizing radiations (New York : John Wiley and Sons. 1969) p.55



และค่าคงตัวของเงินโบรไมด์ก็ยังคงไม่เปลี่ยนแปลงไปแต่อย่างใด ความไวของ  
อิมัลชันขึ้นอยู่กับขนาดของผลึก และปริมาณของเงินโบรไมด์ ผลึกที่มีขนาดใหญ่และ  
มีปริมาณมาก อิมัลชันจะมีความไวต่อรังสีหรือแสงสูงกว่า

อิมัลชันซึ่งประกอบด้วยเจลาติน และเกรนนี้จะถูกนำไปเคลือบไว้บนชั้น  
โคตตามหนึ่ง หรือทั้งสองชั้นของฐานฟิล์มก็ได้ ทั้งนี้ แล้วแต่วัตถุประสงค์ของผู้ผลิต  
สำหรับฟิล์มที่ใช้เพื่อการบันทึกปริมาณรังสีในอิมัลชันจะมีปริมาณผลึกเงินโบรไมด์มาก  
กว่าฟิล์มถ่ายรูปทั่วไป นอกจากนั้นยังเติมเงินไอโอไดด์ (AgI) และเงินซัล-  
ไฟด์ (Ag<sub>2</sub>S) ปริมาณน้อยลงบนผิวหน้าของผลึก เพื่อเป็นตัวเพิ่มความไวให้มาก  
ยิ่งขึ้น (ถ้าต้องการให้ความไวลดลงก็เติมเงินคลอไรด์ (AgCl)) เส้นผ่าศูนย์กลาง  
ของเกรนมีขนาดแตกต่างกัน คือตั้งแต่ 0.5 ไมครอน สำหรับนิวเคลียร์  
อิมัลชัน ถึง 1 หรือ 2 ไมครอน สำหรับอิมัลชันวัดรังสีเอกซ์ และน้ำหนักเงิน  
โบรไมด์อยู่ในช่วงร้อยละ 80 ในนิวเคลียร์ แทรค อิมัลชัน (Nuclear track  
emulsion) ร้อยละ 50 สำหรับอิมัลชันวัดรังสีเอกซ์ และร้อยละ 30 ใน-  
อิมัลชันของฟิล์มถ่ายรูปทั่วไป ความหนาของชั้นอิมัลชันอยู่ระหว่าง 2-3 ถึงหลาย  
ร้อยไมครอน แต่โดยทั่วไปมีค่าประมาณ 10 และ 25 ไมครอน หรือ 2-5 mg/cm<sup>2</sup>  
เนื่องจากชั้นของอิมัลชันขึ้นไปจะมีชั้นของเจลาตินบาง ๆ ซึ่งมีความหนาประมาณ  
0.5 ไมครอนฉาบไว้เพื่อทำหน้าที่ป้องกันการกระแทกหรือขีดข่วนที่อาจทำให้สภาพชั้น  
ฉติปกติได้ส่วนประกอบต่าง ๆ ของฟิล์ม อาจแสดงได้ตามภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงส่วนประกอบของฟิล์ม

ตามปกติฟิล์มถ่ายรูปทั่วไปจะฉาบอิมัลชันเพียงด้านเดียว คือเฉพาะด้านหน้า ส่วนด้านหลังจะฉาบด้วยสารป้องกันการสะท้อนของภาพ ซึ่งเรียกว่า Anti-halation เพื่อทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ภาพถ่ายพร่ามัว และมีขนาดใหญ่กว่าเดิม

หน่วยที่ใช้แสดงความไวของฟิล์มถ่ายรูปมีหลายประเภทแตกต่างกัน ทั้งนี้แล้วแต่บริษัทผู้ผลิตจะยึดถือมาตรฐานใด เช่น สหรัฐอเมริกา และอีกหลายประเทศ นิยมใช้ ASA (American Standard Association) ประเทศเยอรมันใช้ DIN (Deutschen Industric Normen) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม มาตรฐานเหล่านี้สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ เช่น 125 ASA มีค่าเท่ากับ 18° DIN เป็นต้น

## 2.2 กลไกแห่งการเกิดภาพแฝง (Mechanism of latent image formation)

เมื่อรังสี (หรือแสง) ตกกระทบอิมัลชัน ผลึกของเงินเฮไลด์ ส่วนที่ถูกรังสี (หรือแสง) ก็จะทำให้เกิดปฏิกิริยาและเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งทำให้มันสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำยาล้างฟิล์มได้เร็วกว่าผลึกส่วนที่ไม่ถูกรังสี (หรือแสง) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้อยู่ภายในเกรนของเงิน ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ ถ้าไม่ผ่านกระบวนการล้างฟิล์มเสียก่อนนี้เอง จึงเรียกลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ว่า "ภาพแฝง"

(Latent image) และจากการทดลองของ G.C. Farnell และคณะ (1961)<sup>1</sup> พบว่าภาพแฝงประกอบขึ้นจากกลุ่มอะตอมของเงิน จำนวน 4-10 อะตอม

### 2.2.1 ผลการทดลองขั้นมูลฐาน

มีผลการทดลองที่สำคัญ 2 ประการ ซึ่งเป็นข้อมูลที่จะช่วยให้ทราบถึงกลไกแห่งการเกิดภาพแฝงได้ คือ

---

<sup>1</sup> R.H. Herz, The photographic action of ionizing radiations (New York : John Wiley and Sons. 1969) p. 64

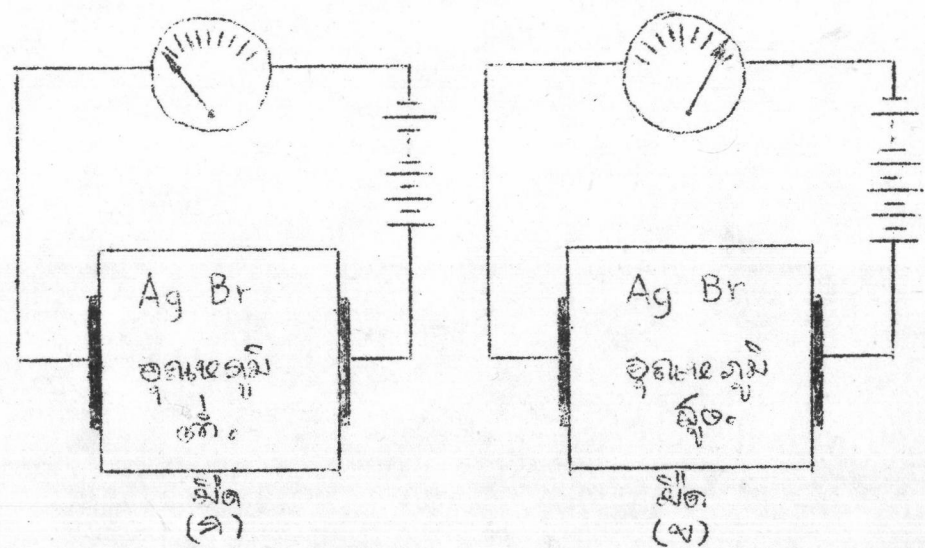


2.2.1.1 บริเวณที่ไวต่อปฏิกิริยา (Sensitive site or speck) ตามปกติมีลึนส่วนมากจะไม่ใครไวต่อรังสี (หรือแสง) เว้นแต่จะเติมสิ่งแปลกปลอมอื่น ๆ ลงไปด้วย เช่น  $Ag_2S$ ,  $AgI$  เป็นต้น ฉะนั้น จึงมีข้อเสนอแนะว่าสิ่งแปลกปลอมที่เติมนั้นเป็นศูนย์กลางความไว และเป็นจุดรวมของการเกิดภาพแฝง

2.2.1.2 สภาพนำไฟฟ้าในผลึกเงินโบรไมด์ (Conductivity in the  $AgBr$ )

2.2.1.2.1 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากไอออน (Ionic conductivity)

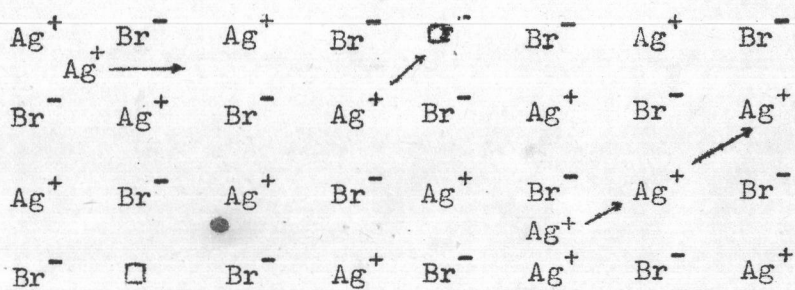
ผลการทดลองของ พ. Jost (1938) และอีกหลายท่าน<sup>1</sup> พบว่า ถ้าเราทำให้มีศักดาไฟฟ้าผ่านผลึก  $AgBr$  ขนาดใหญ่ในที่มืด และมีอุณหภูมิต่ำแล้ว (ตามภาพที่ 2.2 ผลึกจะมีสภาพเป็นฉนวน (Insulator) คือ จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขั้วทั้งสองเลย แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะสังเกตเห็นว่ามีสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมีความสัมพันธ์ต่อกัน



ภาพที่ 2.2 การทดลองหาสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากไอออน

<sup>1</sup> R.H., Herz, The photographic action of ionizing radiations (New York : John Wiley and Sons. 1969) p.66

จากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ว่า สภาพนำไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของเงินไอออน ( $Ag^+$ ) ผ่านตลอดผลึก โดยสมมุติฐานที่ว่า  $Ag^+$  บางตัวที่อยู่ในตำแหน่งจุดกลางคานผิวหน้าของผลึก  $AgBr$  (ดังแสดงในภาพที่ 2.3 เคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปสู่อีกตำแหน่งหนึ่ง ซึ่งอยู่ระหว่างโครงผลึกเช่นเดียวกัน



ภาพที่ 2.3 ภาพ 2 มิติ แสดงการเกิดสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากไอออนในผลึก ขณะเดียวกันนั้น  $Ag^+$  ซึ่งอยู่ในตำแหน่งเรียงตัวธรรมดาของโครงผลึกจะเคลื่อนที่ไปสู่ช่องว่างที่มีอยู่ จากการเคลื่อนที่อย่างมีความสัมพันธ์ต่อกันระหว่าง  $Ag^+$  และช่องว่างที่มีความสอดคล้องกันในผลึกนี้เอง เป็นผลให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าขึ้น ยิ่งอุณหภูมิสูงก็จะมี  $Ag^+$  และช่องว่างมากขึ้น การเคลื่อนที่ของ  $Ag^+$  ก็เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย

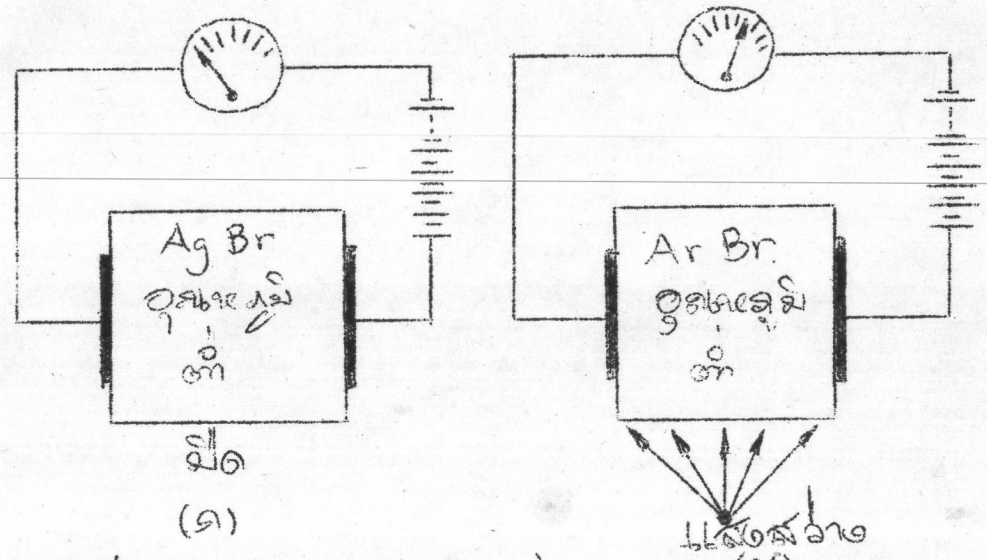
สำหรับปัญหาที่ว่า ในตำแหน่งกลางระหว่างโครงผลึกเป็นไปได้อย่างไรจะมีทั้ง  $Ag^+$  และ  $Br^-$  อย่างไรก็ตามก็ผลของสภาพนำไฟฟ้าก็ยังเกิดจาก  $Ag^+$  เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจาก  $Br^-$  (หรือเฮไลด์ไอออนอื่น ๆ) มีขนาดใหญ่เกินไปที่จะสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ เมื่อเทียบกับขนาดของช่องว่างในผลึก

2.2.1.2.2 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสงสว่าง (Photoconductivity)

นอกจากการเกิดสภาพนำไฟฟ้าของผลึก  $AgBr$  เนื่องจากความร้อนดังที่กล่าวในข้อ 2.2.1.2.1 แล้ว ได้มีการทดลองพบว่า ถ้ามีการส่องแสงสว่างลงบนผลึก  $AgBr$  จะสังเกตพบว่า มีสภาพนำไฟฟ้าเกิดขึ้นเช่นเดียวกัน

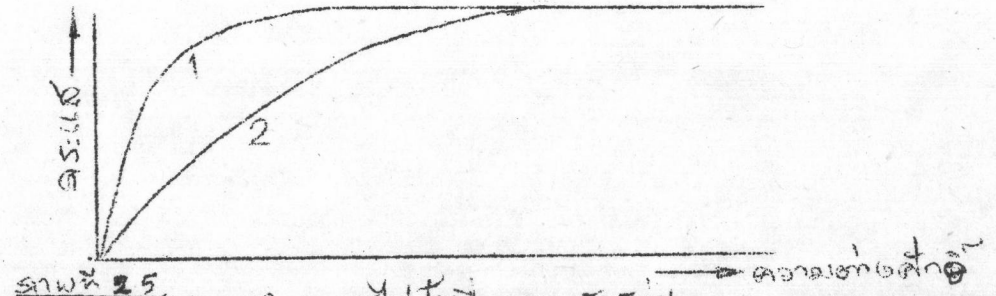


(ดังภาพที่ 2.4 ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจาก  $Br^-$  (ตามปฏิกิริยา  $Br^- + \text{แสงสว่าง} \rightarrow Br + e^-$ ) สามารถเคลื่อนที่ผ่านผลึกภายใต้อิทธิพลของสนามไฟฟ้าได้



ภาพที่ 2.4. สนามไฟฟ้าในผลึก AgBr และ ArBr ภายใต้แสงสว่าง.

จากการทดลองของ W. Lehfeldt (1935)<sup>1</sup> พบว่า ถ้าส่องแสงสว่างคงที่ลงบนผลึก AgBr ตลอดเวลา จะมีกระแสไฟฟ้าเนื่องจากแสงสว่าง (Photocurrent) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (สำหรับผลึก AgBr บริสุทธิ์) ในระยะแรกที่เพิ่มความต่างศักย์ แล้วจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และถึงจุดอิ่มตัวในที่สุด อัตรากการเพิ่มของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากผลึก AgBr ที่มีเงินคอลลอยด์ (Colloidal silver) นั้นจะช้ากว่าจากผลึก AgBr บริสุทธิ์ ตามภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5. ผลของการมีเงินคอลลอยด์ในผลึก AgBr ที่มีแสงสว่างส่องลงมา  
 (1) - สำหรับผลึก AgBr บริสุทธิ์  
 (2) - สำหรับผลึก AgBr ที่มีเงินคอลลอยด์ปนอยู่

<sup>1</sup> R.H. Herz, The photographic action of ionizing radiations (New York : John Wiley and Sons, 1969) p. 67

จะเห็นได้ว่าผลึกของเงินเฮไลต์ที่เปลี่ยนแปลงปลอม เช่น เงินคอลลอยด์ เป็นต้นนั้น จะต้องใช้ความต่างศักย์ที่สูงกว่า เมื่อใช้กับเงินเฮไลต์บริสุทธิ์ ทำให้วินิจฉัยได้ว่า นิวเคลียสของเงินคอลลอยด์ทำหน้าที่เสมือนกับดัก ซึ่งจะจับอิเล็กตรอนไว้ เป็นผลให้ระยะทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยเฉลี่ยในผลึกสั้นลง ดังนั้น จึงเกิดการแสไฟฟ้าผ่านลดลง

จากผลการทดลองเกี่ยวกับการเกิดสภาพนำไฟฟ้าทั้ง 2 ประการดังกล่าว จึงมีข้อเสนอแนะว่า แม้ในอนุกรมที่ห้องธรรมชาติ ผิวหน้าของผลึกเงินโบรไมด์จะมี  $Ag^+$  บางตัวอยู่ในตำแหน่งกลางระหว่างโครงผลึก  $Ag^+$  เหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว เมื่อถูกกระตุ้นด้วยพลังงานเพียงเล็กน้อย คือเพียง 0.15 eV. ในขณะที่  $Ag^+$  ที่อยู่ในตำแหน่งเรียงตัวเป็นระเบียบในโครงผลึกต้องใช้ถึง 1.27 eV. จึงจะเคลื่อนที่ได้

### 2.2.2 รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมากับการเกิดภาพแฝง

รังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่มีพลังงานเท่ากันนั้น จะมีคุณสมบัติเหมือนกันทุกประการ ที่มีชื่อเรียกต่างกันเนื่องมาจากมีแหล่งกำเนิดต่างกัน กล่าวคือ รังสีแกมมาถูกปล่อยออกมาจากภายในนิวเคลียส แต่รังสีเอกซ์ถูกปล่อยจากภายนอกนิวเคลียส

เมื่อรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาทะลุผ่านฉากรับฟิล์ม ก็จะทำให้เกิดภาพแฝงโดยการทำปฏิกิริยากับผลึก  $AgBr$  แบบ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค (Photoelectric effect) หรือ คอมพ์ตัน เอฟเฟค (Compton effect) หรือ แพร์ โพรดักชัน (Pair production) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีที่ตกกระทบ โอกาสการทำปฏิกิริยา สามารถแสดงได้ในรูปของสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืน (Absorption coefficient)<sup>2</sup> ดังภาพที่ 2.6 การดูดกลืนพลังงาน-

- 
- 1 R.H. Herz, The photographic action of ionizing radiations (New York : John Wiley and Sons, 1969) p 67
  - 2 V.F. Kozlov, Photographic dosimetry of ionizing radiation. (Jerusalem : Israel Program for Scientific Translation 1966) p 26



แบบต่าง ๆ ดังกล่าว จะมีผลทำให้เกิดอิเล็กตรอนพลังงานสูงขึ้น อิเล็กตรอนเหล่านี้จะกระจายพลังงานส่วนใหญ่ให้กับอิมัลชันในรูปของเอกไซเทชัน (Excitation) และไอออไนเซชัน (Ionization) ซึ่งพลังงานที่สูญเสียไปนั้น สามารถคำนวณได้จากสูตรของ Bethe<sup>1</sup> สำหรับอนุภาคที่มีประจุใด ๆ คือ

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi n z^2 (ze^2)^2}{m_0 v^2} \left[ \ln 2 \left( \frac{m_0 v^2}{I} \right)^2 + 1 - \beta^2 \right]$$

โดยที่  $-\frac{dE}{dx}$  = การสูญเสียพลังงานต่อระยะทางเคลื่อนที่ของอนุภาค

$n z$  = จำนวนอิเล็กตรอนในตัวกลางที่ใช้หยุดอนุภาค

$I$  = Ionization potential ของตัวกลาง

$m_0$  = Electron rest mass

$v$  = ความเร็วของอนุภาค

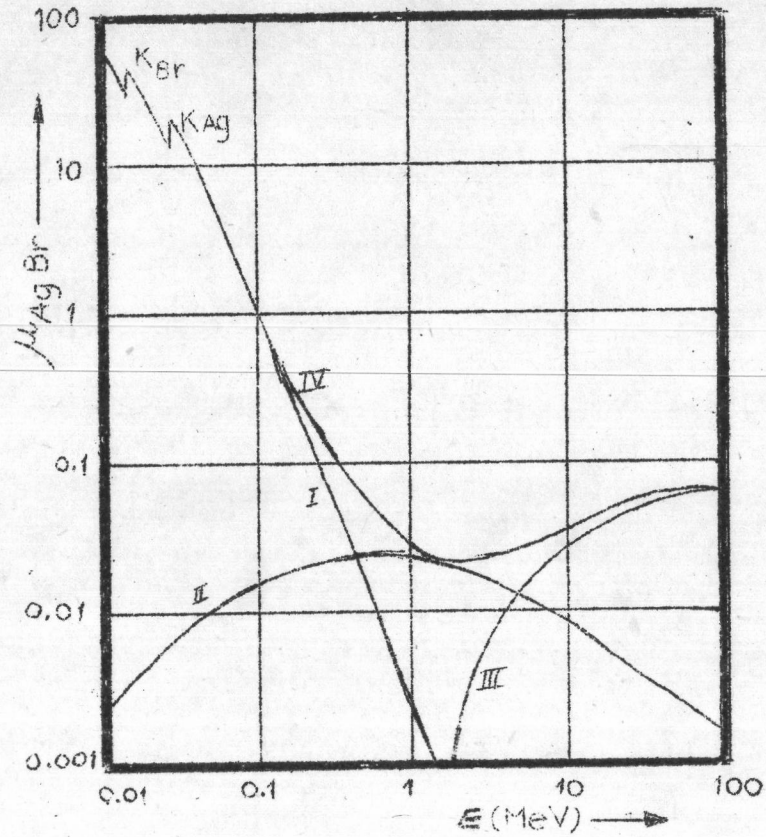
$ze$  = ประจุของอนุภาค (กรณีทีอนุภาคเป็นอิเล็กตรอนค่า  $z = 1$ )

$\beta$  =  $\frac{v}{c}$  ซึ่งค่า  $c$  = ความเร็วแสง

สำหรับการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนในอิมัลชันวัตรังสีเอกซ์<sup>2</sup> จากการคำนวณโดยใช้สูตรนี้ (ดังภาพที่ 2.7) พบว่าอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำจะมีกำลังในการทำให้แตกตัว (Ionizing power หรือ  $-\frac{dE}{dx}$ ) มากกว่าอิเล็กตรอนพลังงานสูง และกำลังในการทำให้แตกตัวจะมีค่าอิมิตัวคงที่ซึ่งเป็นค่าต่ำสุด เมื่ออิเล็กตรอนมีพลังงานประมาณ 600 keV ขึ้นไป

1 V.F. Kozlov, Photographic dosimetry of ionizing radiation.  
(Jerusalem : Israel Program for Scientific Translation  
1966) p 26

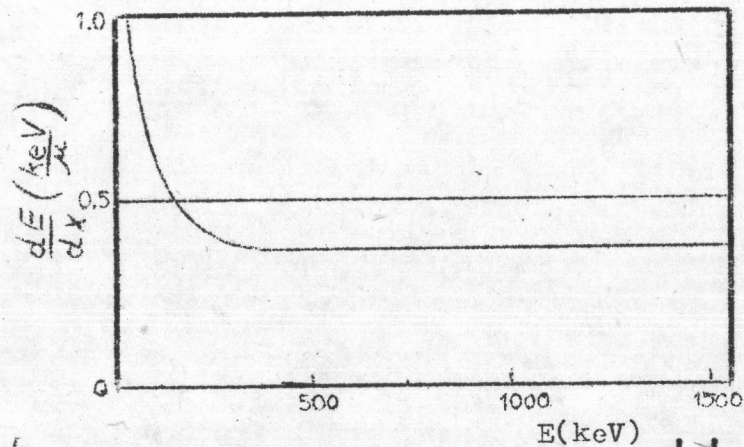
2 R.H. Herz, The photographic action of ionizing radiations  
(New York : John Wiley and Sons. 1969) p 96



ภาพที่ 2.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาใน  
ผลึก AgBr

- I - โฟโตอิเล็กทริก เอฟเฟค
- II คอมพ์ตัน เอฟเฟค
- III แพร่โปรคักชัน
- IV การดูดกลืนทั้งหมด

$K_{Ag}$  และ  $K_{Br}$  เป็น K-absorption edge ของเงินและโบรมีนตามลำดับ



ภาพที่ 2.7 อัตราการสูญเสียพลังงานของอิเล็กตรอนโดยเฉลี่ยต่อระยะทาง  $\frac{keV}{\mu}$   
ในอิมัลชันตัวรังสีเอกซ์ (โดยการคำนวณ)



การถ่ายเทพลังงานของรังสีเอกซ์ หรือแกมมาให้ผลึก  $\text{AgBr}$  นั้น ไม่ใช่ที่จะเป็นการถ่ายเทให้ทั้งหมด แต่จะมีพลังงานบางส่วนแผ่กลับออกมาใหม่ในรูปของรังสีแสงเรือง (Fluorescent radiation) บางส่วนก็หนีหลุดออกมาจากเกรน และอีมีลชันในรูปของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

สำหรับคำอธิบายเกี่ยวกับการเกิดภาพแฝงบนแผ่นฟิล์ม ที่ยอมรับกันโดยทั่วไปนั้น ได้แก่ ทฤษฎีของ J.W. Mitchell (1957, 1962) ซึ่งได้ดัดแปลงจากทฤษฎีของ Mott และ Gurney โดยได้อธิบายกระบวนการเกิดภาพแฝงไว้เป็น 2 ตอน คือ

ตอน 1 กระบวนการของไอออน (Ionic process or ionic motion)

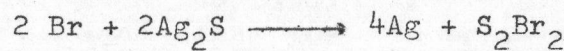
ในผลึก  $\text{AgBr}$  มี  $\text{Ag}^+$  จำนวนหนึ่งเคลื่อนไหวอยู่ในตำแหน่งกลาง-ระหว่างโครงผลึก (ดังที่กล่าวแล้วในข้อ 2.2.1.2)  $\text{Ag}^+$  เหล่านี้ในที่สุดจะถูกจับตัวอยู่ในกับดัก (trap) ทำให้กับดักมีประจุเป็นบวก การจับตัวของ  $\text{Ag}^+$  นี้ยังไม่มีเสถียรภาพพอ อาจมีการแตกตัวเนื่องจากความร้อนกลายเป็นกับดัก และ  $\text{Ag}^+$  ใหม่ได้ อย่างไรก็ตาม  $\text{Ag}^+$  ที่หลุดออกมานี้ก็จะเคลื่อนที่ไปยังกับดักอื่นได้อีก และวนเวียนเช่นนี้เรื่อยไป จนกว่าจะเกิดกระบวนการตอน 2 ขึ้น

ตอน 2 กระบวนการของอิเล็กตรอน (Electronic process or trapping)

เมื่อผลึก  $\text{AgBr}$  ถูกคลื่นพลังงานจากรังสี (หรือแสงสว่าง) ก็จะถ่ายเทพลังงานให้  $\text{Br}^-$  ซึ่งตามปกติจะต้องใช้พลังงาน 6-7 eV ถ่ายเทให้ อิเล็กตรอน ในแถบวาเลนซ์ (Valent band) เคลื่อนที่เข้าสู่แถบคอนดักชัน (Conduction band) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเคลื่อนที่อย่างอิสระตลอดโครงผลึก และสามารถรวมตัวกับ  $\text{Br}$  เป็น  $\text{Br}^-$  ได้ใหม่ (Recombination) หรือถูกจับไว้ในกับดัก ตัวถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอนนี้ก็จะรวมตัวกับ  $\text{Ag}^+$  ซึ่งอยู่ภายในกับดัก

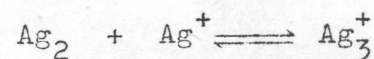
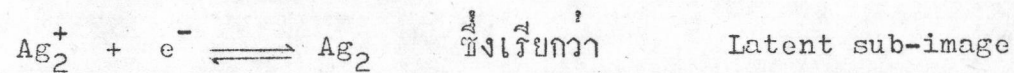
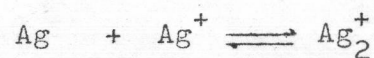
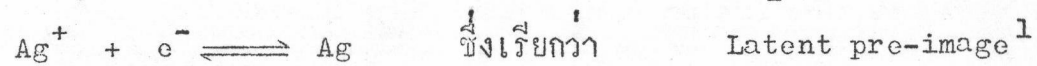
1 Klaus, Becker, Solid State Dosimetry. (Ohio: CRC PRESS. 1973) pp 233-235.

กลายเป็นอะตอมของโลหะเงิน (Ag) อย่างไรก็ตามเนื่องจากกับดักในผลึก AgBr บริสุทธิ์ มีลักษณะที่ ซึ่งอิเล็กตรอนอาจหลุดออกมาได้ง่าย และไปรวมตัวเป็น Br<sup>-</sup> อีก ดังนั้น จึงได้มีการใส่กับดักที่ลึกกว่า คือ Au, Ag<sub>2</sub>S หรืออิออนของโลหะหนักอื่น ๆ เข้าไปบนพื้นผิวของผลึก AgBr เพื่อเพิ่มความไวของอิมัลชัน นั่นคือ สามารถจับอิเล็กตรอนได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ เพราะอย่างยิ่งมีการจับอิเล็กตรอนได้ดีเท่าใด ก็จะยิ่งทำให้มีโอกาสเกิดภาพแฝงได้มากขึ้นเท่านั้น และเพื่อเป็นการป้องกันการรวมตัวใหม่ของอิเล็กตรอนกลายเป็น Br<sup>-</sup> อีก จึงต้องจับ Br ไว้ในเจลาตินด้วย โดยให้ทำปฏิกิริยากับ Ag<sub>2</sub>S



และเป็นที่ยอมรับว่า Ag จากการทำปฏิกิริยานี้อาจถูกนำมาใช้เป็นศูนย์กลางการเกิดภาพแฝงได้

จากการรวมตัวของอิเล็กตรอนกับ Ag<sup>+</sup> ในกับดักได้เป็น Ag นั้นปรากฏว่ายังไม่มีเสถียรภาพพอ อาจมีการสลายตัวเป็น Ag<sup>+</sup> กับดัก และอิเล็กตรอนได้อีก ซึ่งถ้าเป็นตามการสลายตัวนี้ ก็จำเป็นต้องเริ่มตั้งต้นจากระบวนการของอิออนมาใหม่ แต่ถ้าวางช่วงเวลาของการสลายตัวนั้น เกิดการรวมตัวระหว่าง Ag และ Ag<sup>+</sup> ก็จะกลายเป็น Ag<sub>2</sub><sup>+</sup> ซึ่งการรวมตัวนี้ สามารถคงสภาพอยู่ได้โดยประจวบ และสามารถจับอิเล็กตรอนตัวอื่น กลายเป็น Ag<sub>2</sub> ได้ตามปฏิกิริยาต่อไปนี้



1 R.H. Herz. The photographic action of ionizing radiations  
(New York: John Wiley and sons 1969) p 75.



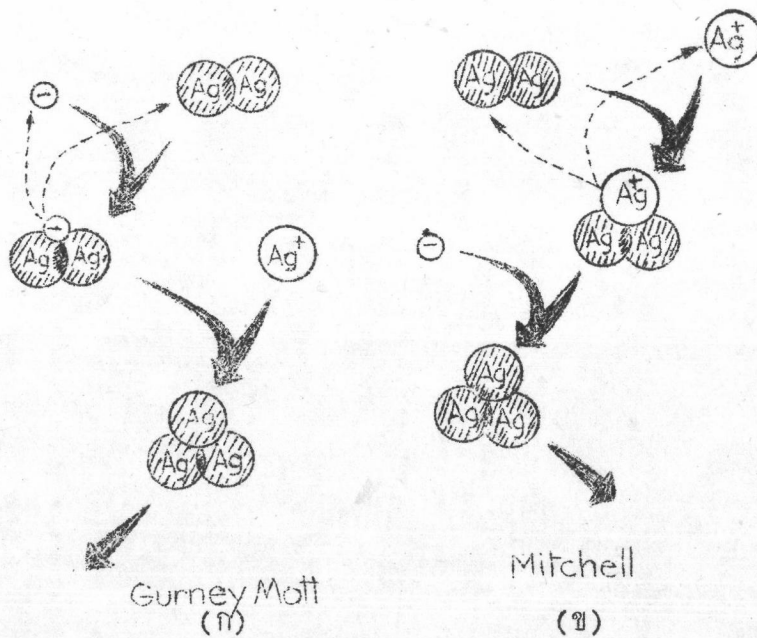
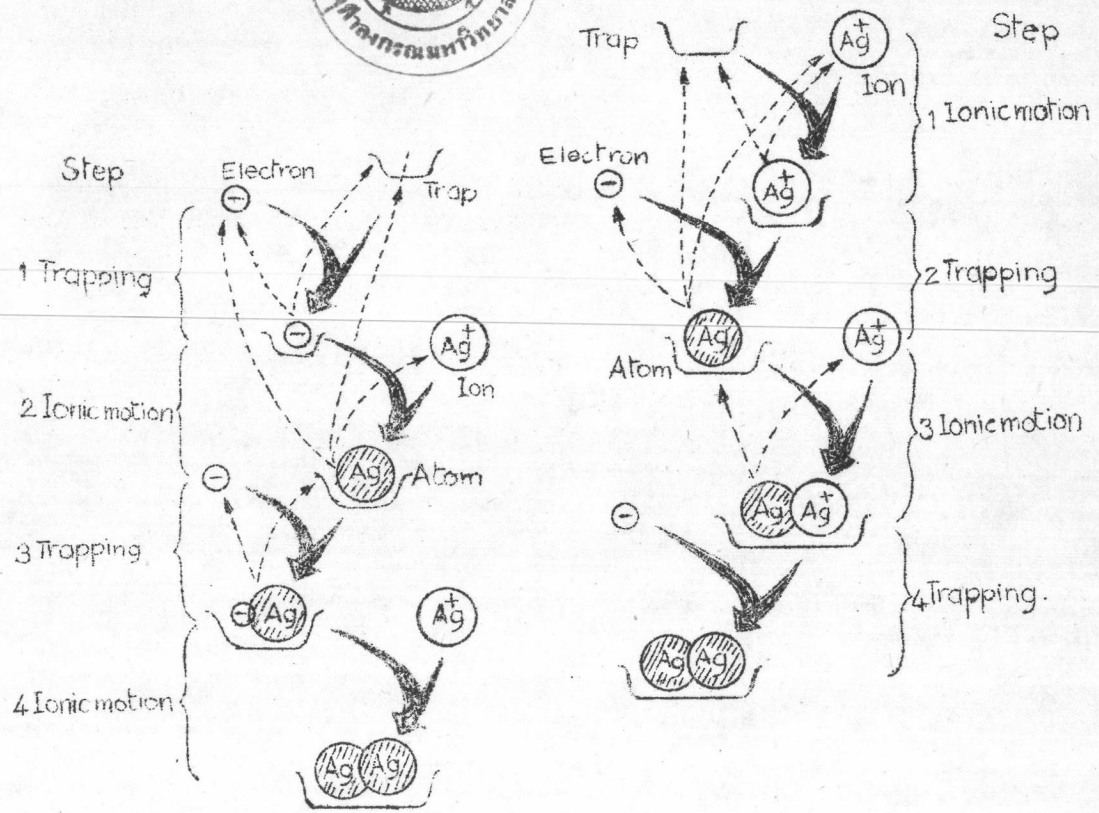
ทฤษฎีการเกิดภาพแฝงของ Mitchell ตั้งที่กล่าวมานี้ต่างจากทฤษฎี  
ของ Mott และ Gurney ตรงที่เกิดกระบวนการของอิเล็กตรอนก่อนแล้ว จึงเกิด-  
กระบวนการของอิเล็กตรอนภายหลัง กล่าวคือ ทฤษฎีของ Mott & Gurney กล่าวว่า  
อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปและถูกจับไว้ในกับดัก ทำให้กับดักมีประจุเป็นลบ  
ก่อน ต่อจากนั้นจึงมี  $Ag^+$  เข้าไปรวมกลายเป็นอะตอมของโลหะเงิน (Ag) และ Ag  
นี้ มีคุณสมบัติเป็นกับดักอิเล็กตรอน คือสามารถจับอิเล็กตรอนได้ เพื่อความเข้าใจ  
ในขั้นตอนการเกิดภาพแฝงจาก 2 ทฤษฎีนี้ ขอให้ดูภาพที่ 2.8<sup>1</sup> หน้า 16

อย่างไรก็ตามจะพบว่าแม้ทฤษฎีทั้งสองจะอธิบายรายละเอียดต่างกันก็ตาม  
แต่ผลสุดท้ายที่ได้เหมือนกัน นั่นคือ เกิดอะตอมของโลหะเงินขึ้นมา และอะตอมของ  
โลหะเงินที่เกิดขึ้นครั้งแรกนี้เองที่เป็นจุดแรกเริ่มของการเกิดภาพแฝง (หรือศูนย์-  
การเกิดภาพแฝง) นั่นคือ จะมีการรวมตัวในลักษณะนี้เรื่อยไป จนกว่าจะเกิดภาพ  
แฝงขึ้น ซึ่งต้องการอะตอมของเงินระหว่าง 4-10 อะตอม อย่างไรก็ตามก็มีกลุ่ม  
อะตอมของเงินขนาดหนึ่งที่เรียกว่า "ขนาดวิกฤต" (critical size) ซึ่งมัน  
จะมีพลังงานพื้นผิว (surface energy) พอที่จะทำให้มีเสถียรภาพมั่นคงต่อการ  
แตกตัวเนื่องจากความร้อน กลุ่มอะตอมของเงินจะมีขนาดวิกฤตเมื่อรวมตัวกันได้  
ประมาณ 4 อะตอม ( $Ag_4$ ) ซึ่งโดยเฉลี่ยแล้วต้องการพลังงานประมาณ 50 eV  
ต่อ 1 มวลวิกฤต

จากคำอธิบายดังกล่าวอาจมีปัญหาคือว่า ทำไมช่องว่างที่มีประจุบวก  
(positive hole) จึงไม่รวมตัวกับอิเล็กตรอนใหม่อีก และ  $Ag^+$  ที่อยู่ในตำแหน่ง  
กลางระหว่างโครงผลึก มีจำนวนมากพอจนกระทั่งสามารถดึงดูดอิเล็กตรอนอิสระ  
ไว้ได้ทั้งหมดหรือ สำหรับปัญหาเหล่านี้ จากการทดลองพบว่า ช่องว่างที่มีประจุบวก  
เคลื่อนที่ไปได้ช้ามาก ประกอบกับอายุเฉลี่ยของอิเล็กตรอนนั้นสั้น ดังนั้น มันจึงมี  
โอกาสในการทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนได้น้อย นอกจากนี้ยังพบว่า จำนวน  $Ag^+$   
บนพื้นผิวของผลึก  $AgBr$  มีมากพอที่จะรวมตัวเป็นภาพแฝงได้

002117

1 J.F. Hamiton and F. Urbach. The mechanism of the formation  
of the latent image, In C.E.K Moes and T.H. James (Eds) The  
theory of photographic process (New York. MacMillan 1966)  
pp 104-105



Gurney Mott (ก)

Mitchell (ข)

ภาพที่ 2.8 แสดงการเกิดภาพแฝงตามทฤษฎีของ Gurney & Mott (ก) และของ Mitchell (ข)



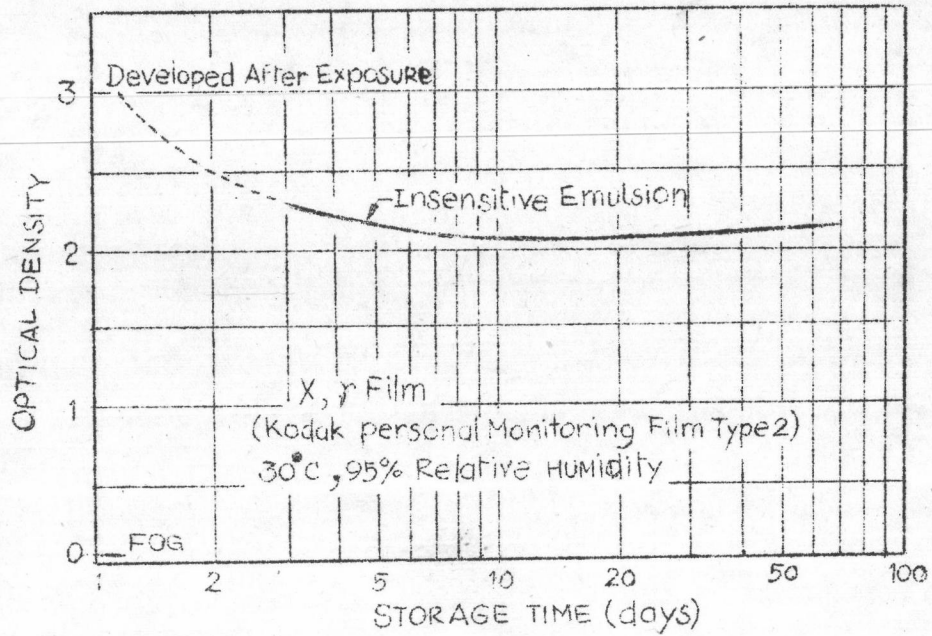
## 2.3 คุณลักษณะของอิมัลชันหลังถูกรังสี

### 2.3.1 การจางหายของภาพแฝง (Latent image fading)

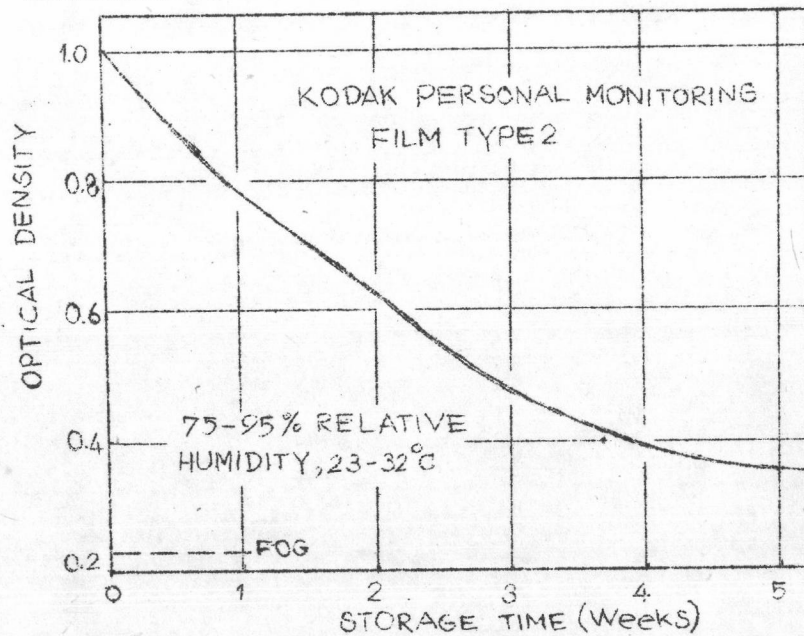
ถ้านำฟิล์มจำนวนหนึ่ง มาฉายรังสีเอกซ์หรือแกมมาที่พลังงานใด ๆ ไปได้ รับปริมาณรังสีเท่ากัน และนำฟิล์มเหล่านั้นมาล้างให้เป็นฟิล์มเนกาตีฟ (Negative film) ในสภาวะอย่างเดียวกัน แต่ให้มีช่วงเวลาระหว่างการฉายรังสีและการล้าง ฟิล์มต่างกัน จะพบว่าความหนาแน่นทึบแสง (Optical Density) บนฟิล์มแต่ละแผ่น นั้นมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งสามารถเห็นได้ชัดว่าฟิล์มที่นำมาล้างในทันทีที่ฉายรังสีเสร็จนั้น มีค่าความหนาแน่นทึบแสงมากกว่า และจะมีค่าลดลงตามลำดับ เมื่อ **เว้นช่วงเวลาให้ นานขึ้น** ปรากฏการณ์นี้เป็นผลมาจากการจางหายของภาพแฝงบนฟิล์ม และจากการ ทดลองดังกล่าวจะสังเกตเห็นว่า ฟอกซ์ (fog) หรือความหนาแน่นทึบแสงที่ปรากฏอยู่ แล้วในธรรมชาติ (background optical density) มีค่าเพิ่มขึ้น สภาพความไว ลดลง และอาจมีการเจริญเติบโตของเชื้อราในเจลาติน ซึ่งเป็นผลให้ชั้นความไว ของอิมัลชันเสียหายได้อีกด้วย<sup>1</sup> อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบัน กลไกแห่งการจางหาย ของภาพแฝงยังไม่เป็นที่เข้าใจอย่างสมบูรณ์นัก แต่มีข้อเสนอแนะซึ่งเป็นที่เห็นพ้อง ตกลงกันว่า กลไกแห่งการจางหายของภาพแฝงนั้นส่วนใหญ่ (90 %) เป็นขบวนการ ทางเคมี นอกนั้นเนื่องมาจากการแตกตัวทางความร้อนของศูนย์เกิดภาพแฝง โดย มีสมมติฐานที่ว่า ขบวนการทางเคมีนั้นเกิดขึ้นเนื่องจากการกระทำร่วมกันทางเคมี ของออกซิเจน (O<sub>2</sub>) และความชื้นที่มีต่อศูนย์เกิดภาพแฝงเหล่านั้น กล่าวคือ เกิดปฏิกิริยา  $2H_2O + O_2 \longrightarrow 2H_2O_2$  ซึ่ง H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> จะไปทำลายศูนย์การเกิด ของเงิน ซึ่งโดยปกติมักจะอยู่บนผิวหน้าของเกรนให้เสียไปเป็นบางส่วน ดังนั้น จึง ทำให้ค่าความหนาแน่นทึบแสงจางลงด้วย ตามปกติอิมัลชันที่มีเกรนละเอียด (fine-grained emulsion) และมีพื้นที่ผิวหน้ามากกว่า มักจะแสดงการจางหาย มากกว่าอิมัลชันที่มีเกรนหยาบ (ตามภาพที่ 2-9 และ 2-10)

1 Klaus Becker. Solid state dosimetry (Ohio : CRC PRESS 1973)

หนึ่งในกระบวนการทางเคมีนี้ การจางหายจะยิ่งเพิ่มมากขึ้น ถ้านำฟิล์มไปเก็บในท้องที่มีอุณหภูมิสูง และในท้องที่มีอุณหภูมิเท่ากัน พบว่าการจางหายจะมีมากตามความชื้นที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.11

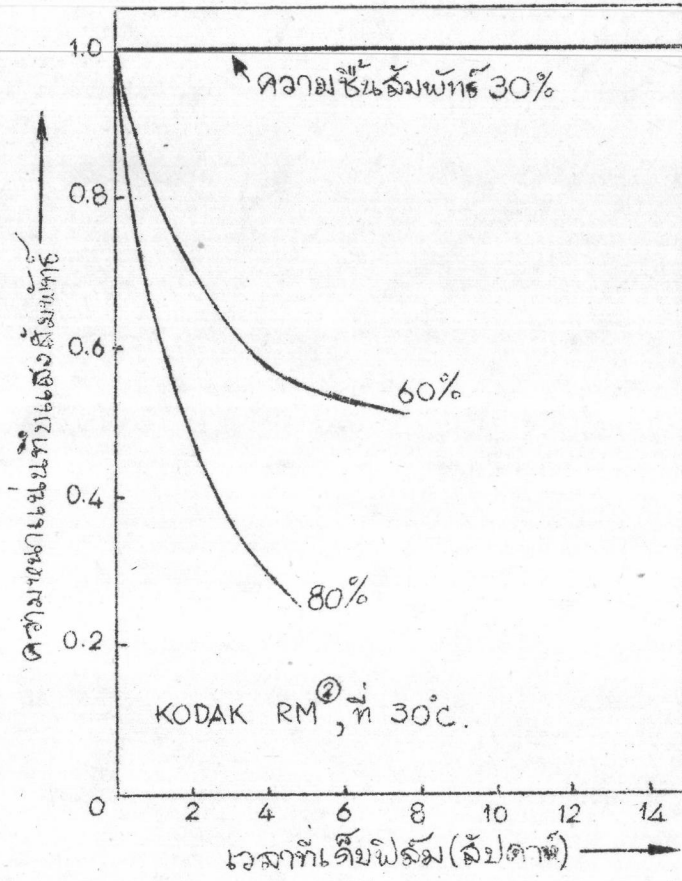


ภาพที่ 2.9 แสดงการจางหายของฟิล์ม X,  $\gamma$  Ray (ความชื้นน้อย)



ภาพที่ 2.10 แสดงการจางหายของฟิล์ม X,  $\gamma$  Ray (ความชื้นสูง)





ภาพที่ 2.11

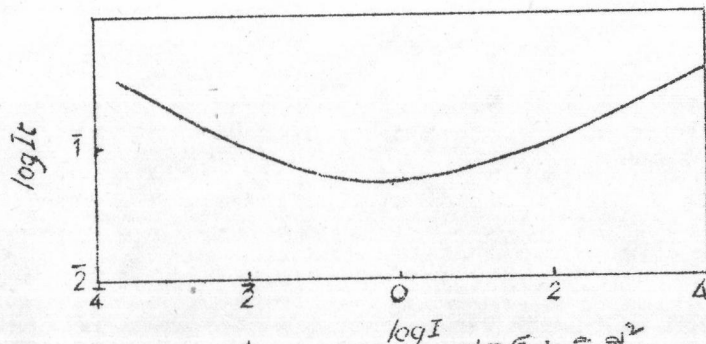
แสดงอิทธิพลของความ<sup>ชัด</sup>สูง  
ต่อการวางหายของภาพ<sup>ชัด</sup>แสง

อย่างไรก็ตาม ไม่ปรากฏว่ามีการศึกษาเกี่ยวกับการจางหายของภาพแฝงสำหรับฟิล์มถ่ายรูปทั่วไปแต่อย่างใด ทั้งนี้ อาจเป็นไปได้ที่จะคิดว่าไม่มีความจำเป็น เพราะในทางปฏิบัติแล้ว สามารถใช้เทคนิคของกระบวนการล้างฟิล์ม ช่วยทำให้ฟิล์มปรากฏภาพชัดเจนมากหรือน้อยได้ตามต้องการ

### 2.3.2 กฎรีซิโพรซิตี (Reciprocity law)

กฎรีซิโพรซิตี (หรือ Bunsen-Roscoe law)<sup>1</sup> กล่าวว่า "ผลของรังสีที่มีต่อฟิล์มนั้น ขึ้นอยู่กับผลคูณของความเข้มของรังสี และเวลาที่ใช้ ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราการได้รับรังสี" กฎนี้นำมาใช้สำหรับการบันทึกรังสีด้วยฟิล์ม ซึ่งมีมันจะไม่เป็นปัญหาแต่อย่างใดไม่ว่าจะเป็นการได้รับปริมาณรังสีมากในช่วงเวลาสั้น หรือปริมาณรังสีน้อย ในช่วงเวลานาน ทั้งนี้ เท่าที่ผลคูณของปริมาณรังสีกับเวลา และคุณภาพของรังสีมีค่าคงที่ ดังนั้น กฎนี้จึงมีประโยชน์มากสำหรับการบันทึกรังสีด้วยฟิล์ม เพราะการวัดปริมาณรังสีในทางปฏิบัตินั้น เป็นสิ่งไม่แน่นอนที่ว่าคุณจะได้รับปริมาณรังสีใด ๆ ในเวลา 2-3 วินาที หรือ 2-3 วัน

จากผลการทดลองใช้ฟิล์มกับแสงสว่าง พบว่า มีความล้มเหลวของกฎรีซิโพรซิตี (Reciprocity failure) กล่าวคือ ไม่เป็นไปตามกฎรีซิโพรซิตี ดังแสดงในภาพที่ 2.12



$I$  = ความเข้ม

$t$  = เวลา

ภาพที่ 2.12 แสดงความล้มเหลวของกฎรีซิโพรซิตี

1 R.H. Herz. The photographic action of ionizing radiations

(New York : John Wiley and Sons. 1969) p 128



จะเห็นได้ว่าค่าที่เหมาะสมของ  $\log I$  อยู่ที่จุดต่ำสุดของเส้นกราฟ และบริเวณที่มีค่าความเข้มต่ำและสูงกว่านี้ ต้องใช้ปริมาณแสงมากกว่า ทั้งนี้ เพื่อให้จะให้โตคาความหนาแน่นที่แสงคงที่เท่ากับ 0.2 บริเวณทางด้านซ้ายมือของจุดต่ำเรียกว่า "Low intensity failure" และทางด้านขวามือเรียกว่า "High intensity failure" อย่างไรก็ตาม W.F. Berg (1940) พบว่า ถ้าใช้เวลาถูกแสงสั้นมาก (น้อยกว่า  $10^{-5}$  วินาที) แล้ว จะได้ผลเป็นไปตามกฎรีซี-โปรชิตี

การเกิด Low intensity failure (ใช้เวลานาน) สามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากความไม่เสถียรภาพของภาพแฝงในสภาวะที่เริ่มก่อตัวใหม่ ๆ เพราะจากการตรวจพบว่า Low intensity failure ลดลงได้อย่างมากที่อุณหภูมิต่ำ สรุปได้ว่าการจางหายของภาพแฝงเกี่ยวข้องกับการแตกตัวเนื่องจากความร้อนของอะตอมโลหะเงิน ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกมา และไอออนเงินจะพุ่งกระจายหนีไปในปริมาณแสงที่มีความเข้มต่ำ ช่วงเวลาการปล่อยของอิเล็กตรอนออกมาแต่ละตัวนั้น ยาวนาน ซึ่งนานพอที่จะเกิดการแตกตัวขึ้นได้ ส่วนการเกิด High intensity failure (ใช้เวลาสั้น) นั้น อธิบายได้จากสมมติฐานของ Gurney & Mott ว่า เนื่องจากความเฉื่อยช้าของการอพยพ  $Ag^+$  ไปตำแหน่งกลางระหว่างโครงผลึก ความเข้มสูงทำให้โฟตอนของแสงที่ตามมาแต่ละตัวจะเร็วมาก จนกระทั่งการเคลื่อนไหวของ  $Ag^+$  ตรงไปยังกับดักอิเล็กตรอนเกิดขึ้นไม่ทัน ดังนั้น การรวมตัวของอะตอมของเงินในอัตราที่ต้องการ จึงมีค่าลดลง นอกเหนือจากนี้ โอกาสที่อิเล็กตรอนถูกไล่โดยศูนย์กลางเกิดภาพที่มีประจุลบ (ซึ่งยังไม่ได้ถูกทำให้เป็นกลางโดย  $Ag^+$ ) มีมากขึ้น ดังนั้น อัตราการจับอิเล็กตรอนก็ลดลงด้วย สำหรับการที่ใช้เวลาถูกแสงน้อยกว่า  $10^{-5}$  วินาที แล้วก็ยังคงเป็นไปตามกฎรีซี-โปรชิตีนั้น สามารถอธิบายโดยข้อสมมติที่ว่า อิเล็กตรอนถูกปล่อยออกมาก่อนที่จะปรากฏกระบวนการแรกสุดของการเกิดภาพแฝงขึ้น

อนึ่ง การที่กฎรีซี-โปรชิตี สามารถใช้ได้สำหรับรังสีนั้น สามารถอธิบายได้ว่า สภาวะที่รังสีแต่ละโฟตอนถูกดูดกลืนในเกรน เพื่อก่อให้เกิดภาพแฝงนั้น ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ถูกดูดกลืน (ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราของปริมาณรังสีที่ตกกระทบ) การถูกรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมามานั้นเป็นแบบความเข้มสูง ประการนี้จะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากถูกปล่อย

ออกมาจากภายในเกรน โดยการดูดกลืนพลังงานเพียงครั้งเดียว ปรากฏว่าช่วงเวลาของการปล่อยอิเล็กตรอนน้อยกว่า  $10^{-5}$  วินาทีอยู่มาก กล่าวคือประมาณ  $10^{-12}$  -  $10^{-14}$  วินาที ฉะนั้น จึงเป็นไปตามกฎรีซีโพรซิตี

อย่างไรก็ตามมีข้อยกเว้นสำหรับกฎรีซีโพรซิตีเป็นบางกรณี กล่าวคือ ถ้าความไวของเกรนมีไม่เพียงพอสำหรับกระบวนการของการจับเพียงหนึ่งครั้ง (one hit process) การดูดกลืนพลังงานมีค่ากว่าขีดจำกัด ทั้งนี้เพราะอิเล็กตรอนจากรังสีแกมมา<sup>1</sup> <sup>พลังงานสูงมา</sup> ดังนั้นจึงอาจพบความล้มเหลวของกฎรีซีโพรซิตี ในอิมัลชันแบบช้า (Slow emulsion) ได้ จึงทำให้เกิดความหนาแน่นที่แสงขึ้นอยู่กับอัตราปริมาณรังสี ดังผลการทดลองของ N.J.P. Chassende-Baroz (1961)<sup>1</sup> (แสดงให้เห็นถึงภาพที่ 2.14) และของ M. Ehrlich (1956)<sup>2</sup> ซึ่งทดลองด้วยรังสีเอกซ์ พลังงานต่ำ (50 keV) และพบความล้มเหลวของกฎรีซีโพรซิตีในช่วงค่าความหนาแน่นที่แสงสูง ๆ (ถึงภาพที่ 2.13)

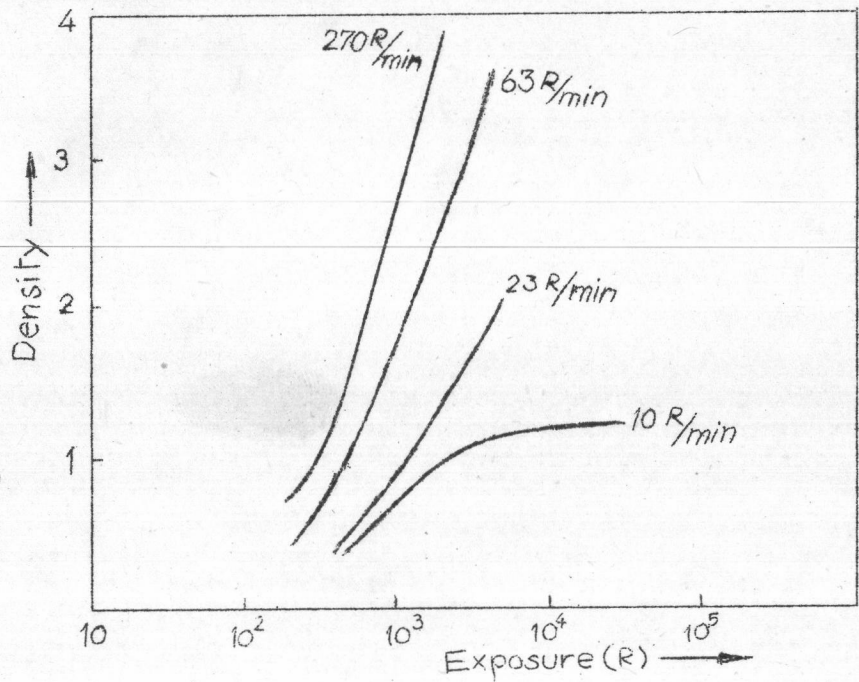
### 2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่แสงและปริมาณรังสี

เมื่อนำฟิล์มไปอบรังสีชนิดใดชนิดหนึ่ง ตามปริมาณรังสีที่ต้องการ และได้ นำฟิล์มนั้นมาผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม (ดูรายละเอียด ข้อ 2.4.1) แล้ว จะปรากฏว่าบริเวณที่ถูกรังสีนั้นจะมีลักษณะดำ ซึ่งความดำนี้จะมีค่าแปรตามปริมาณรังสีที่ได้รับ ดังนั้น ผลสนองตอบของอิมัลชันต่อรังสีจึงถูกวัดในรูปของความหนาแน่นของบริเวณที่มีลักษณะดำนั้น (ดูรายละเอียด ข้อ 2.4.2) ซึ่งเรียกว่า "ความหนาแน่นที่แสง (Optical density)"

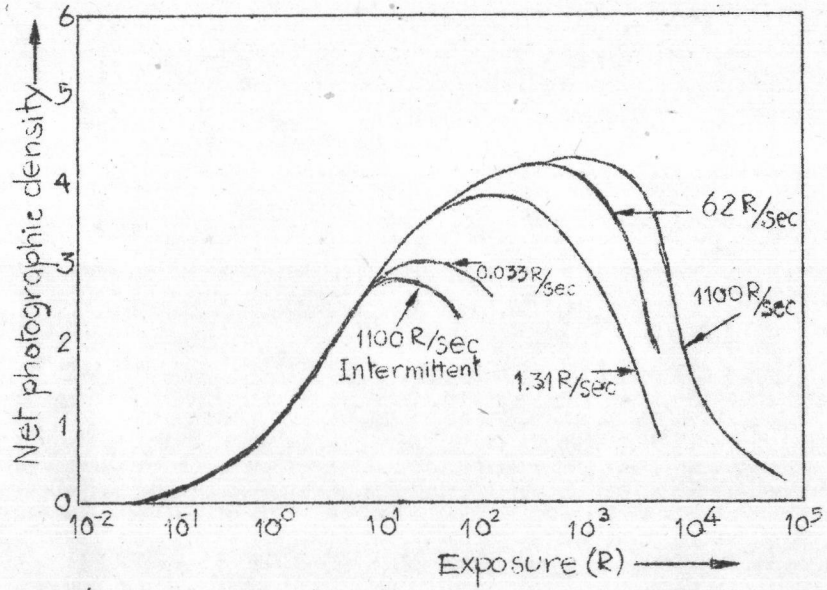
1 R.H. Herz. The photographic action of ionizing radiations  
(New York: John Wiley and Sons. 1969) p 131

2 R.H. Herz. "loc. cit."





ภาพที่ 2.13 แสดง Reciprocity failure ของฟิล์มชนิด 66 แบบขาว



ภาพที่ 2.14 แสดง Characteristic curve ของฟิล์มวัดรังสีเอกซ์ ที่อัตราการหมุนรังสีต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่รับแสงของฟิล์ม และปริมาณรังสี (จากรังสีชนิดเดียวกัน และมีพลังงานเท่ากัน) เรียกว่า "Sensitometry" ซึ่งมีความสำคัญยิ่งในด้านการวิเคราะห์ปริมาณรังสีที่บุคคลได้รับจากฟิล์ม

เราสามารถหา Sensitometric curve ได้จากการพลอตค่าความหนาแน่นที่รับแสง กับปริมาณรังสี ซึ่งมี 3 วิธี

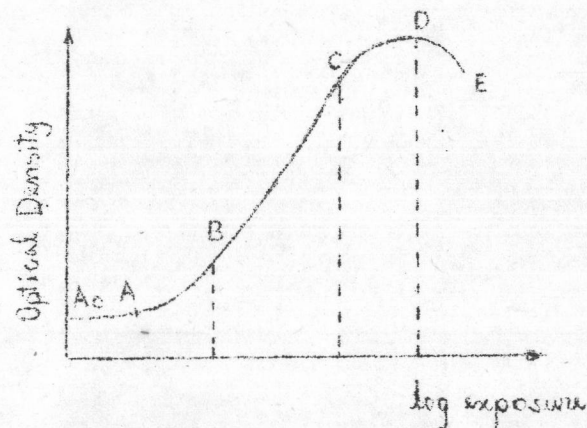
ก. Linear density VS. linear exposure

ข. Log density VS. log exposure

ค. Linear density VS. log exposure หรือ H & D curve หรือ Characteristic curve

จากความสัมพันธ์ตามวิธีดังกล่าวนี้ พบว่า ใน 2 วิธีแรกจะได้ Sensitometric curve เป็นเส้นตรง โดยเฉพาะวิธี ข. ซึ่งนิยมใช้ปฏิบัติการในห้องทดลอง ทั้งนี้ เพราะสามารถแสดงช่วงความหนาแน่นได้แม่นยำ สำหรับค่าความหนาแน่นที่รับแสงต่ำ ๆ หรือเมื่อปริมาณรังสีน้อย ๆ และที่ปริมาณรังสีสูงกว่าก็จะกลายเป็นเส้นตรง เมื่อใช้วิธีการแบบ ค.

ตามปกติลักษณะของ Characteristic curve จะเป็นแบบเดียวกัน แต่อาจมีส่วนที่แตกต่างกันบ้าง ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของฟิล์ม และพลังงานของรังสี อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแล้ว Characteristic curve จะมีลักษณะโค้งอันประกอบด้วยส่วนต่อเนื่องที่กลมกลืนกัน 5 ส่วน (ดังภาพที่ 2.15) คือ



ภาพที่ 2.15  
แสดงลักษณะของเส้น  
Characteristic curve



- A.A เรียกว่า "Region of inertia" ซึ่งค่าความหนาแน่นที่แสงไม่เพิ่มขึ้น  
พร้อมกับค่า Log Exposure โดยแท้จริง
- AB เรียก "Underexposure region หรือ Toe" มีค่าความหนาแน่นที่แสง  
เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับปริมาณรังสี (Exposure)
- BC เรียก "Region of correct exposure" บริเวณนี้มีลักษณะเป็นเส้นตรง  
ซึ่งค่าความหนาแน่นที่แสงเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับ Log Exposure เรานิยม  
ใช้บริเวณนี้วัดปริมาณรังสี
- CD เรียก "Overexposure region หรือ Shoulder" ซึ่งค่าความหนา-  
แน่นที่แสงเพิ่มขึ้นโดยไม่เป็นนัยสำคัญ หรือไม่ทั้งหมดกับปริมาณรังสี
- DE เรียก "Reversal or Solarization region" เป็นบริเวณซึ่งแม้ว่า  
ปริมาณรังสีจะเพิ่มมากขึ้น แต่ค่าความหนาแน่นที่แสงกลับมีค่าลดลง ในทาง  
ปฏิบัติไม่นิยมช่วงบริเวณนี้ในการวัดปริมาณรังสี

กลไกของการเกิด Reversal หรือ Solarization นั้น ในปัจจุบัน  
ยังไม่สามารถทราบได้อย่างแน่ชัด อย่างไรก็ตาม เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่า  
Rebromination Hypothesis<sup>1</sup> สามารถอธิบายกลไกของการเกิด Solari-  
zation ได้ กล่าวคือ เมื่อรังสีปริมาณสูงตกกระทบฟิล์มจะเกิดอิเล็กตรอน  
อิสระ และโบรมีนจำนวนมาก ซึ่งโบรมีนนี้เกิดขึ้นในอัตราสูงมาก และมีจำนวนมาก  
เกินที่ตัวรับฮาโลเจนในเจลาตินจะกำจัดออกไปได้ทัน ประการนี้ อาจเกิดการกระทำ  
ให้ผิวของภาพแฟงเสียหาย โดยการรวมตัวใหม่ของโบรมีนออกอนขึ้น เหล่านี้เป็น  
ผลให้เกิดภาพแฟงจำนวนไม่มากเท่าที่ควร นอกจากนี้ พบว่า Solarization เกี่ยว  
ข้องกับการกระจายของภาพแฟงภายในเกรนด้วย อย่างไรก็ตาม การเกิด  
Solarization จะแตกต่างกันอย่างมาก ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของฟิล์ม อัตราการ  
ได้รับปริมาณรังสี และกระบวนการล้างฟิล์ม

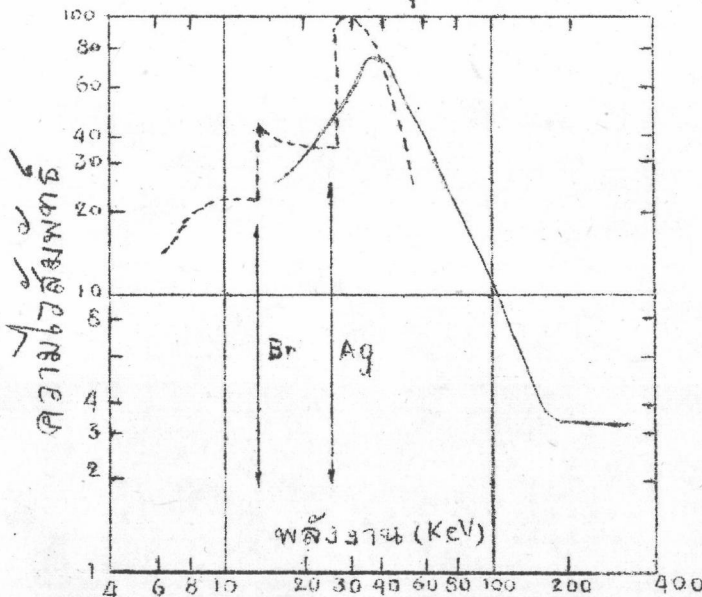
1 R.H. Herz. The photographic action of ionizing radiations  
(New York: John Wiley and Sons 1969) pp 136-137

2.3.4 การขึ้นอยู่กับพลังงาน (Energy dependence)

ในการนำฟิล์มมาใช้งานคำนวณปริมาณรังสีนั้น จะต้องศึกษาถึงผลสนองตอบของเงินเฮไลต์ที่ใช้ในอิมัลชันเสียก่อน กล่าวคือ ศึกษาอิทธิพลของรังสีพลังงานต่าง ๆ ที่มีต่อฟิล์ม โดยที่มีแถบความไว (Spectral sensitivity) คงที่

คำว่า "ความไว" (Sensitivity) ได้รับความนิยามว่าเป็น ส่วนกลับของปริมาณรังสีในอากาศ ซึ่งจำเป็นที่จะทำให้เกิดค่าความหนาแน่นที่เบงบนฟิล์มเท่าที่กำหนดค่าให้ใด ๆ

แฟกเตอร์สำคัญในการขึ้นอยู่กับพลังงานของอิมัลชันสำหรับรังสีเอกซ์ และแกมมา ก็คือ อัตราส่วนมวลสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Mass absorption Coefficients) ของ AgBr ต่อของอากาศ (ตามภาพที่ 2.17 หน้า 27)<sup>1</sup> อัตราส่วนนี้จะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 30 keV. และลดต่ำลงมากด้วยอัตราที่เกือบจะคงที่ จนเหลือค่าต่ำสุดที่ประมาณ 400 keV. ตามภาพที่ 2.16<sup>2</sup>

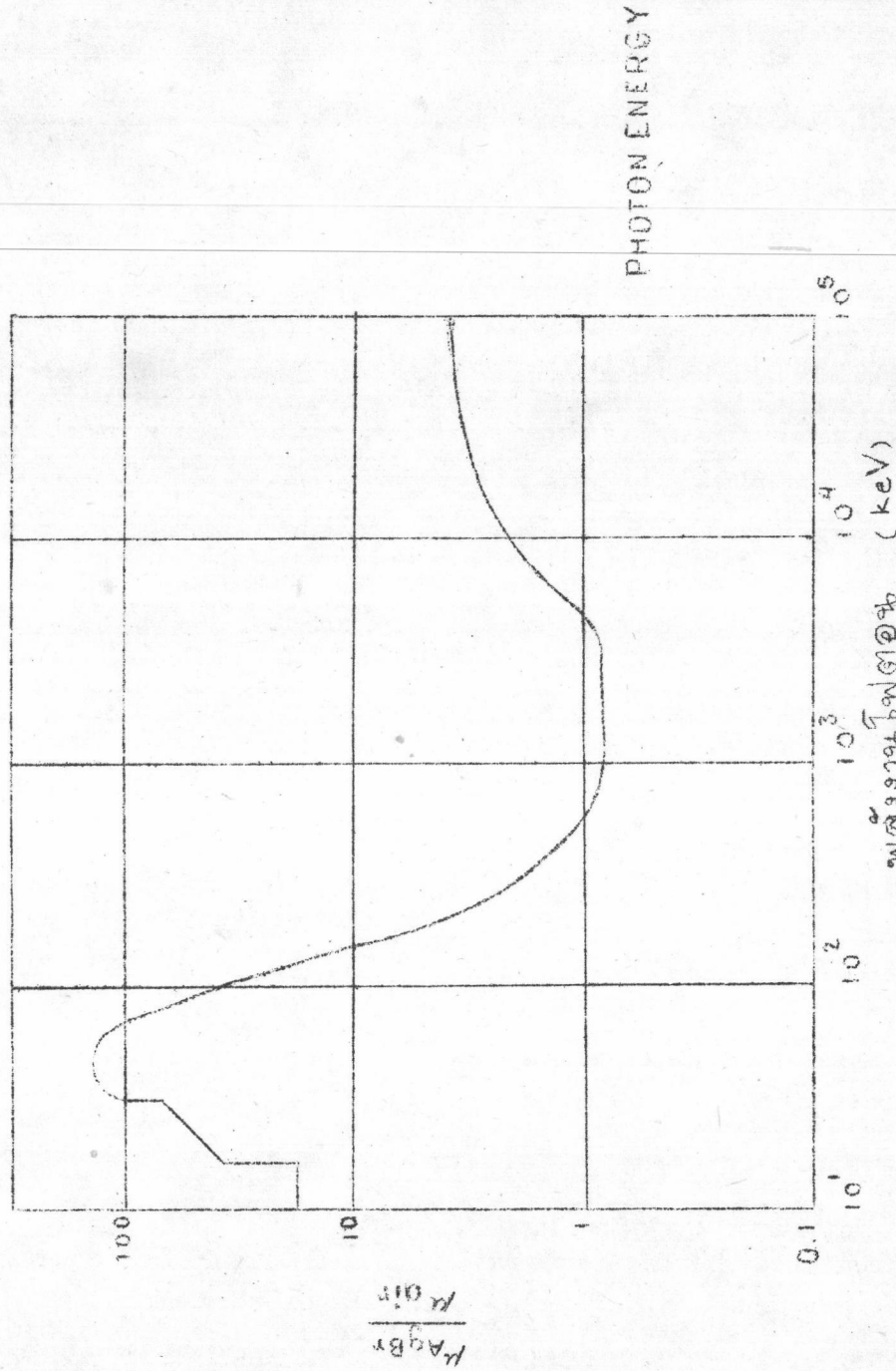


ภาพที่ 2.16 แสดงแถบความไวของฟิล์มเอ็กซเรย์  
 ----- keV  
 \_\_\_\_\_ keV<sub>eff</sub>

1 Klaus Becker. Solid State Dosimetry (Ohio: CRC press 1973) pp 252-253

2 G.M. Corney. Photographic effects of X-rays and gamma, In C.E.K. Mees and T.H. James (3<sup>rd</sup> Ed.) the Theory of photographic process (New York: Mac Millan. 1966) p 188





แสดงการขึ้นอยู่กับพลังงาน "ที่คำนวณได้"  
 จากวิธีการขยายของโฟตอนกับ AgBr ปริมาณ

ภาพที่ 2.17

อัตราส่วนนี้สามารถคำนวณพลังงานที่  $\text{AgBr}$  ในอิมัลชันเอาออกมาจากรังสีปฐมภูมิได้ ทั้งนี้ โดยการเปรียบเทียบความแตกต่างของอากาศเทียบเท่าวัสดุส่วนของพลังงานนี้ ซึ่งถูกดูดกลืนในอิมัลชันจะขึ้นอยู่กับปริมาณการถ่ายเทพลังงานไปยังอิเล็กตรอนทุติยภูมิ และขึ้นอยู่กับช่วงทางเดินของอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ถูกผลิตขึ้นมานั้น เปรียบเทียบกับขนาดของอิมัลชัน ความหนาของอิมัลชันวัดรังสีเอกซ์นั้นสอดคล้องกับช่วงของอิเล็กตรอนพลังงาน 40 ถึง 50 keV. สำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำกว่า 200 keV. ส่วนใหญ่ของความดำที่เกิดขึ้น เนื่องจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ถูกผลิตขึ้นมาในอิมัลชัน ยังมีพลังงานสูงกว่านี้ก็จะยังมีอิเล็กตรอนทุติยภูมิมาช่วยสนับสนุนมากขึ้น ดังนั้น รูปร่างของเส้นโค้งของการขึ้นอยู่กับพลังงาน (Energy dependence curve) จึงขึ้นอยู่กับความหนาของอิมัลชัน ปริมาณของ  $\text{AgBr}$  ความวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของ  $\text{AgBr}$  และอากาศ การเปล่งรังสีเอกซ์ขึ้นใหม่อีกครั้งจากเงินและโบรมายด์ และขึ้นอยู่กับวัสดุที่ล้อมรอบฟิล์ม

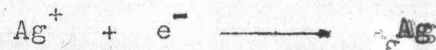
ในการจัดการเกี่ยวกับปัญหา การขึ้นอยู่กับพลังงานนี้มี 3 วิธี คือ วิธีแรก จะต้องตรวจปรับฟิล์มนั้นโดยตรงต่อต้นกำเนิดรังสีที่บุคคลนำมาใช้ วิธีที่ 2 จะต้องคำนวณพลังงานของโฟตอนโดยใช้แผ่นกรอง (filter) จำนวนมากกว่า 2 แผ่นบนฟิล์มแผ่นกรองนั้นต้องมีความหนาหรือเลขอะตอม (atomic number) ต่างกัน ซึ่งจะเป็นผลให้ไคค่าความหนาแน่นที่แสง ภายใต้ความถี่ที่ต่างกันแต่จะมีค่าต่างกัน และจากอัตราปริมาณรังสี ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นที่ต่างกันบนฟิล์มนั้น สามารถหาพลังงานของโฟตอน และปริมาณรังสีได้ วิธีการนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในห้องทดลองทั่ว ๆ ไป วิธีที่ 3 ต้องใช้วิธีการบางอย่างเพื่อลดค่า การขึ้นอยู่กับพลังงานของฟิล์ม เช่น มีการออกแบบใช้แผ่นกรองเพียงอันเดียวที่ประกอบด้วยหลายๆ ธาตุ เพื่อลดค่า การขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของฟิล์มให้เหลืออยู่ภายในขีดจำกัดที่ยอมรับได้เป็นตัว



## 2.4 การล้างฟิล์มและการวัดความหนาแน่นที่บดแสง

### 2.4.1 การล้างฟิล์ม 1,2,3

เป็นกระบวนการเปลี่ยนภาพที่มองไม่เห็น (ภาพแฝง) เป็นภาพที่มองเห็นได้ ปฏิกริยาสำคัญที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการล้างฟิล์ม คือ รีดักชัน (Reduction) ซึ่งเป็นการเพิ่มอิเล็กตรอนให้กับเงินไอออน กลายเป็นอะตอมของโลหะเงิน ดังสมการ



ปฏิกริยารีดักชันจะเกิดกับเกรนทั้งส่วนที่ถูก และไม่ถูกรังสี (หรือแสง) แต่พบว่า เกรนที่ถูกรังสี (หรือแสง) มีความไวต่อรีดักชันมากกว่า และอัตราการรีดักชันต่อเกรนที่ถูกรังสี (หรือแสง) ก็มีค่าสูงกว่ามาก ดังนั้น ระหว่างการล้างฟิล์มตามปกติ รีดักชันส่วนใหญ่จึงเกิดขึ้นกับเกรนที่ถูกแสงเท่านั้น

น้ำยาล้างฟิล์มจึงประกอบด้วยตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ซึ่งมีทั้งที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น hydroquinone, p-methylaminophenol, catechol ฯลฯ และสารอนินทรีย์ เช่น ferrous oxalate เป็นต้น

แม้ว่าน้ำยาล้างฟิล์มจะมีหลายแบบ แต่ชนิดของการล้างฟิล์มโดยสรุปแล้ว แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ การล้างฟิล์มแบบฟิสิกส์ (physical development) และการล้างฟิล์มแบบเคมี (Chemical development)

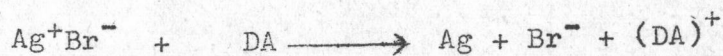
- 1 C.B. Neblette. Photography, its materials and processes (6<sup>th</sup> Ed. New delhi: Affiliated East-West Press Pvt. Ltd 1968) pp 221-230
- 2 C.E. Kennette Mees and T.H. James. The Theory of the photographic processes (3<sup>rd</sup> Ed. New York: Macmillan Co. 1966) pp. 324-346, 397-407.
- 3 V.F. Kozlov. Photographic Dosimetry of Ionizing Radiation (Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations 1966) pp. 9-14

2.4.1.1 การล้างฟิล์มแบบฟิสิกส์ เป็นกระบวนการทำให้เกิดภาพ โดยวิธีการสะสมอะตอมของโลหะเงินลงในตำแหน่งของศูนย์กลางภาพแฟ้ม ทั้งนี้ โดยการเติมเงินไอออนลงไปใต้น้ำยาล้างฟิล์ม พร้อมกับเติมตัวทำละลายเงินเฮไลด์ (Silver halide solvent) ลงไปด้วย ซึ่งตัวทำละลายเงินเฮไลด์นี้เองจะไปละลายเงินไอออนออกมาจากอิมัลชันส่วนที่ไม่ถูกรังสี (หรือแสง) และเงินไอออนจะถูกรีดิวซ์เป็นอะตอมของเงิน ซึ่งไปสะสมอยู่ในตำแหน่งที่เป็นภาพแฟ้ม กลายเป็นภาพที่เห็นได้ การล้างฟิล์มแบบนี้ส่วนใหญ่ จะใช้เฉพาะงานด้านการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการถ่ายภาพ

2.4.1.2 การล้างฟิล์มแบบเคมี เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดภาพ โดยอาศัยรีดักชันโดยตรง กล่าวคือ เกรนของเงินเฮไลด์ ซึ่งมีภาพแฟ้มอยู่ภายใน จะถูกรีดิวซ์โดยน้ำยาล้างฟิล์ม กลายเป็นภาพที่เห็นได้ อันประกอบด้วยอะตอมของเงิน กระบวนการล้างฟิล์มแบบนี้ สะดวกต่อการปฏิบัติ และเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านการวัดปริมาณรังสีด้วยฟิล์ม และศิลปการถ่ายภาพเพื่อการถ่ายภาพ

การล้างฟิล์มแบบเคมีสามารถแบ่งได้หลายขั้นตอน ดังนี้

ก. การสร้างภาพ เมื่อเอาฟิล์มที่ถูกรังสี (หรือแสง) แช่ใต้น้ำยาล้างฟิล์ม (ซึ่งโดยทั่วไปมีสภาพเป็นด่าง) เกรนของเงินโบรไมด์จำนวนมากซึ่งอยู่รอบภาพแฟ้มจะถูกรีดิวซ์ กล่าวคือ ตัวรีดิวซ์ใต้น้ำยาล้างฟิล์ม จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนให้กับเงินไอออนของเงินโบรไมด์ ได้เป็นอะตอมของเงิน, โบรไมด์ และบางส่วนของน้ำยาที่ถูกออกซิไดซ์ (Oxidized developing agent) ตามสมการ

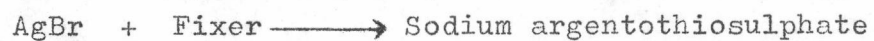


โดย DA คือ Developing agent และ  $(\text{DA})^+$  คือ (Oxidized developing agent) อะตอมของเงินที่เกิดขึ้น จะเกาะแน่นอยู่กับเงินของภาพแฟ้มภาพแฟ้ม ทำให้ขนาดของภาพใหญ่มากขึ้น จนสามารถเห็นเป็นลักษณะดำ



ข. การหยุดสร้างภาพ เมื่อสร้างภาพได้ตามกำหนดแล้ว ก็นำไปแช่ในน้ำยาหยุดสร้างภาพ ซึ่งตามปกติจะมีสภาพเป็นกรด เช่น กรดน้ำส้ม (acetic acid) 2-3 % เป็นต้น น้ำยานี้จะหยุดปฏิกิริยาสร้างภาพไว้ และละลายเอาโบรไมด์ และน้ำยาที่ถูกออกซิไดซ์ ซึ่งติดมากับแผ่นฟิล์มออก ฉะนั้น ในขณะที่บริเวณส่วนที่ถูกแสงก็จะเหลือแต่กลุ่มอะตอมของเงินเท่านั้น

ค. การทำให้คงสภาพ เนื่องจากในอิมัลชันยังคงมีเกรนเงินโบรไมด์ส่วนที่ไม่ถูกรังสี (หรือแสง) อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นส่วนที่จำเป็นต่อการกำจัดออก เพื่อให้เหลือแต่ภาพอันประกอบด้วยกลุ่มอะตอมของเงินอย่างเดียวเท่านั้น การกำจัดสามารถทำได้ โดยนำฟิล์มที่ผ่านการปฏิบัติตาม ข้อ ก. และ ข. มาแล้วนั้น แชลงในน้ำยาคงสภาพ (fixer) น้ำยานี้ซึ่งตามปกติใช้ Hyposulphite หรือ Sodium thiosulphate ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) จะทำปฏิกิริยากับเกรนของเงินเฮไลด์ส่วนที่เหลืออยู่ (คือส่วนที่ไม่ถูกรังสีหรือแสง) ให้กลายเป็น Sodium argentothiosulphate



เวลาของการทำให้คงสภาพขึ้นอยู่กับ ความหนาของอิมัลชัน, อุณหภูมิของน้ำยา และ ความเข้มข้นของ Hyposulphite ในน้ำยาคงสภาพ อนึ่ง Sodium argentothiosulphate ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของน้ำยาคงสภาพนั้น เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex Compound) ที่ละลายน้ำได้ ดังนั้น ภายหลังจาก การทำให้คงสภาพแล้ว นำฟิล์มไปล้างน้ำ และทำให้ฟิล์มแห้ง ก็จะได้ฟิล์มเนกาทีฟที่สมบูรณ์

อย่างไรก็ตาม การได้ภาพของฟิล์มเนกาทีฟที่สมบูรณ์ ขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์หลายอย่างเช่น คุณภาพของน้ำยา, อุณหภูมิ, ระยะเวลาที่ใช้ ในการปฏิบัติแต่ละขั้นตอน และการเขย่าเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยา เป็นต้น นอกจากนี้ นี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของฟิล์ม และน้ำยาที่ใช้ในการปฏิบัติด้วย

### 2.4.2 การวัดความหนาแน่นที่บ่งแสง<sup>1,2</sup>

ภาพที่ได้จากฟิล์มเนกาตีฟจะมีลักษณะดำ ทั้งนี้ เพราะประกอบด้วยกลุ่มอะตอมของโลหะเงิน ความดำหรือกลุ่มอะตอมของโลหะเงิน จะมีค่าแปรตามปริมาณรังสี (หรือแสง) ที่ได้ถูกคลื่นไว้ การหาปริมาณของเงินอาจหาได้โดยตรง เช่น วิเคราะห์ทางเคมี นิวตรอนแอคทีเวชัน (Neutron activation) หรือ เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence) และยังมีอีกวิธีหนึ่งที่ละเม็ดได้ด้วยการทดลองจุดที่ค้น เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติ เราใช้วิธีการง่าย ๆ โดยวัดปริมาณเงินในรูปของความหนาแน่น กล่าวคือ ให้ลำแสงส่องลงที่กลุ่มอะตอมของเงิน จากความสัมพันธ์ของปริมาณแสงที่ตกกระทบและปริมาณแสงที่ทะลุผ่าน สามารถวัดปริมาณของเงินได้ทางอ้อมในรูปของ "ความหนาแน่นที่บ่งแสง" (Optical density หรือเรียกโดยย่อว่า O.D.) ซึ่ง F. Hurter และ v. Driffield (1890) ได้นิยามไว้ว่า "ความหนาแน่นที่บ่งแสง เป็นค่าลอการิทึม (Logarithm) ของอัตราส่วนของปริมาณแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง (ภาพบนฟิล์มเนกาตีฟ) ต่อปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง"

$$\begin{aligned} \text{O.D.} &= \log_{10} \frac{\text{ปริมาณแสงที่ตกกระทบตัวอย่าง (ergs/sec)}}{\text{ปริมาณแสงที่ทะลุผ่านตัวอย่าง (ergs/sec)}} \\ &= \log_{10} \frac{P_0}{P_T} \end{aligned}$$

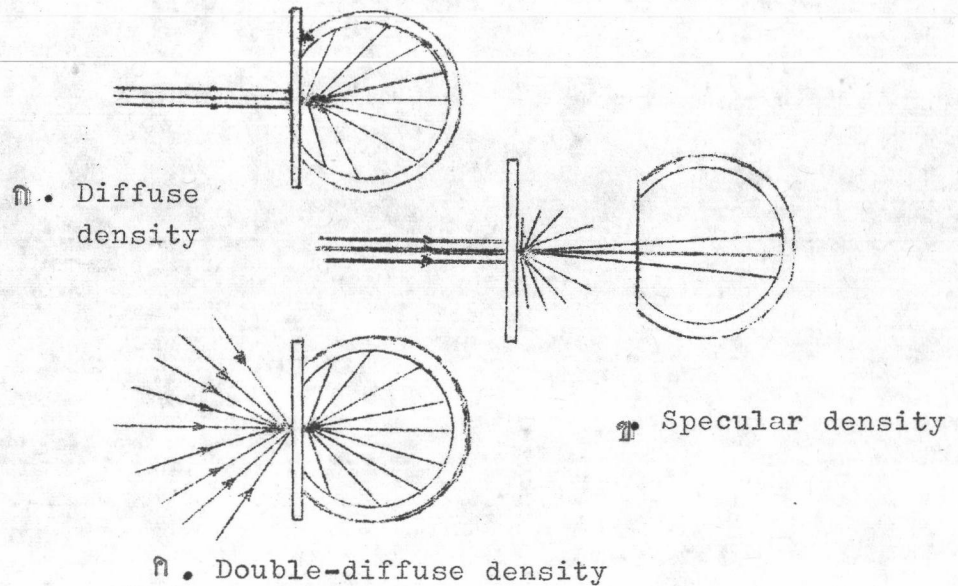
เมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มเนกาตีฟ แสงบางส่วนอาจถูกดูดกลืนไว้ หรือสะท้อนกลับออกไป หรือสะท้อนหลายหน (Scattering) ในชั้นของแผ่นฟิล์ม และบางส่วนก็สามารถทะลุผ่านไปได้อีก ดังนั้น ค่าความหนาแน่นที่บ่งแสงของภาพเงินจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยลักษณะการวัดปริมาณแสงเพื่อหาค่า  $P_0$  และ  $P_T$

1 R.H. Herz. The photographic action of ionizing radiations (New York: John Wiley and Sons. 1969) pp 88-94

2 Klaus Becker. Solid State Dosimeter (Ohio: CRC Press 1973) pp 239-241



เครื่องวัดความหนาแน่นที่เรียก "เดนซิตอมิเตอร์(Densitometer)"  
 นั้น สามารถวัดความหนาแน่นที่แสงได้หลายวิธี ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับการจัดลักษณะการวัด  
 ปริมาณแสง ซึ่งมี 3 วิธี คือ Diffuse density, Specular density และ  
 Double-diffuse density ซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 2-18



ภาพที่ 2-18 แสดงการจัดลักษณะการวัดความหนาแน่นที่แสง

เครื่องวัดความหนาแน่นโดยทั่วไปนิยมการจัดลักษณะการวัดแบบ ข. และ ค. ทั้งนี้  
 เพราะได้ผลที่สมบูรณ์กว่า