

บทที่ 5

การวิเคราะห์ข้อมูล



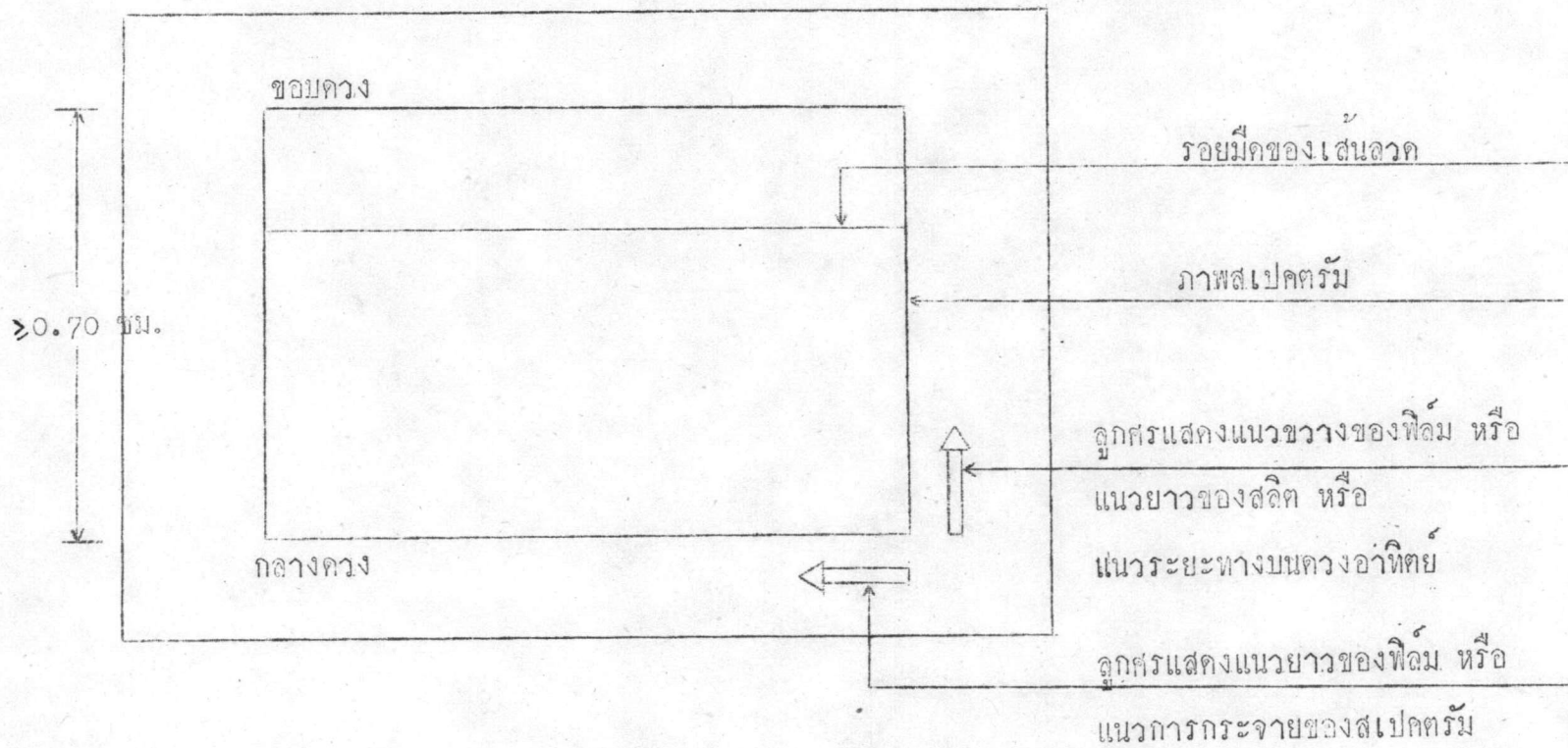
หลังจากทำสิ่ง เกิดการณ์และถ่ายภาพเก็บข้อมูลเสร็จแล้ว จะต้องรวบรวมฟิล์มข้อมูลที่ผ่านมาขบวนการล้างฟิล์มมาทำการวิเคราะห์ และหาความหมายเพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่ได้สังเกตไปแล้วนั้น ขั้นตอนการวิเคราะห์และหาความหมายของข้อมูลมีลำดับขั้นดังนี้

1. การคัดเลือกฟิล์มข้อมูล

การสังเกตการณ์ที่ขอบดวงต้องการทราบอัตราส่วนของความเข้มจำเพาะที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของความเข้มจำเพาะที่ตำแหน่งกลางดวงของดวงอาทิตย์ ดังนั้นภาพสเปกตรัมที่จะนำมาวิเคราะห์จึงต้องมีบริเวณตั้งแต่ขอบดวงเข้าไปถึงกลางดวงหรือเลยกลางดวงไปอีกเพื่อลดความผิดพลาดของตำแหน่งที่วัดจากกลางดวง เนื่องจากรัศมีของภาพดวงอาทิตย์ที่ปรากฏบนฟิล์มซึ่งหาจากการคำนวณในหัวข้อ 3.2 บทที่ 4 มีค่า 0.70 เซนติเมตร ดังนั้นภาพสเปกตรัมตามแนวขวางของฟิล์มจึงต้องมีขนาดโตกว่า 0.70 เซนติเมตร และรอยมีคของเส้นลวดในภาพสเปกตรัมชัดเจนนี คังภาพที่ 5.1

2. การวัดความเทาของฟิล์มด้วยเครื่องไมโครเคนซีโทมิเตอร์

นำฟิล์มที่ผ่านการคัดเลือกซึ่งประกอบด้วยภาพสเปกตรัมข้อมูลกับภาพสเปกตรัมข้อมูลพร้อมแผ่นบันไดทอนแสง มาวัดความเทาด้วยเครื่องไมโครเคนซีโทมิเตอร์ตามแนวยาวของสลิตในภาพที่ 5.1 และวัดเฉพาะในแถบสเปกตรัมที่เลือกไว้ 7 ความยาวคลื่นด้วยกันได้แก่ 4200, 4400, 4600, 4800, 5000, 5200 และ 5500 อังสตรอมโดยใช้



ภาพที่ 5.1 แสดงลักษณะของฟิล์มข้อมูลที่ดี

ตำแหน่งของเส้นแควล์เซียม เอช (Ca II H-line) ซึ่งมีความยาวคลื่น 3968 อังสตรอม เป็นหลักวัดไปหาตำแหน่งความยาวคลื่นดังกล่าว

2.1 วิธีการวัดความเทาของฟิล์มข้อมูล ในการวิเคราะห์ข้อมูล นอกจากความเทาที่วัดได้แล้วจะต้องคำนึงถึงขีดเริ่มแยก หรือรายละเอียดของข้อมูลทางคานาระยะทางบนดวงอาทิตย์ และตำแหน่งความยาวคลื่นของแถบสเปกตรัมบนฟิล์ม ดังนั้นก่อนทำการวัดจึงต้องกำหนดขนาดของสลิตของเครื่องไมโครเคนซีโทมิเตอร์และหาตำแหน่งของแถบสเปกตรัมเสียก่อน

2.1.1 การกำหนดขนาดของสลิตของเครื่องไมโครเคนซีโทมิเตอร์ ขนาดของสลิตมี 2 คาน คือคานกว้างและคานยาว คานกว้างหรือคานวัดระยะทางบนดวงอาทิตย์ซึ่งต้องการรายละเอียดของข้อมูลมากที่สุด จึงกำหนดให้แคบที่สุดเท่าที่เนื้อฟิล์มหรือความหยาบของฟิล์มจะอำนวยให้ ซึ่งโดยปกติแล้วเกรน (grain) ของฟิล์มจำนวนหนึ่งจะมีขนาดใหญ่กว่าขีดเริ่มแยกของฟิล์ม ดังนั้นถ้าใช้สลิตที่มีขนาดเล็กไปเส้นกราฟที่ได้จะมีรอยขยักอันเนื่องจากเกรนของฟิล์มตลอดเส้น ซึ่งไม่สะดวกต่อการวัดค่าความเทา เพราะจะต้องหาค่าเฉลี่ยของเส้นกราฟก่อน ถ้าขนาดของสลิตพอดีก็จะได้เส้นกราฟที่ค่อนข้างเรียบซึ่งความสูงค่าของเส้นกราฟจะเป็นข้อมูลที่ต้องการ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงขีดเริ่มแยกของอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลด้วย ในงานนี้ขีดเริ่มแยกของอุปกรณ์กว้างกว่าขีดเริ่มแยกของฟิล์ม กล่าวคือขีดเริ่มแยกของอุปกรณ์ตามแนวระยะทางบนดวงอาทิตย์ประมาณ 60 ไมครอนบนฟิล์ม ส่วนเนื้อฟิล์มมีขีดเริ่มแยก 7.1 ไมครอน จึงกำหนดความกว้างของสลิตไว้ประมาณ 20 ไมครอน ส่วนคานยาวของสลิตตรงกับคานการกระจายของสเปกตรัม ไม่ต้องการรายละเอียดมากนัก จึงกำหนดให้มีขนาดใหญ่เพื่อให้พื้นที่ของสลิตใหญ่พอที่จะครอบคลุมพื้นที่ของฟิล์มจำนวนมากพอที่จะลดขนาดของการรบกวนเนื่องจากความหยาบของฟิล์ม (grain noise) ลงได้ในระดับที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ข้อมูลขีดเริ่มแยกของอุปกรณ์ที่เก็บข้อมูลในแนวการกระจายซึ่งทดสอบตามหัวข้อ 3.7 บทที่ 4 ได้เท่ากับ 84 ไมครอนบนฟิล์ม จึงกำหนดความยาวของสลิตไว้ประมาณ 200 ไมครอน

เหตุที่ไม่สามารถกำหนดขนาดที่แน่นอนของสลิตก็เพราะขนาดที่กล่าวมาเป็นขนาดยังผล ไม่ใช่ขนาดของสลิตจริงในเครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์ การกำหนดขนาดจริงของสลิตให้โดยผลเป็นขนาดเท่ากับขนาดยังผลจะต้องทราบกำลังขยายรวมของทัศนอุปกรณ์ในเครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์ เมื่อใช้เลนส์หน้าขนาดขยาย 20 เท่า จะหาขนาดขยายรวมของทัศนอุปกรณ์ได้ 43 เท่า จึงกำหนดขนาดจริงของสลิตเป็น 1.0×8.6 มิลลิเมตร ซึ่งจะเท่ากับขนาดยังผลของสลิต 23×200 ไมครอน เป็นค่าใกล้เคียงกับที่กำหนดให้ตอนแรก

2.1.2 การหาตำแหน่งของแถบสเปกตรัม ตามที่กำหนดไว้ในตอนต้นของหัวข้อ 2 ในบทนี้ จะหาเส้นการมีกที่ขอบวงที่ความยาวคลื่น 7 ค่า โดยใช้เส้นแคดเซียม เอช ความยาวคลื่น 3968 อังสตรอมเป็นหลัก และใช้ค่าการกระจายเชิงเส้นที่วัดได้ดังกล่าวในหัวข้อ 3.5 ในบทที่ 4 มาคำนวณหาตำแหน่งความยาวคลื่นที่จุดอื่น ๆ ดังนี้

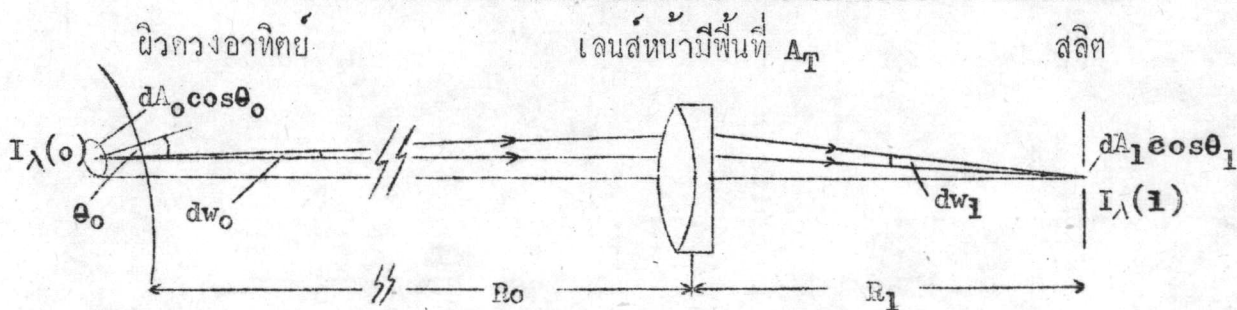
ค่าการกระจายเชิงเส้นเฉลี่ยเท่ากับ 74.3 อังสตรอมต่อมิลลิเมตรบนฟิล์มและวงที่ตลอดทั้งช่วงสเปกตรัม เมื่อเริ่มต้นจากเส้นแคดเซียม เอช 3968 อังสตรอม วัดไปที่ตำแหน่งความยาวคลื่น 4200 อังสตรอม จะเป็นระยะทางที่ต่างกันบนฟิล์ม เท่ากับ $(4200-3968)/74.3$ มิลลิเมตร หรือเท่ากับ 3122 ไมครอน ปรับเดือนระยะนี้ได้ด้วยปุ่มปรับละเอียดบนแท่นตัวอย่างของเครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์ การหาตำแหน่งของแถบสเปกตรัมอื่น ๆ ก็ทำเช่นเดียวกัน

เมื่อกำหนดค่าในหัวข้อ 2.1.1 และ 2.1.2 นี้แล้ว จึงวัดความเทาโดยใช้ลิ้มแสงที่มีค่าการเปลี่ยนความเทา 0.083 ต่อเซนติเมตร และแขนอัตราส่วนสำหรับกระดานกราฟใช้ขนาด 10 และ 20 เท่า ทำการวัดความเทาของข้อมูลและสเปกตรัมพร้อมแผ่นมันโคทอนแสง อีกทั้งวัดความเทาของแผ่นมันโคทอนแสงโดยตรง เพื่อให้หาเส้นลักษณะของฟิล์มที่ใช้เก็บข้อมูลสำหรับการวัดแผ่นมันโคทอนแสงโดยใช้ลิ้มแสงที่มีค่าการเปลี่ยนความเทา 0.135 ต่อเซนติเมตร

3. การหาเส้นลักษณะของฟิล์มขอลู (Characteristic curve)

ฟิล์มมีส่วนประกอบ 2 ส่วน ได้แก่ อิมัลชัน และแผ่นรองรับอิมัลชัน ส่วนสำคัญที่สุดของฟิล์มก็คือ อิมัลชันซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติของฟิล์ม ดังนั้นเมื่อพูดถึงคุณสมบัติของฟิล์มหรือของอิมัลชันก็คือ เสนกราฟแสดงคุณสมบัติในการบันทึกแสงของอิมัลชัน การกล่าวถึงเส้นลักษณะนี้จะต้องเข้าใจความสัมพันธ์และศัพท์เฉพาะบางคำดังต่อไปนี้

3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มจำเพาะที่ผิววงอาทิตย์กับที่ระนาบฟิล์ม



ภาพที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มจำเพาะที่ผิววงอาทิตย์กับที่ระนาบของสลิต

กำหนดให้ $dE_\lambda(0)$ เป็นปริมาณของพลังงานจากพื้นที่ dA_0 บนผิววงอาทิตย์ซึ่งเส้นฉากทำมุมกับแนวรังเกิดเป็นมุม θ_0 ภายในมุมตัน $d\omega_0$ ซึ่งรองรับด้วยพื้นที่ย่อย ๆ ส่วนหนึ่งของเลนส์หน้าของกล้องโทรทรรศน์เป็น dA_T ซึ่งเส้นฉากทำมุมกับแนวรังเกิดเป็นมุม θ_T ระยะจากผิววงอาทิตย์ถึงเลนส์หน้าเป็น R_0 และพลังงาน $dE_\lambda(0)$ นี้ถูกปล่อยออกมาภายในช่วงความยาวคลื่น λ ถึง $\lambda + d\lambda$ ภายในเวลา dt ดังนั้นจะได้ความเข้มจำเพาะที่ผิววงอาทิตย์ $I_\lambda(0)$ สัมพันธ์กับ $dE_\lambda(0)$ ตามสมการ

$$dE_\lambda(0) = I_\lambda(0) dA_0 \cos \theta_0 d\omega_0 d\lambda dt \quad (5.1)$$

$$= I_\lambda(0) dA_0 \cos \theta_0 \frac{dA_T \cos \theta_T d\lambda dt}{R_0^2} \quad (5.2)$$

ในทำนองเดียวกัน ถ้า $dE_{\lambda}(1)$ เป็นปริมาณพลังงานที่ตกลงบนพื้นที่เล็ก ๆ dA_1 ของสลิต ซึ่งเส้นฉากทำมุม θ_1 กับเส้นแกนमुखสำคัญของเลนส์หน้าของกล้องโทรทรรศน์ ภายในมุมตัน $d\omega_1$ ซึ่งรองรับควยพื้นที่ย่อย dA_T ของเลนส์หน้าซึ่งเส้นฉากทำมุมกับแนวสลิต-เลนส์หน้าเป็น θ_T ระยะจากเลนส์หน้าถึงสลิตเป็น R_1 พลังงานที่ตกสู่สลิตจะอยู่ในเวลา dt และในช่วงคลื่น λ ถึง $\lambda+d\lambda$ จึงได้ความเข้มจำเพาะของภาพคววอาทิตย์ที่ตำแหน่งของสลิต $I_{\lambda}(1)$ สัมพันธ์กับ $dE_{\lambda}(1)$ ตามสมการ

$$dE_{\lambda}(1) = I_{\lambda}(1) dA_1 \cos \theta_1 \frac{dA_T \cos \theta_T d\lambda dt}{R_1^2} \quad (5.3)$$

ปริมาณของพลังงานจากผิวคววอาทิตย์ที่ตกลงมาถึงสลิตจะมีการสูญเสียไปบ้าง ด้วยการดูดกลืนและสะท้อนของบรรยากาศและเลนส์หน้า กำหนดให้ลดลงไปด้วยอัตราส่วน $\beta_{\lambda}(1)$ ดังนี้

$$dE_{\lambda}(1) = \beta_{\lambda}(1) dE_{\lambda}(0) \quad (5.4)$$

จากสมการ (5.2), (5.3), และ (5.4) จะได้ว่า

$$I_{\lambda}(1) dA_1 \cos \theta_1 \frac{dA_T \cos \theta_T d\lambda dt}{R_1^2} = \beta_{\lambda}(1) I_{\lambda}(0) dA_0 \cos \theta_0 \frac{dA_T \cos \theta_T d\lambda dt}{R_0^2} \quad (5.5)$$

เนื่องจาก $dA_1 \cos \theta_1$ เป็นพื้นที่ของภาพที่เกิดจากวัตถุที่มีพื้นที่เป็น $dA_0 \cos \theta_0$ และ R_1 เป็นระยะภาพ R_0 เป็นระยะวัตถุจากเลนส์หน้า จากความสัมพันธ์ของกำลังขยายของเลนส์จะได้อ

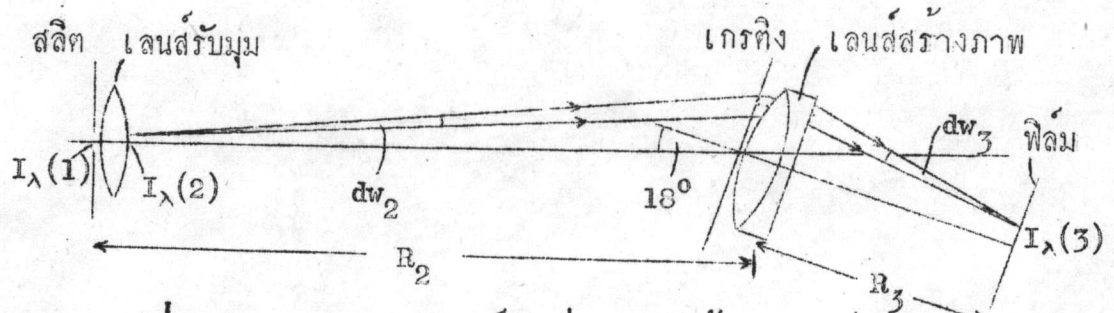
$$\begin{aligned} (\text{กำลังขยาย})^2 &= \frac{\text{พื้นที่ของภาพ}}{\text{พื้นที่ของวัตถุ}} = \frac{(\text{ระยะภาพ})^2}{(\text{ระยะวัตถุ})^2} \quad (5.6) \\ &= \frac{dA_1 \cos \theta_1}{dA_0 \cos \theta_0} = \frac{R_1^2}{R_0^2} \\ &= \frac{dA_1 \cos \theta_1}{R_1^2} = \frac{dA_0 \cos \theta_0}{R_0^2} \end{aligned}$$

สำหรับมุม θ_T ซึ่งเกิดจากเส้นฉากของเลนส์หน้าเอียงทำมุมกับแนวตั้ง เกิดโดยถือว่าแนวตั้งเกิดกับแกนमुखสำคัญของเลนส์หน้าเป็นแนวเดียวกัน ดังนั้น θ_T จะมีค่าน้อยมากเพราะ R_0 มีค่ามาก ๆ เมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์หน้า และเนื่องจากขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์หน้าเทียบกับความยาวโฟกัสเป็น $1/60$ ดังนั้นมุม θ_T จะมีค่าประมาณ 1 องศา จึงได้ว่า $\cos \theta_T$ และ $\cos \theta'_T$ มีค่าเป็น 1 ($\cos 1^\circ = 0.9998$) และเมื่อตัดพจน์ที่ซ้ำกันในสมการ (5.5) ออกจะได้

$$I_\lambda(1) = \beta_\lambda(1) I_\lambda(0) \tag{5.7}$$

ถ้าให้ $\beta_\lambda(2)$ เป็นตัวประกอบเนื่องจากการสะท้อนและดูดกลืนของเลนส์รับมุม และถือว่าเลนส์รับมุมไม่มีผลต่อกำลังขยายภาพ $I_\lambda(2)$ เป็นความเข้มจำเพาะที่ผิวหน้าของเลนส์รับมุมด้านที่หันเข้าหาเกรตติ้งจะมีความสัมพันธ์กับความเข้มจำเพาะที่สลิตเป็น

$$I_\lambda(2) = \beta_\lambda(2) I_\lambda(1) \tag{5.8}$$



ภาพที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มจำเพาะที่ระนาบสลิตกับที่ระนาบฟิล์ม

ถ้าวงเกรตติ้งให้หน้าเกรตติ้งตั้งฉากกับแนวคอรระหว่างจุดกึ่งกลางสลิตกับจุดกึ่งกลางของเกรตติ้ง บริเวณที่แสงตกลงบนหน้าเกรตติ้งจะมีพื้นที่เท่ากับขนาดภาพของเลนส์หน้าที่เกิดจากการสร้างภาพของเลนส์รับมุม (มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.2 เซนติเมตร) แต่ในการ

ถ่ายภาพเก็บข้อมูลได้วางเกรตติ้งเอียงกับแนวตั้งกลางเป็นมุม 18 องศา ถ้าพื้นที่ dA_T ของเลนส์หน้าปรากฏเป็นภาพบนหน้าเกรตติ้งมีขนาด dA_g แล้ว จะได้มุมตัน $d\omega_2 = dA_g \cos \alpha / R_2^2$ (ดูภาพ 5.3) พื้นที่ dA_2 เป็นพื้นที่เล็ก ๆ บนผิวเลนส์รับมุมที่ปล่อยพลังงาน $dE_\lambda(2)$ ออกมา โดยพื้นที่ dA_2 จะเอียงทำมุม θ_2 กับแนวตั้งกึ่งกลางของสลิตและเกรตติ้ง อย่างไรก็ตามเนื่องจากวางเลนส์รับมุมอยู่ติดกับสลิตจึงอาจถือว่า พื้นที่ $dA_2 = dA_1$ จึงได้ปริมาณพลังงานที่ตกลงบนเกรตติ้งจากพื้นที่เล็ก ๆ dA_1 บนสลิตเป็น

$$dE_\lambda(2) = I_\lambda(2) dA_1 \cos \theta_2 \frac{dA_g \cos \alpha}{R_2^2} d\lambda dt \quad (5.9)$$

สำหรับแสงในช่วงความยาวคลื่นแคบ ๆ อาจถือว่าเกรตติ้งทำหน้าที่หักเหทิศทางแสงเพียงอย่างเดียว คล้ายกับกระจกราบแล้วแสงจึงผ่านเลนส์สร้างภาพไปสู่อุปกรณ์ กำหนดให้ตัวประกอบที่ลดทอนพลังงานของแสงซึ่งเนื่องมาจากการสะท้อนและดูดกลืนของเกรตติ้งและเลนส์สร้างภาพรวมกันเป็น $\beta_\lambda(3)$ ถ้าไม่มีการสูญเสียพลังงานเนื่องจากเหตุอื่นอีก ปริมาณพลังงานที่ตกลงบนฟิล์ม $dE_\lambda(3)$ จะมีความสัมพันธ์กับพลังงานที่ตกลงบนเกรตติ้งเป็น

$$dE_\lambda(3) = \beta_\lambda(3) dE_\lambda(2) \quad (5.10)$$

ถ้าให้ R_3 เป็นระยะยังผลจากเลนส์สร้างภาพถึงระนาบฟิล์ม และ ϕ เป็นมุมที่แสงแต่ละความยาวคลื่นทำมุมกับเส้นฉากของเกรตติ้ง จะได้มุมตันของกรวยแสงที่ตกลงบนฟิล์ม $d\omega_3 = dA_g \cos \phi / R_3^2$ และให้ $I_\lambda(3)$ เป็นความเข้มจำเพาะที่ระนาบฟิล์มจะมีความสัมพันธ์กับพลังงาน $dE_\lambda(3)$ เป็น

$$dE_\lambda(3) = I_\lambda(3) \frac{dA_g \cos \theta_3 dA_g \cos \phi}{R_3^2} d\lambda dt \quad (5.11)$$

โดยที่ dA_3 เป็นพื้นที่เล็ก ๆ บนฟิล์มที่รับพลังงาน $dE_\lambda(z)$ และ θ_3 เป็นมุมที่รังสีทำมุมกับเส้นฉากของฟิล์ม เนื่องจากเกรตติงมีความคลาดอยู่บ้าง ขนาดของภาพจะไม่แปรผันโดยตรงกับขนาดของวัตถุเสมอไป จึงกำหนดให้ตัวแก้ (correction factor) เนื่องจากความคลาดของเกรตติงเป็น $k(A_1)$ โดยที่พื้นที่ dA_1 จะถูกจำกัดด้วยความกว้างของสลิตและกำลังแยกทางคานระยะทางบนดวงอาทิตย์ของสเปกโตรกราฟ ดังนั้นจึงอาจแปลงสมการ (5.6) ให้เหมาะสมเป็น

$$\frac{dA_1 \cos \theta_2}{R_2^2} = k(dA_1) \frac{dA_3 \cos \theta_3}{R_3^2} \quad (5.12)$$

แต่ในทางปฏิบัติขนาดของสลิตและกำลังแยกถูกกำหนดโดยการจัดอุปกรณ์ที่คงที่ตลอดการทดลอง ดังนั้น $k(dA_1)$ จึงถือได้ว่าเป็นค่าคงที่ และจากสมการ (5.9), (5.10), (5.11) และ (5.12) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $I_\lambda(2)$ กับ $I_\lambda(3)$ ดังนี้

$$I_\lambda(3) = k(dA_1) \beta_\lambda(3) \frac{\cos \alpha}{\cos \phi} I_\lambda(2) \quad (5.13)$$

และจากสมการ (5.7) กับ (5.8) แทนค่า $I_\lambda(0)$ ลงในสมการ (5.13) จะได้ความสัมพันธ์ของ $I_\lambda(3)$ กับ $I_\lambda(0)$ เป็น

$$I_\lambda(3) = k(dA_1) \beta_\lambda(1) \beta_\lambda(2) \beta_\lambda(3) \frac{\cos \alpha}{\cos \phi} I_\lambda(0) \quad (5.14)$$

ถ้าให้ $\beta_\lambda = k(dA_1) \beta_\lambda(1) \beta_\lambda(2) \beta_\lambda(3) =$ คงที่
 $I_\lambda(0, \mu)$ เป็นความเข้มจำเพาะที่ผิวดวงอาทิตย์ที่ตำแหน่ง μ
 $I_\lambda(\mu)$ เป็นความเข้มจำเพาะที่ระนาบฟิล์มซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่ง μ บน
 ผิวดวงอาทิตย์

จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มจำเพาะที่ระนาบฟิล์มกับที่ผิวดวงอาทิตย์เป็น

$$I_{\lambda}(\mu) = \beta_{\lambda} \frac{\cos \alpha}{\cos \phi} I_{\lambda}(0, \mu) \quad (5.15)$$

ในขณะที่ถ่ายภาพได้จัดให้ α มีค่าประมาณ 18 องศา และค่า α ยังมีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของ μ อีกเล็กน้อย จากการคำนวณอย่างประมาณพบว่า ขณะที่ μ เปลี่ยนจาก 0 ไป 1 ค่าของ α เปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 0.3 องศา ซึ่ง $\cos \alpha$ จะเปลี่ยนแปลงไปน้อยกว่าร้อยละ 0.2 จึงอาจถือได้ว่า $\cos \alpha$ เป็นค่าคงที่ ดังนั้นสมการ (5.15) จึงเขียนได้เป็น

$$I_{\lambda}(\mu) = \beta'_{\lambda} \frac{I_{\lambda}(0, \mu)}{\cos \phi} \quad (5.16)$$

โดยที่ $\beta'_{\lambda} = \beta_{\lambda} \cos \alpha$

3.2 การให้แสง (Exposure), E_{λ} คือปริมาณของพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ซึ่งตกตั้งฉากกับผิวใด ๆ โดยทั่วไปการให้แสงจะขึ้นอยู่กับความเข้มจำเพาะของแสง ช่วงเวลาที่รับแสง องค์ประกอบของสเปกตรัม มุมตกกระทบและขนาดของช่องเปิดที่รับแสง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$E_{\lambda}(\mu) = \int_0^{\Omega} \int_{\lambda}^{\lambda + \Delta \lambda} \int_0^T I_{\lambda}(\xi) \cos \xi \, dt \, d\lambda \, d\omega \quad (5.17)$$

ในที่นี้ Ω คือมุมตันที่จุดใด ๆ บนฟิล์มซึ่งรองรับฉายพื้นที่ของช่องเปิดของเลนส์สร้างภาพ

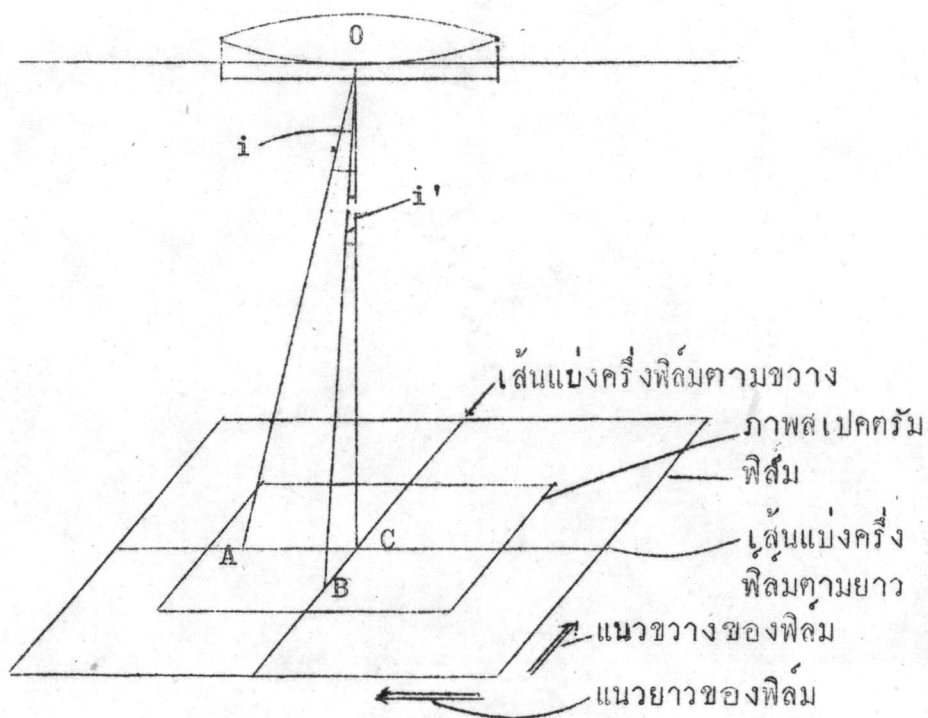
$\Delta \lambda$ คือช่วงความยาวคลื่นของแถบสเปกตรัมที่จะหาการให้แสง

T คือเวลาที่ฟิล์มรับแสงตามหัวข้อ 4.2 บทที่ 4 มีค่าเท่ากับ 1/500 วินาที

ξ คือมุมที่รังสีใด ๆ ทำกับเส้นฉากของผิวฟิล์มที่จุดนั้น

มุม ξ จะแยกออกเป็นมุม i ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น λ และมุม i' ซึ่งขึ้นอยู่กับ μ

ค่าของมุม i และ i' แสดงอยู่ในภาพที่ 5.4.



ภาพที่ 5.4 แสดงการวัดค่ามุม i และ i'

ในช่วงเวลาสั้น ๆ T อาจถือได้ว่า I_λ และปริมาณอื่น ๆ ไม่เปลี่ยนแปลง สมการ (5.17) จะอินทิเกรตกับเวลาได้เป็น

$$E_\lambda(u) = T \int_{\lambda}^{\lambda+\Delta\lambda} \int_{\Omega} I_\lambda(\xi) \cos \xi \, d\lambda d\omega \quad (5.18)$$

และถ้าพิจารณาเฉพาะที่ความยาวคลื่นค่าหนึ่ง λ_0 ภายในช่วงความยาวคลื่น $\Delta\lambda$ แคบ ๆ นี้ I_{λ_0} จะไม่เปลี่ยนแปลง จึงเขียนสมการได้เป็น

$$E_{\lambda_0}(u) = T \Delta\lambda_0 \int_{\Omega} I_{\lambda_0}(\omega) \cos \xi \, d\omega \quad (5.19)$$

เนื่องจากมุม ϕ ในสมการ (5.16) กับมุม ξ ในสมการ (5.19) คือมุมเดียวกัน เมื่อ นำค่า $I_{\lambda_0}(\mu)$ ในสมการ (5.16) มาแทนลงในสมการ (5.19) จะได้

$$E_{\lambda_0}(\mu) = \beta'_{\lambda_0} T \Delta \lambda \int_{\Omega} I_{\lambda_0}(0, \mu) d\omega \quad (5.20)$$

ถ้าคิดวาระรังสีที่ผ่านเลนส์สร้างภาพมาจุดหนึ่งบนฟิล์มมีความเข้มจำเพาะเท่ากันทุกทิศทาง (isotropic) ภายในกรวย Ω ดังนั้น I_{λ_0} ไม่ขึ้นกับมุม จึงได้

$$E_{\lambda_0}(\mu) = \beta'_{\lambda_0} T \Delta \lambda \Omega I_{\lambda_0}(0, \mu) \quad (5.21)$$

ในแถบสเปกตรัม λ_0 เกี่ยวกับการให้แสงสัมพันธ์ของจุด 2 จุดบนฟิล์มจะเป็น

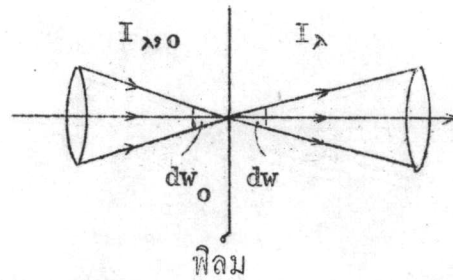
$$\frac{E_{\lambda_0}(\mu_1)}{E_{\lambda_0}(\mu_2)} = \frac{I_{\lambda_0}(0, \mu_1)}{I_{\lambda_0}(0, \mu_2)} \quad (5.22)$$

ทั้งนี้ค่า Ω ในแต่ละจุดบนฟิล์มแม้จะมีค่าต่างกัน แต่จากการคำนวณโดยประมาณ พบว่า ความแตกต่างของ Ω มีมากที่สุด ในแถบสเปกตรัมที่อยู่ตรงกลางฟิล์ม และความแตกต่างนี้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 0.2 จึงอาจถือได้ว่า Ω เป็นค่าคงที่ในแต่ละแถบสเปกตรัม

3.3 ความเทาของฟิล์ม (Film density)

3.3.1 นิยามของความเทา กล่าวว่ามีแสงที่มีความเข้มจำเพาะ $I_{\lambda,0}$ ตกกระทบตั้งฉากกับแผ่นฟิล์มที่วางแล้วในพื้นที่เล็ก ๆ อันหนึ่ง ถ้าแสงที่ผ่านฟิล์มจากพื้นที่เดียวกันนั้นออกมาภายในมุมตันเล็ก ๆ ในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศที่แสงเข้า มีความเข้มจำเพาะเป็น I_{λ} ตามภาพที่ 5.5 จะกำหนดความเทาเฉพาะ (specular density), D , ของฟิล์มที่พื้นที่นั้นเป็น

$$D = \log_{10} \left(\frac{I_{\lambda,0}}{I_{\lambda}} \right) \quad (5.23)$$



ภาพที่ 5.5 แสดงการวัดความเหาเฉพาะของฟิล์ม

ในงานวิจัยนี้วัดความเหาด้วยเครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์ ซึ่งวัดแสงเฉพาะในกรวยขนาดหนึ่ง มีไดว์คแสงที่ผ่านฟิล์มตรงพื้นที่นั้นทั้งหมด ขนาดของกรวยแสงนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของเปิดและระยะห่างจากฟิล์มของเลนส์หน้าของเครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์แต่ละเครื่อง ดังนั้นค่าความเหาที่วัดจากเครื่องชนิดจึงแตกต่างกัน ค่าความเหาที่วัดได้จึงเป็นค่าความเหาเฉพาะในที่นี้ เมื่อกล่าวถึงความเหาจึงหมายถึงความเหาเฉพาะเสมอ

3.3.2 การวัดความเหาด้วยเครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์ ถ้ากำหนดให้ Q เป็นสิ่งที่เครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์รับรู้จะได้ความสัมพันธ์ว่า

$$Q \propto \int_{\Omega} \int_0^{\infty} I_{\lambda} R_{\lambda} d\lambda dw \quad (5.24)$$

โดยที่ R_{λ} เป็นการสนองตอบต่อสเปกตรัม (spectral response) ของเครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์ ซึ่งอาจจะรวมตัวประกอบของการส่งผ่าน (transmission factor) อยู่ด้วย

และ Ω เป็นมุมตันของกรวยแสงซึ่งปลายกรวยอยู่ที่ฟิล์มและโคนกรวยเป็นพื้นที่ของเปิด ω ของเลนส์หน้าของเครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์

ในกรณีที่ใช้เครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์เครื่องเดียวกัน R_{λ} และ Ω จะไม่เปลี่ยนแปลง และถือว่าฟิล์มขมูดที่นำมาวัดความเหาตอบสนองทุกความยาวคลื่นด้วยอัตราส่วนเท่า ๆ กัน จะได้

$$I_\lambda = TI_{\lambda,0} \quad (5.25)$$

โดยที่ T เป็นตัวประกอบของการให้แสงผ่านของฟิล์มซึ่งคงที่ในพื้นที่เล็ก ๆ และ $I_{\lambda,0}$ ของเครื่องไมโครเคนซิโตมิเตอร์แต่ละเครื่องจะคงที่ จึงได้สมการ (5.24) เป็น

$$Q \propto TI_{\lambda,0} \int \int R_\lambda d\lambda dw$$

ในการปรับเครื่องไมโครเคนซิโตมิเตอร์สำหรับวัดแต่ละครั้ง $\int \int R_\lambda d\lambda dw$ จะคงที่ ดังนั้นจึงได้ว่า

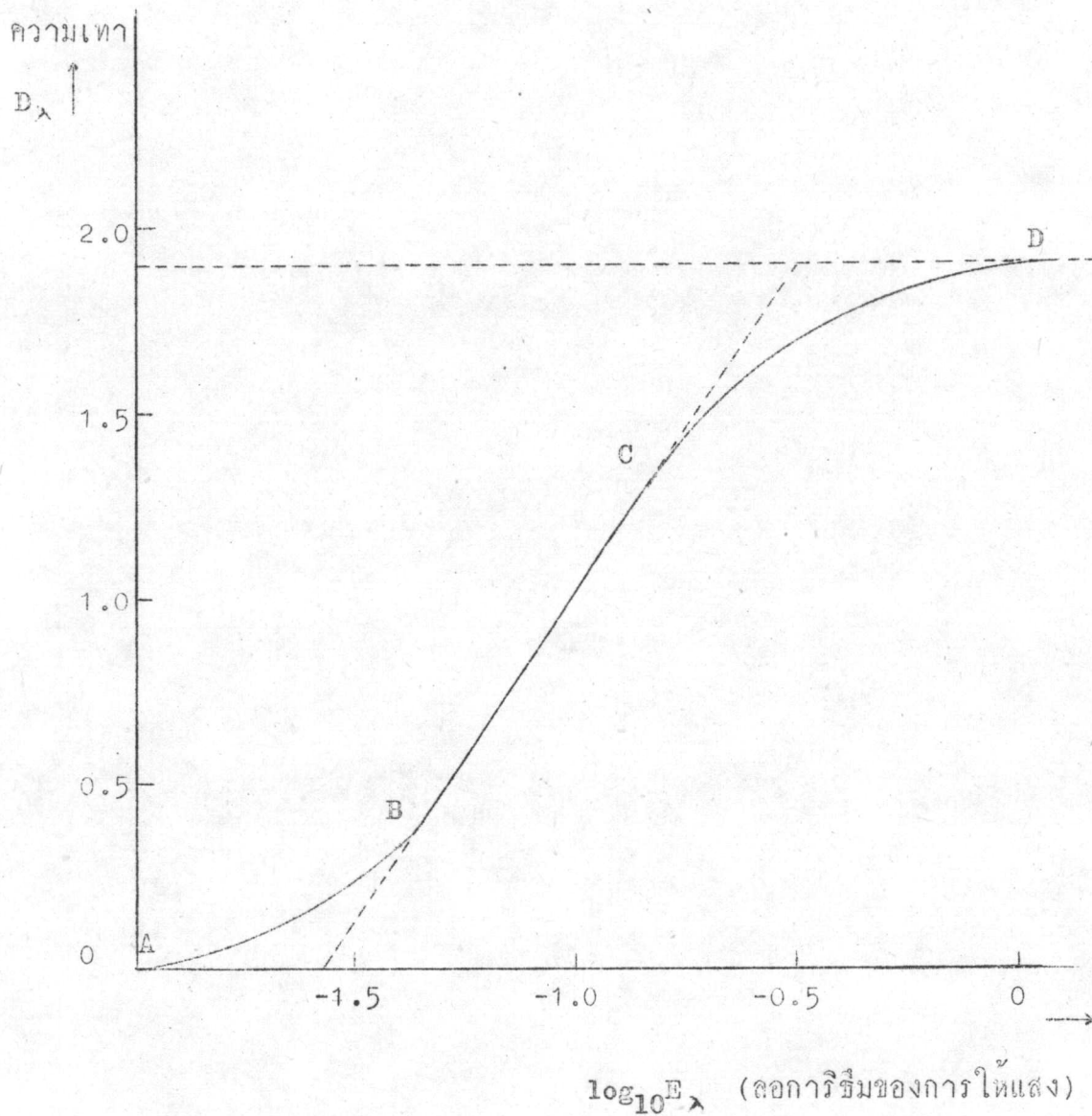
$$Q \propto TI_{\lambda,0}$$

$$\text{นั่นคือ} \quad Q \propto I_\lambda \quad (5.26)$$

เพราะฉะนั้นสิ่งที่เครื่องมือวัดได้จึงแปรผันโดยตรงกับ I_λ และอุปกรณ์ที่ใช้วัดเป็นระบบอัตโนมัติ ซึ่งวัดและแปลงเป็นค่า $\log_{10} \left(\frac{I_{\lambda,0}}{I_\lambda} \right)$ หรือ $\log_{10} \left(\frac{I}{T} \right)$ ให้เสมอ ซึ่งก็คือค่าความเทาตามสมการ (5.23) นั่นเอง ดังนั้นจึงได้ค่าความเทาสัมพันธ์กับตัวประกอบของการให้แสงผ่านของฟิล์มดังนี้

$$D = \log_{10} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (5.27)$$

3.4 ความสัมพันธ์ของการให้แสงกับความเทาที่เกิดขึ้น ในงานวิจัยนี้เป็นการถ่ายภาพสเปกตรัม ดังนั้นความเทาที่เกิดขึ้นบนฟิล์มในแต่ละแถบเล็ก ๆ จึงเนื่องมาจากแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วงหนึ่ง ซึ่งกำหนดโดยขนาดของรูปลักษณ์ของอุปกรณ์ การกล่าวถึงความเทาของข้อมูลอันเนื่องมาจากการให้แสง D_λ จะเขียนเป็น D_λ โดยที่ λ จะบอกถึงค่าของความยาวคลื่นเฉลี่ยที่ทำให้เกิดความเทา D_λ นั้น



ภาพที่ 5.8 แสดงเส้นลักษณะของฟิล์มหรือกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการให้แสงกับความเทาที่เกิดขึ้น

ค่าความเทาของฟิล์มที่ล้างแล้วจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ ได้แก่ ปริมาณการให้แสง ชนิดของฟิล์ม อุณหภูมิขณะให้แสง และสภาวะในการล้างฟิล์ม ในการถ่ายภาพเพื่อเก็บข้อมูลจึงต้องกำหนดชนิดของฟิล์มเป็นอย่างดีเกี่ยวข้องตลอด และยังกำหนด สภาวะในการล้างฟิล์มซึ่งได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และน้ำยาล้างให้เหมือนกัน และถ้า เป็นไปได้ในขณะถ่ายภาพควรทำในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิได้ จึงเหลือเฉพาะค่าการให้แสง ที่จะเป็นตัวแปรเปลี่ยนความเทา ในงานวิจัยนี้ต้องการหาค่าความเข้มจำเพาะ I_x ซึ่ง สัมพันธ์กับค่าการให้แสงตามสมการ (5.21) แต่ฟิล์มบันทึกค่า D_x ในรูปของ D_x ค่า ความเทา D_x นี้สามารถวัดได้โดยตรงจากความเทาข้อมมูลที่ล้างแล้วนั้น ดังนั้นจึง ต้องหาความสัมพันธ์ระหว่าง E_x กับ D_x ออกมา เพื่อแปลงค่า D_x ไปเป็นค่า E_x ต่อไป

วิธีการหาความสัมพันธ์ระหว่าง E_x กับ D_x โดยทั่วไปนั้นเมื่อกำหนดชนิดของ ฟิล์มที่ใช้และสภาวะในการล้างฟิล์มตลอดจนอุณหภูมิขณะให้แสงที่เหมาะสมแล้ว จึงนำฟิล์ม มารับแสงในช่วงความยาวคลื่น λ ที่กำหนด โดยเริ่มจากปริมาณการให้แสงต่ำที่สุดที่ทำให้ เกิดความเทาบนฟิล์มได้ แล้วค่อย ๆ เพิ่มปริมาณขึ้นจนถึงปริมาณสูงสุดซึ่งเมื่อเพิ่มขึ้นไปอีก ก็ไม่ทำให้ความเทาเพิ่มขึ้น จุดการให้แสงแต่ละขั้นนั้นไว้ นำฟิล์มไปล้างและวัดความ เทาที่เกิดขึ้น ตอนนี้จะได้ค่าความเทา D_x กับค่าการให้แสง E_x ที่สอดคล้องกัน นำค่า ทั้ง 2 พวกมาเขียนกราฟโดยให้แกนตั้งเป็นค่าความเทา D_x และแกนนอนเป็นลอการิทึม ของการให้แสง E_x จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E_x กับ D_x ดังภาพ 5.6

3.5 ความชันของเส้นลักษณะหรือแกมมา ความชันที่จุดใด ๆ บนเส้นลักษณะ มักเขียนแทนด้วยตัว γ_x ความชันนี้มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของผลต่างของความเทาต่อผล ต่างของลอการิทึมของการให้แสงที่จุดนั้น เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\gamma_x = \frac{\Delta D_x}{\Delta \log_{10} E_x} \quad (5.28)$$

ค่าของ γ_x แปรตามชนิดของฟิล์มและสภาวะในการล้างฟิล์ม การนำค่า γ_x มาช่วย วิเคราะห์ข้อมูล จึงต้องใช้ฟิล์มเก็บข้อมูลเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้หาค่า γ_x นั้น รวมทั้ง

ต้องล้างฟิล์มในสภาวะเดียวกันด้วย สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ ถ้าทราบเส้น
ลักษณะทั้งเส้นจะดีที่สุด หรืออย่างน้อยก็ควรทราบเส้นลักษณะตลอดช่วงที่ใช้งาน ในงาน
วิจัยนี้ ได้ทำการหาเส้นลักษณะในช่วงที่ใช้งานแล้วแทนค่าเป็นสมการกำลังสอง ซึ่งจะ
ได้กล่าวถึงรายละเอียดต่อไป

3.6 การเขียนกราฟของเส้นลักษณะจากข้อมูลที่ได ในขณะที่เก็บข้อมูลได้เทียบ
มาตรฐานโดยใช้แผ่นบันไดทอนแสงปิกทาบหน้าสไลด์ เพื่อทำหน้าที่กันแสงจากดวงอาทิตย์
เป็นชั้น ๆ ภาพสเปกตรัมบางภาพในชุดข้อมูลชุดหนึ่งจะมีภาพของแผ่นบันไดทอนแสงติดอยู่
ด้วย เมื่อนำฟิล์มของภาพสเปกตรัมพร้อมแผ่นบันไดทอนแสงนี้ไปวัดความเทาด้วยเครื่อง
ไมโครเคนซิโตมิเตอร์ จะได้ผลมีลักษณะคล้ายชั้นบันได ดังภาพ ผ.2 ในภาคผนวก
เนื่องจากความเข้มจำเพาะของดวงอาทิตย์ลดลงเมื่อออกจากกลางดวง ไปยังขอบดวง
และความเทาของแผ่นบันไดทอนแสงแต่ละชั้นก็ไม่เท่ากันอยู่แล้ว ดังนั้นภาพแผ่นบันได-
ทอนแสงที่ปรากฏอยู่บนฟิล์มจึงมีความเทาที่ซับซ้อนพอสมควร ซึ่งจะได้นำมาวิเคราะห์ต่อไป
ค่าการให้แสงจะหาได้จากค่าความเทาของแผ่นบันไดทอนแสง ซึ่งค่าจริงที่
วัดได้แสดงอยู่ในภาพ ผ.3 ของภาคผนวก จะเห็นได้ว่าส่วนที่ใสของแผ่นบันไดทอนแสงจะ
มีค่าความเทาต่ำ ดังนั้นแสงอาทิตย์ที่ผ่านส่วนนี้ไปจึงมีความเข้มมากซึ่งทำให้เกิดความ-
เทาบนฟิล์มมาก ทำนองกลับกัน ส่วนที่ทึบของแผ่นบันไดทอนแสงจะมีค่าความเทาสูงและ
ยอมให้แสงผ่านไปได้น้อย ความเทาที่เกิดขึ้นบนฟิล์มจึงมีค่าน้อยกว่าตอนแรก ถ้ากำหนด
ให้ความเทาของแผ่นบันไดทอนแสงที่ระดับ i โค ๆ เป็น d_i ก็จะได้ว่า

$$d_i = \log_{10} \left(\frac{I_{\lambda,0}}{I_{\lambda,i}} \right) \quad (5.29)$$

โดยที่ $I_{\lambda,0}$ เป็นความเข้มจำเพาะที่ตกลงบนแผ่นบันไดทอนแสง

$I_{\lambda,i}$ เป็นความเข้มจำเพาะที่ผ่านบันไดทอนแสงออกมาจากระดับความเทา i

สำหรับแผ่นบังโคทอนแสงนั้น ต้องถือว่าเป็นตัวตัดแสงทุกความยาวคลื่นเท่ากันหมด (neutral density) ดังนั้นค่า d_i ของแต่ละระดับจึงเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่น

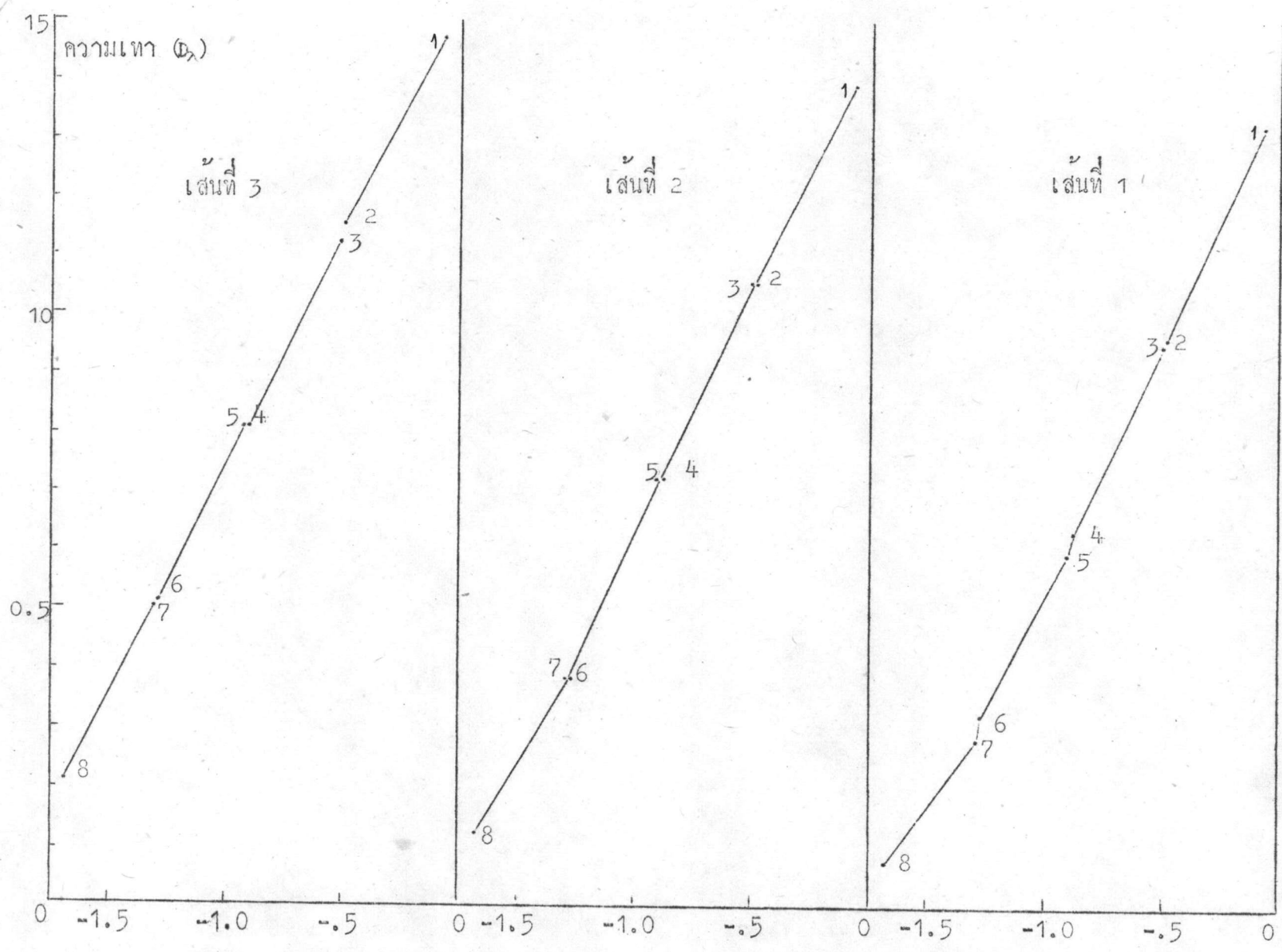
เมื่อนำแผ่นบังโคทอนแสงไปปิดหน้าสลิต กำหนดให้ตัวประกอบของการให้แสงผ่านแต่ละระดับเป็น T_i และกำหนดให้ความเข้มจำเพาะที่ตกลงบนแผ่นบังโคทอนแสง $I_{\lambda,0}$ มีค่าคงที่ตลอดแนวสลิต จะได้ว่า

$$I_{\lambda,i} = T_i I_{\lambda,0} \quad (5.30)$$

และถ้าให้ β_λ เป็นตัวประกอบของการให้แสงผ่านของทัศนอุปกรณ์อื่น ๆ จนถึงฟิล์ม ความเข้มจำเพาะที่ตกถึงระนาบฟิล์มจากแผ่นบังโคทอนแสงระดับที่ i จะเป็น $\beta_\lambda I_{\lambda,i}$ ถ้าให้ $E_{\lambda,i}$ และ $E_{\lambda,j}$ เป็นการให้แสงที่ระนาบฟิล์มเนื่องจากแสงที่ออกจากแผ่นบังโคทอนแสงระดับ i และ j ตามลำดับ และทัศนอุปกรณ์ที่ถ่ายภาพเป็นชุดเดียวกัน (มุมต้น เวลา และช่วงสเปกตรัมเท่ากัน) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \log_{10}\left(\frac{E_{\lambda,i}}{E_{\lambda,j}}\right) &= \log_{10}\left(\frac{I_{\lambda,i}}{I_{\lambda,j}}\right) \\ &= \log_{10}\left(\frac{I_{\lambda,0}}{I_{\lambda,0}}\right) - \log_{10}\left(\frac{I_{\lambda,0}}{I_{\lambda,i}}\right) \\ &= d_j - d_i \end{aligned}$$

$$\log_{10}(E_{\lambda,i}) + d_i = \log_{10}(E_{\lambda,j}) + d_j$$



ภาพที่ 5.7 แสดงกราฟที่ได้จากค่าความเทาของแผ่นบับไตทอนแสงจริง ($\log_{10} E_\lambda$) กับค่าความเทาของแผ่นบับไตทอนแสง จากฟิล์มข้อมูลที่มีความยาวคลื่น 5500 อังสตรอม ก่อนการปรับจุด

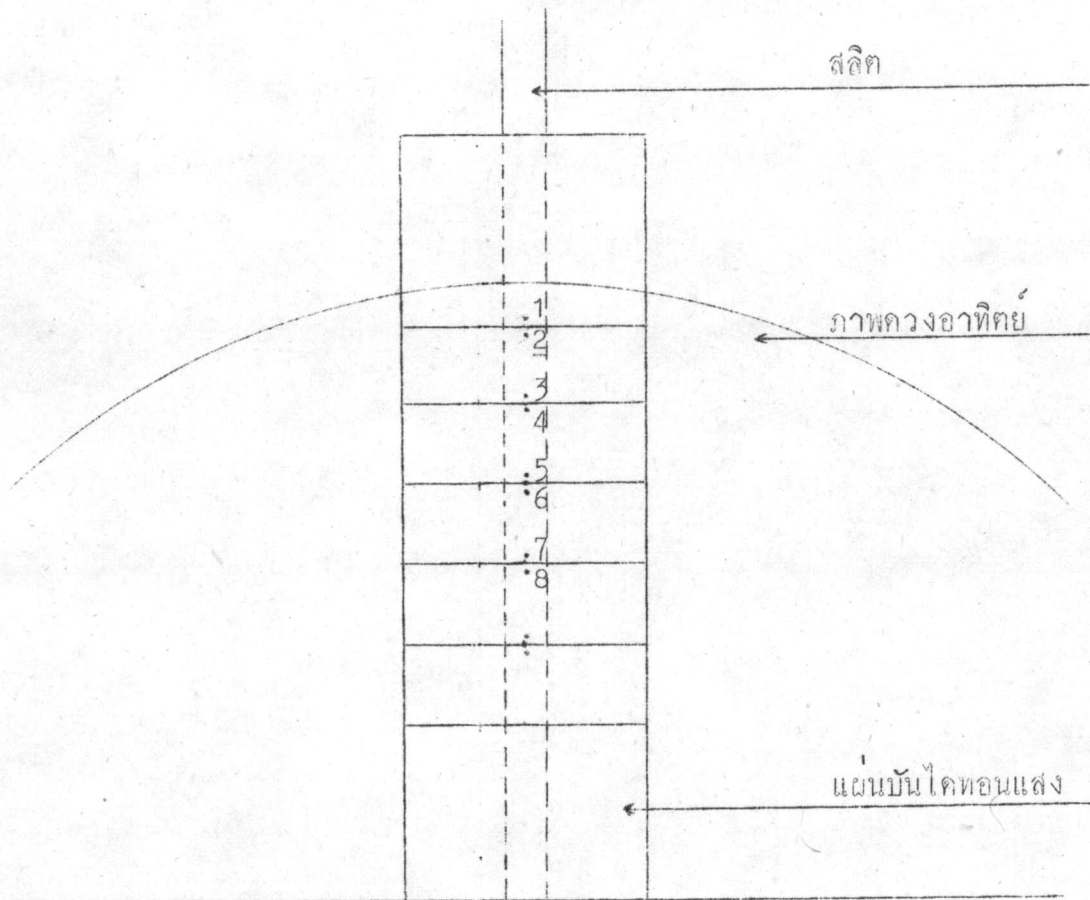
ถ้าให้ $\log_{10}(E_{\lambda,j}) + d_j = C_{\lambda}$
 โดยที่ C_{λ} เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น
 จะได้

$$\log_{10} E_{\lambda,i} = C_{\lambda} - d_i \quad (5.31)$$

นั่นคือ จากค่าความเทาของแผ่นมันโคทอนแสงจะนำไปหาค่าของการให้แสงได้ โดยที่
 ความยาวคลื่นค่าหนึ่งซึ่งหลังจากนี้จะตัดอักษร i ออก และจะกล่าวได้ว่า $\log_{10} E_{\lambda}$
 แปรผันโดยตรงกับความเทา d

นำค่าความเทาของข้อมูลพร้อมแผ่นมันโคทอนแสง D_{λ} ที่วัดได้กับค่า $\log_{10} E_{\lambda}$
 ที่ได้จากค่าความเทาของแผ่นมันโคทอนแสงโดยตรง มาเขียนกราฟสำหรับแต่ละความ-
 ยาวคลื่น โดยมี D_{λ} เป็นแกนตั้ง $\log_{10} E_{\lambda}$ เป็นแกนนอน จะได้กราฟดังภาพที่ 5.7
 เนื่องจากความเข้มจำเพาะที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนดวงอาทิตย์มีค่าต่างกัน ทำให้ค่าการให้
 แสงจากดวงอาทิตย์ที่ตกลงบนแผ่นมันโคทอนแสงแต่ละจุดมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งแตกต่างจากที่
 สมมุติในตอนแรก ดังนั้นค่าของ $\log_{10} E_{\lambda}$ จึงไม่แปรผันโดยตรงกับ d ของแผ่นมันโค-
 ทอนแสงตามที่ควรจะเป็น เส้นกราฟที่ได้ครั้งแรกจึงไม่เป็นเส้นเรียบ จำเป็นต้องปรับ
 และเลื่อนจุดบนเส้นกราฟตามเหตุผลดังกล่าวให้เหมาะสมต่อไป

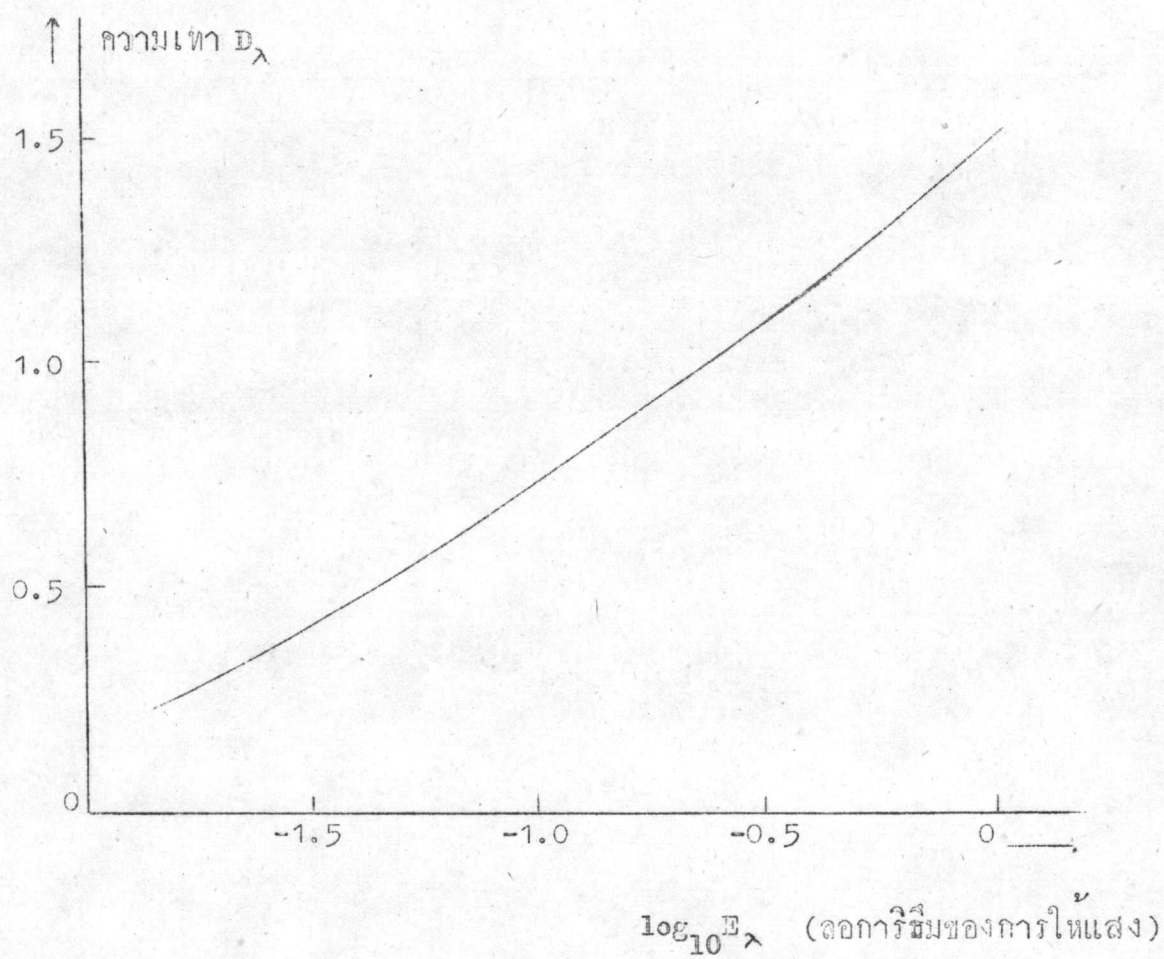
3.7 การปรับและเลื่อนจุด พิจารณาภาพที่ 5.8 จะเห็นว่าจุด 1 กับ 2,
 3 กับ 4, 5 กับ 6 และ 7 กับ 8 แต่ละคู่จะมีลักษณะเหมือนกัน จะขอกล่าวถึงลักษณะ
 อันนี้โดยใช้จุด 1 กับ 2 เป็นตัวแทน กล่าวคือ จุด 1 กับจุด 2 เป็นจุดที่อยู่ใกล้กันมาก
 บนแผ่นมันโคทอนแสง แต่มีระดับความเทาต่างระดับกัน เมื่อนำแผ่นมันโค ไปปิดทาบบน
 สลิตอันเป็นตำแหน่งเกิดภาพของดวงอาทิตย์ แสงจากดวงอาทิตย์ที่ตกลงบนจุด 1 และ 2
 ถือได้ว่ามีค่าเท่ากัน ความแตกต่างของความเข้มแสงที่ผ่านแผ่นมันโคทอนแสงออกมาจาก
 จุด 1 และ 2 จึงเป็นผลมาจากความเทาของแผ่นมันโคทอนแสงโดยตรง ดังนั้นจึงสรุป
 วากราฟในภาพ 5.7 ความชันของเส้นคอร์ดระหว่างจุด 1 กับ 2 เป็นสิ่งที่ถูกต้อง



ภาพที่ 5.8 ลักษณะการหักเหแผ่นบันไดทอนแสงกับภาพดวงอาทิตย์ที่สลิต
และแสดงจุดที่ใกล้กันกับจุดที่ห่างกันมากบนแผ่นบันไดทอนแสง
ซึ่งเป็นผลให้เกิดการให้แสงที่ไม่เท่ากันขึ้น

เช่นเดียวกับ - ความชันของเส้นต่อของจุด 3 กับ 4, 5 กับ 6 และ 7 กับ 8 กลับไปพิจารณาภาพ 5.8 อีกครั้ง จุด 2 กับ 3, 4 กับ 5 และ 6 กับ 7 จะมีลักษณะเหมือนกัน โดยให้จุด 2 กับ 3 เป็นตัวแทนจะอธิบายได้ดังนี้ จุด 2 กับ 3 เป็นจุดบนแผนบันไดทอนแสงที่อยู่ห่างกันแต่มีระดับความเท่าเดียวกัน เมื่อทาบจุด 2 กับ 3 ลงบนภาพดวงอาทิตย์ ความเข้มแสงของภาพดวงอาทิตย์ที่ผ่านจุดทั้งสองจะต่างกัน ทำให้ค่าการให้แสงจากจุด 2 กับ 3 ต่างกันไปด้วยแม้จะอยู่ในระดับความเท่าเดียวกัน สำหรับการเขียนกราฟในภาพที่ 5.7 ได้กำหนดให้จุด 2 กับ 3 มีค่าการให้แสงเท่ากันจึงไม่ถูกต้อง เช่นเดียวกับจุด 4 กับ 5 และ 6 กับ 7 ต้องทำการแก้ไขโดยยึดหลักที่ว่าเส้นลักษณะของฟิล์มทั่วไปจะเป็นเส้นราบเรียบและความชันของเส้นค่อย ๆ เปลี่ยน. ในภาพที่ 5.7 ความชันของเส้นต่อที่ถูกต้องคือเส้นต่อระหว่างจุด 1 กับ 2, 3 กับ 4, 5 กับ 6 และ 7 กับ 8 ส่วนที่ไม่ถูกต้องคือเส้นต่อระหว่างจุด 2 กับ 3, 4 กับ 5 และ 6 กับ 7 จึงปรับใหม่โดยเลื่อนจุด 3 มาทางซ้ายของกราฟ (ดูภาพ 5.7) ใ้มาต่อกันพอดีกับแนวเส้นที่เชื่อมระหว่างจุด 1 กับ 2 ดังนั้นเส้นที่เชื่อมต่อระหว่างจุด 1, 2, กับ 3 จะมีความชันค่าเดียวกัน เมื่อเลื่อนจุด 3 ไปแล้วจุดอื่น ๆ ที่อยู่ใตจุด 3 ก็จะต้องเลื่อนตามไปด้วยในระะเท่ากัยที่จุด 3 เลื่อนไป ฉากเส้นต่อระหว่างจุด 3 กับ 4 และเลื่อนจุด 5 ไปทำนองเดียวกับจุด 3 ทำเช่นนี้ตลอดเส้นก็จะได้กราฟที่ปรับและเลื่อนจุดแล้วเป็นเส้นโค้งเรียบดังแสดงในภาพ 5.9) ซึ่งเป็นช่วงที่เกือบเป็นเส้นตรงของเส้นลักษณะเหมาะสมในการเก็บข้อมูลมาก

เนื่องจากฟิล์มข้อมูลที่น่ามาวัดความเข้มมีจำนวนหลายชุด และแต่ละชุดยังแบ่งออกเป็นหลายความยาวคลื่น ซึ่งต้องเขียนกราฟและปรับจุดตามวิธีการดังกล่าวข้างต้น ในความยาวคลื่นอันหนึ่งต้องการกราฟเพียงเส้นเดียว จึงต้องนำกราฟหลายรูปมาเขียนรวมให้เป็นรูปเดียว โดยยึดหลักว่าที่ตอนกลางของทุกเส้นมีค่าถูกต้องที่สุดในงานนี้ได้ กำหนดให้ที่ค่า $D_x = 1.0$ เป็นค่าหลัก ซึ่งกราฟทุกเส้นจะต้องซ้อนกันที่จุดนี้ ส่วนตอนปลายทั้งสองข้างอาจมีการเบี่ยงเบนออกไปซึ่งจะปรับด้วยการเฉลี่ยด้วยคว จึงได้เส้นลักษณะ



ภาพที่ 5.9. แสดงเส้นลักษณะของพหุคูณในแง่ความยาวคลื่นภายหลังการปรับและเลือกจุด

ตารางที่ 5.1

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการและของคหสัมพันธ์ของเส้นถ้อยณะของฟิล์มข้อมูล

λ	a	b	c	r
4200	1.500	1.042	0.155	1.00
4400	1.473	0.993	0.139	1.00
4600	1.454	0.995	0.134	1.00
4800	1.459	1.074	0.165	1.00
5000	1.481	1.097	0.165	1.00
5200	1.567	0.983	0.083	1.00
5500	1.566	0.945	0.079	1.00

ของฟิล์มข้อมูลที่มีความยาวคลื่นสั้น เพื่อความสะดวกในการใช้เส้นลักษณะทำการวิเคราะห์ข้อมูล จึงหาสมการกำลังสองซึ่งจะเป็นตัวแทนของเส้นลักษณะ ด้วยวิธีการปรับเส้นโค้งแบบกำลังสองน้อยที่สุด (least square curve fitting) สมการกำลังสองที่ได้เขียนเป็นลักษณะดังนี้

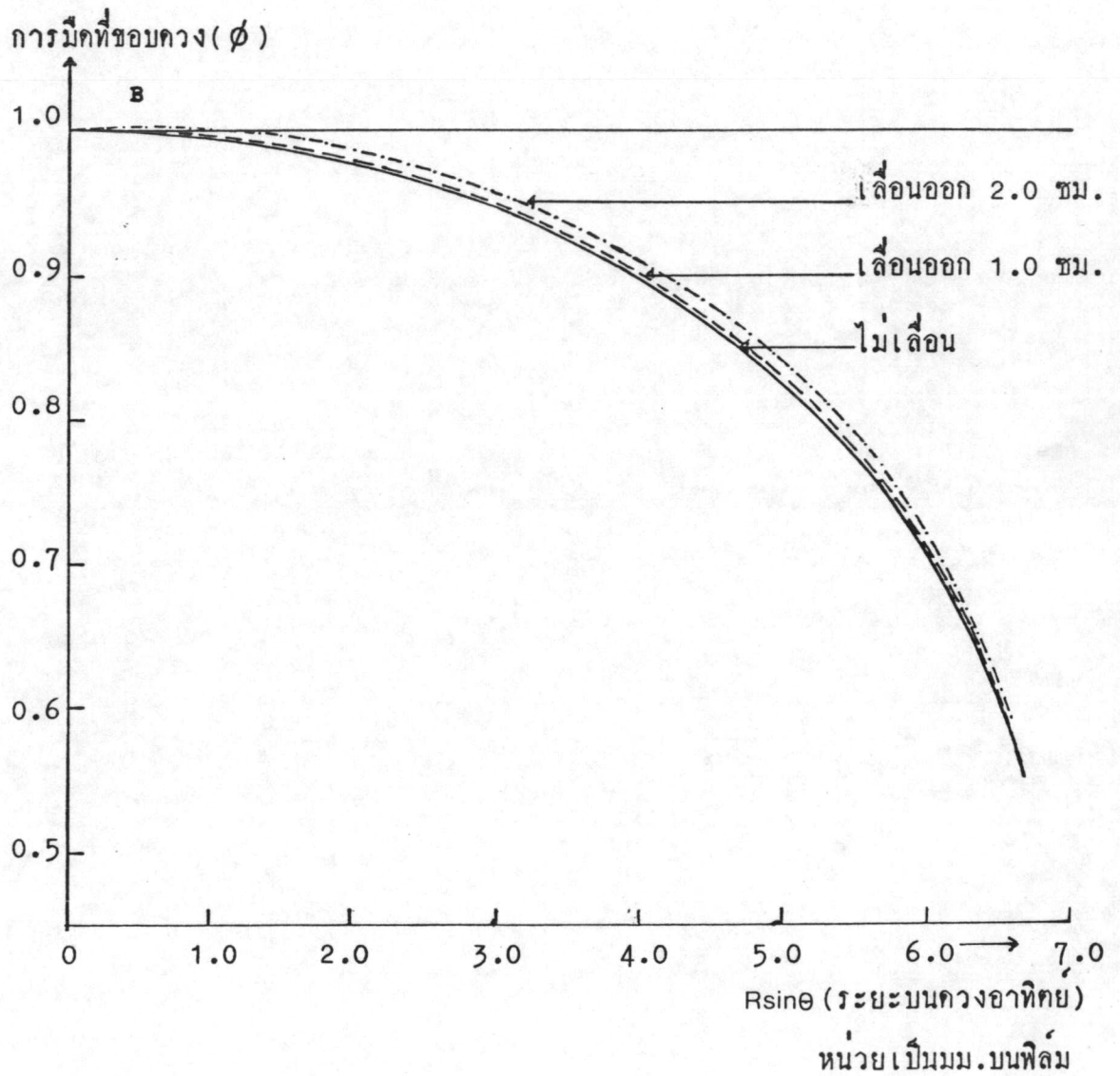
$$D_{\lambda} = a + b \log_{10} E_{\lambda} + c (\log_{10} E_{\lambda})^2 \quad (5.32)$$

ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการสองอยู่ในตารางที่ 5.1 โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่นที่ใช้ และ r เป็นสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient)

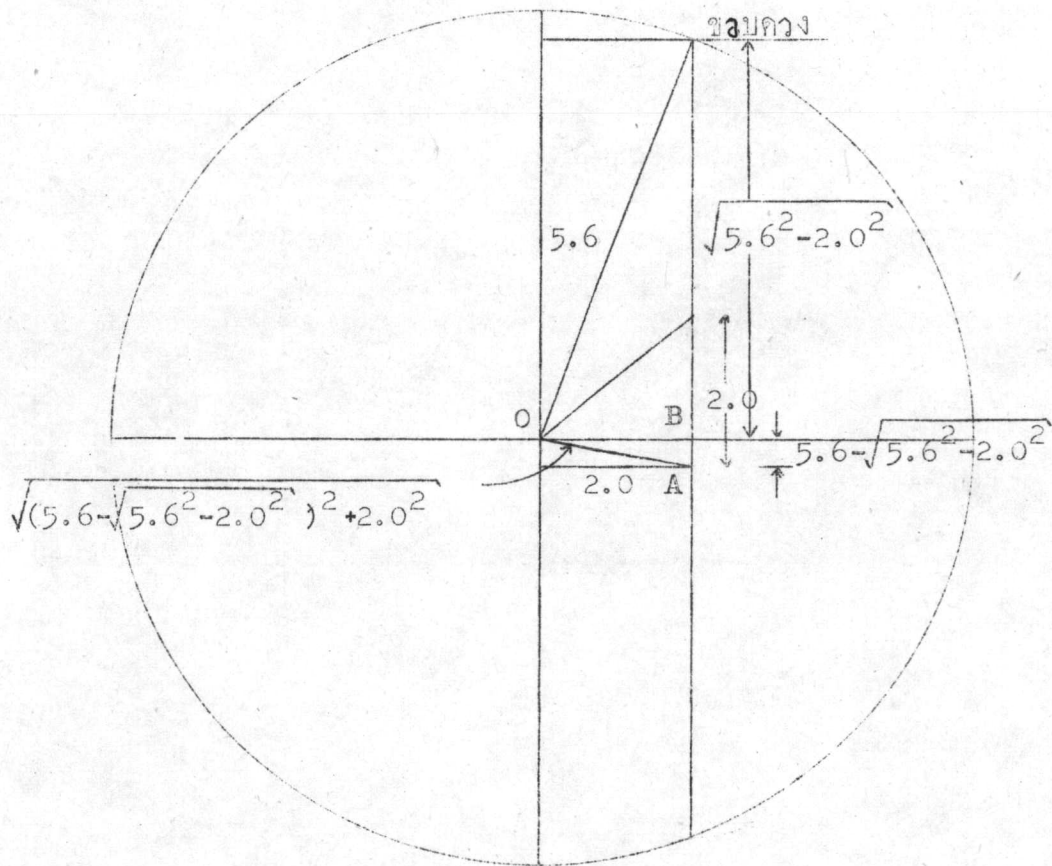
4. การหาเส้นการมืดที่ขอบดวง (Limb darkening curve)

เมื่อทำการวัดความเทาของฟิล์มข้อมูลจะได้กราฟที่มีแกนนอนเป็นตำแหน่งบนดวงอาทิตย์ ($R \sin \theta$) ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งตามแนวยาวของสปีดของสเปกโตรกราฟหรือแนวขวางของฟิล์มในภาพที่ 5.1 ส่วนแกนตั้งจะเป็นค่าความเทา D_{λ} การหาเส้นการมืดที่ขอบดวงจากข้อมูลที่ได้นี้มีค่ากับขั้นดังนี้

4.1 การหาค่าแห่งกลางดวง โดยที่ทราบว่ามีของดวงอาทิตย์บนฟิล์มเท่ากับ 0.70 เซนติเมตร และขอบดวงซึ่งกำหนดจากค่าความเทาเป็นศูนย์หรือใกล้ศูนย์จากการวัดด้วยเครื่องไมโครเคนซีโตมิเตอร์ วัดระยะบนฟิล์มจากขอบดวงเข้าไปหากลางดวงเป็นระยะ 0.70 เซนติเมตร กำหนดให้ตำแหน่งนี้เป็นกลางดวงมีค่า $R \sin \theta = 0$ การหาค่าแห่งกลางดวงแบบนี้ทำได้ง่าย อีกทั้งค่าการมืดที่ขอบดวงที่ได้ก็จะนิคพลาดไปไม่มากนักถ้าขณะที่ถ่ายภาพสปีดอยู่ตรงกับตำแหน่งกลางดวง แม้ว่าค่าแห่งกลางดวงจะเลื่อนไปจากสปีดถ้าหากไม่เกินระยะ 1 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับขนาดรัศมี 5.6 เซนติเมตรของภาพดวงอาทิตย์บนสปีดแล้ว เส้นการมืดที่ขอบดวงจะมีค่าเปลี่ยนไปจากเส้นจริงน้อยกว่าร้อยละ 1 เพราะความเข้มจำเพาะที่กลางดวงกับบริเวณใกล้เคียง



ภาพที่ 5.10 แสดงเส้นการมิดที่ขอบวงเมื่อตำแหน่งกลางวงอยู่ตรง
และไม่ตรงกับสลิต



ภาพที่ 5.11 แสดงตำแหน่งที่เปลี่ยนไปเมื่อสลิตเลื่อนออกไปจากกลางดวงจริง เป็นระยะ 2.0 มม. O เป็นกลางดวงจริง A เป็นกลางดวงปรากฏ B เป็นจุดบนแนวสไลต์ที่อยู่ใกล้จุด O มากที่สุด

เกือบจะไม่ต่างกัน ส่วนกรณีที่ตำแหน่งกลางวงเลื่อนออกไปจากสลิคมากกว่า 1 เซนติเมตร ภาพ 5.10 จะทราบได้จากรูปภาพของเส้นการมีดที่ขอบวงซึ่งมีบางตำแหน่งที่มีไซกลางวงมีความเข้มจำเพาะสูงกว่ากลางวง ผลอันที่ได้มาจากการศึกษาข้อมูลอ้างอิง โดยมีสมมุติฐานว่าความเข้มจำเพาะที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนวงอาทิตย์ของข้อมูลอ้างอิงเป็นค่าที่ถูกกรอง และใช้วิธีการอินเทอร์โพลेशन (interpolation) หากค่าความเข้มจำเพาะที่ตำแหน่งใด ๆ บนวงอาทิตย์ได้จากข้อมูลอ้างอิงที่มีอยู่ เมื่อสลิคเลื่อนออกจากกลางวงมาก เช่น 2.0 เซนติเมตร การวัดจากขอบวงเข้าไป 0.70 เซนติเมตรบนฟิล์ม หรือ 5.6 เซนติเมตรบนสลิคจะได้ตำแหน่งกลางวงปรากฏ ซึ่งอยู่ห่างจากกลางวงจริง $\sqrt{(5.6 - \sqrt{5.6^2 - 2.0^2})^2 + 2.0^2} = 2.03$ เซนติเมตร ภาพที่ 5.11 ตำแหน่งอื่น ๆ ที่วัดจากกลางวงปรากฏจะต้องนำมาคำนวณหาว่าอยู่ห่างจากกลางวงจริงเท่าไร เพื่อนำไปหาความเข้มจำเพาะที่ถูกกรอง เช่น ตำแหน่งหนึ่งห่างจากกลางวงปรากฏ 2.0 เซนติเมตร จะอยู่ห่างจากกลางวงจริง $\sqrt{(2.0 - 5.6 + \sqrt{5.6^2 - 2.0^2})^2} = 2.6$ เซนติเมตร ซึ่งความเข้มจำเพาะที่ตำแหน่ง 2.6 กับ 2.0 เซนติเมตรจะมีค่าต่างกัน อีกทั้งความเข้มจำเพาะที่ตำแหน่งกลางวงจริงกับกลางวงปรากฏก็แตกต่างกันด้วย ในภาพที่ 5.11 จะเห็นได้ว่าจุด B จะอยู่ใกล้กลางวงจริง 0 มากกว่าที่จุด A ซึ่งเป็นกลางวงปรากฏอยู่ใกล้จุด 0 ดังนั้นความเข้มจำเพาะที่จุด B จะมีความมากกว่าที่จุด A เส้นการมีดที่ขอบวงซึ่งกลางวงเลื่อนไปจึงมีตำแหน่ง B ซึ่งมีไซกลางวงมีความเข้มสูงกว่ากลางวงปรากฏ ดังแสดงในภาพที่ 5.11 ตำแหน่งของจุด B นี้เองที่ชี้ให้เห็นว่าตำแหน่งกลางวงที่ทำได้ไม่ไซกลางวงจริงและยังเลื่อนออกไปมากกว่า 1 เซนติเมตร หรือ 0.18 เท่าของรัศมีดวงอาทิตย์ ถ้าเลื่อนออกไปน้อยกว่า 1 เซนติเมตร ตำแหน่งที่มีความเข้มสูงกว่ากลางวงจะมีค่ามากกว่าความเข้มที่กลางวงปรากฏเพียงเล็กน้อย ดังนั้นเส้นการมีดที่ขอบวงตำแหน่งที่มีค่าสูงกว่า 1.0 จึงสังเกตเห็นได้จากกราฟ สำหรับเส้นการมีดที่ขอบวงซึ่งหามาได้นั้นไม่ปรากฏว่ามีตำแหน่งใดที่มีค่าสูงเกินกว่า 1.0 จึงพอจะยืนยันได้ว่าสลิคของสเปกโตรกราฟที่ใช้วางอยู่ใกล้กับกลางวงจริง และห่างจากกลางวงจริงไม่เกิน 1 เซนติ-

เมตร ความผิดพลาดของเส้นการมิดที่ขอบวงที่เกินกว่าร้อยละ 1 มาก ควรจะเป็นผลมาจากสาเหตุอื่นมิใช่เพราะการเลื่อนไปจากกลางวงจริงของสลิตของสเปคโตรกราฟ

4.2 การหาค่า $\log_{10} \phi_\lambda$ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนวงอาทิตย์

($\log_{10} \phi_\lambda - R \sin \theta$ curve) ค่าความเทาของฟิล์มข้อมูลทั่วคี่แล้วต้องนำมาแปลงเป็นค่า $\log_{10} \phi_\lambda$ เสียก่อน โดยอาศัยเส้นลักษณะของฟิล์มในแต่ละความยาวคลื่น โดยที่ทราบว่าความเข้มจำเพาะที่ตำแหน่งกลางวงมีค่าสูงสุด ปริมาณการให้แสง E_λ ที่กลางวงจึงมีค่าสูงสุดด้วย เมื่อนำค่านี้ไปหารค่าการให้แสงที่ตำแหน่งอื่น ๆ รวมทั้งตำแหน่งกลางวง จะได้ค่าการมิดที่ขอบวง ϕ_λ ณ ตำแหน่งกลางวงเป็น 1.0 ดังนั้น $\log_{10} \phi_\lambda = 0$ ที่ $R \sin \theta = 0$ นำค่า $\log_{10} \phi_\lambda$ กับ $R \sin \theta$ มาเขียนกราฟ เนื่องจากข้อมูลในแต่ละความยาวคลื่นมีอยู่หลายชุด กราฟที่ได้มีจุดกระจาย จึงต้องทำการปรับเส้นโค้งให้เป็นกราฟเพียงเส้นเดียว

4.3 การปรับเส้นโค้ง เนื่องจากกราฟของ $\log \phi_\lambda$ กับ $R \sin \theta$ มีจุดกระจายมากไม่สะดวกต่อการนำไปใช้ จึงต้องหาเส้นซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มจุดเพียงเส้นเดียว ซึ่งทำได้โดยการปรับเส้นโค้งมี 2 วิธี ดังนี้

4.3.1 การปรับเส้นโค้งวิธีที่ 1 นำกราฟ $\log_{10} \phi_\lambda - R \sin \theta$ ของแต่ละความยาวคลื่นในหัวข้อ 4.2 ข้างต้นมาปรับด้วยมือและไม่โค้ง (curve) จนได้เป็นเส้นกราฟที่เรียบ 1 เส้นใน 1 ความยาวคลื่น แล้วถอดค่าลอการิทึมของ $\log \phi_\lambda$ เหลือเป็นค่า ϕ_λ กับ $R \sin \theta$ นำไปเขียนกราฟการมิดที่ขอบวง ($\phi_\lambda - R \sin \theta$) ปรากฏว่าได้กราฟรูปร่างไม่คี่มีบางจุดที่ความชันมากกว่าข้อมูลอ้างอิงอย่างมาก ผลอันนี้อาจเกิดจากการปรับเส้นโค้งไม่คี่พอ หรือเนื่องจากการล้างฟิล์มไม่สม่ำเสมอ ผลทั้ง 2 ประการนี้อาจแก้ไขให้ลดลงได้ด้วยการปรับเส้นโค้งวิธีที่ 2

4.3.2 การปรับเส้นโค้งวิธีที่ 2 จากกราฟในหัวข้อ 4.2 ข้างต้น ในแต่ละชุดที่ความยาวคลื่นเดียวกันนั้น นำมาหาความชันที่ตำแหน่งต่าง ๆ ความชันที่ได้คือค่า $\Delta \log \phi_\lambda / \Delta R \sin \theta$ นำความชันนี้มาเขียนกราฟกับค่า $R \sin \theta$ ที่สอดคล้องกัน โดยทราบว่าความชันที่ตำแหน่งกลางวงมีค่าเป็นศูนย์ จะได้กราฟซึ่งยังมีจุดกระจายอยู่อีก

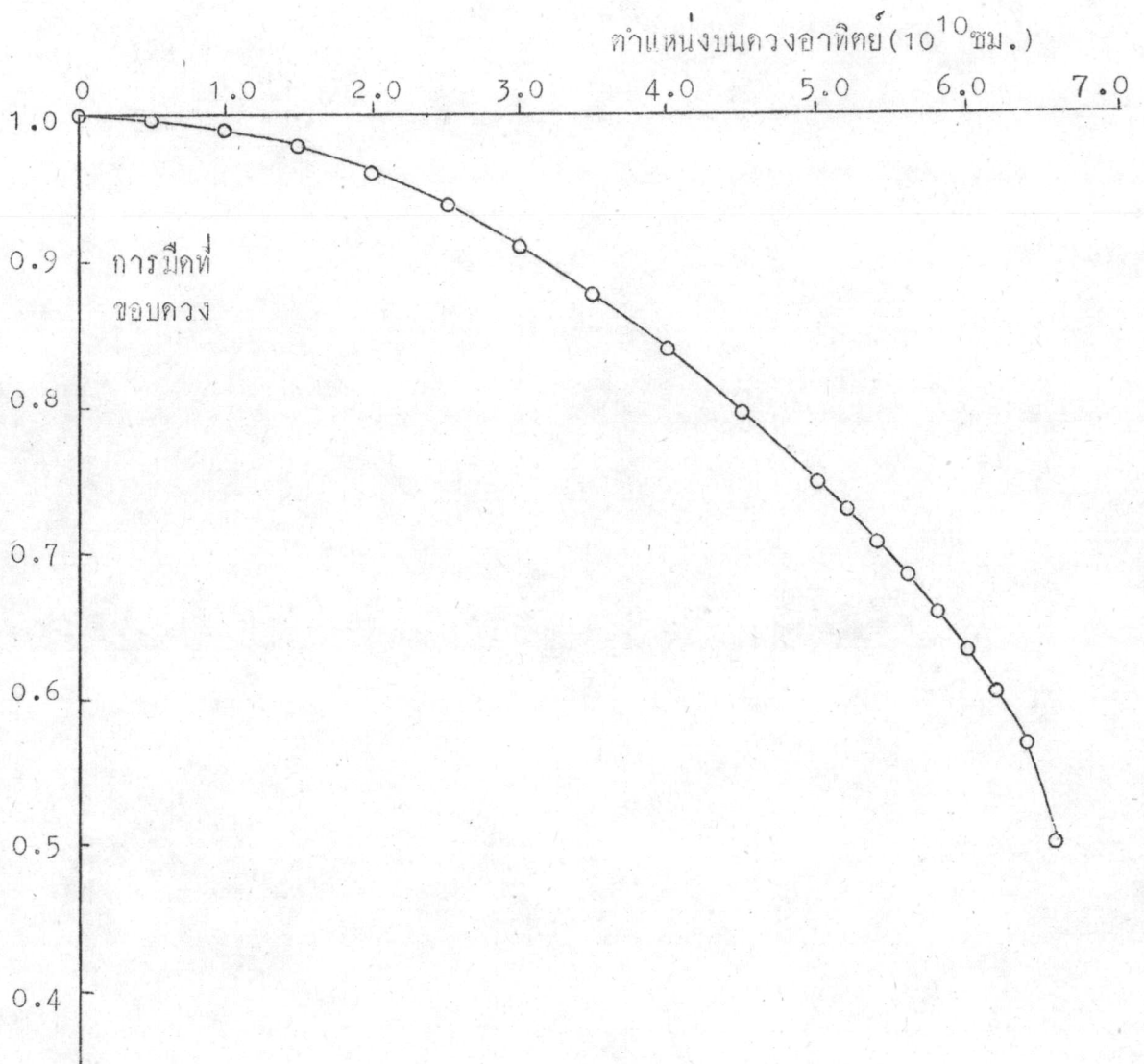
ในแต่ละความยาวคลื่น นำกลุ่มจุดเหล่านี้ไปปรับเส้นโค้งด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดย คาคะเนจากรูปกราฟว่าน่าจะเป็นสมการกำลังสอง แต่ก็ไม่สามารถหาสมการกำลังสอง ที่เหมาะสมมาแทนได้ จึงลองนำข้อมูลอ้างอิงมาทำแบบเดียวกันก็ไม่ได้สมการกำลังสอง ที่เหมาะสมเช่นกัน แม้จะเปลี่ยนเป็นสมการที่มีกำลังสูงกว่าสองก็ตาม จึงหันกลับมา ใช้วิธีปรับด้วยมือและไม่โค้ง โดยยึดหลักว่าความชันจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามระยะที่ห่าง ออกไปจากกลางดวง การปรับเส้นโค้งแบบนี้จะช่วยกำจัดค่าความชันที่เปลี่ยนอย่างกระทัน- หัน ซึ่งปรากฏในกราฟของเส้นการมีดที่ขอบดวงในหัวข้อ 4.3.1 ข้างต้น

4.4 เส้นการมีดที่ขอบดวง

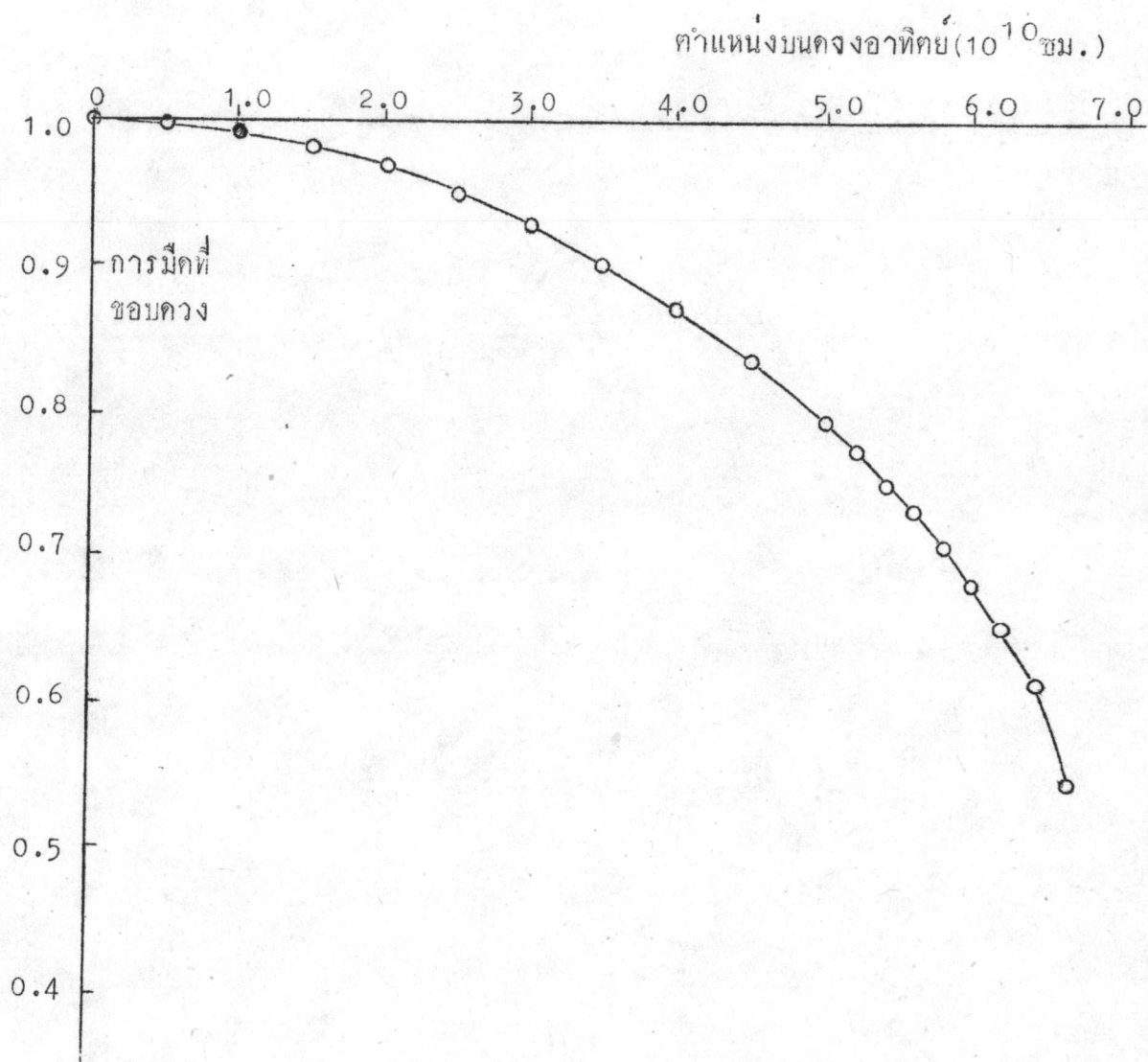
4.4.1 แปลงค่าจากกราฟ $\Delta \log \phi_{\lambda} / \Delta R \sin \theta - R \sin \theta$ ที่ปรับเส้น โค้งแล้วในหัวข้อ 4.3.2 ข้างต้นนั้นกลายเป็นค่า $\log \phi_{\lambda} - R \sin \theta$ นำค่าที่ได้มาเขียน กราฟ $\log \phi_{\lambda} - R \sin \theta$ รูปกราฟที่ได้จะต่างจากกราฟในหัวข้อ 4.3.1 มากพอสมควร

4.4.2 นำค่า $\log \phi_{\lambda} - R \sin \theta$ ในหัวข้อ 4.4.1 มาถอดลอการิ- ม์ของ $\log \phi_{\lambda}$ ออก เหลือเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ϕ_{λ} กับ $R \sin \theta$ เขียนกราฟ แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มจำเพาะสัมพันธ์กับตำแหน่งบนดวงอาทิตย์ ซึ่งก็คือเส้น การมีดที่ขอบดวงนั่นเอง กราฟที่ได้มีทั้งหมด 7 ภาพ 7 ความยาวคลื่น ดังแสดงใน ภาพที่ 5.12 ถึง 5.18 สำหรับตำแหน่งที่ $R \sin \theta$ มีค่ามากกว่า 0.63 เซนติเมตร (มากกว่า 0.9 เท่าของรัศมีของดวงอาทิตย์) ความเข้มสัมพันธ์จากงานนี้มีค่าไม่แน่นอน : อย่างมาก

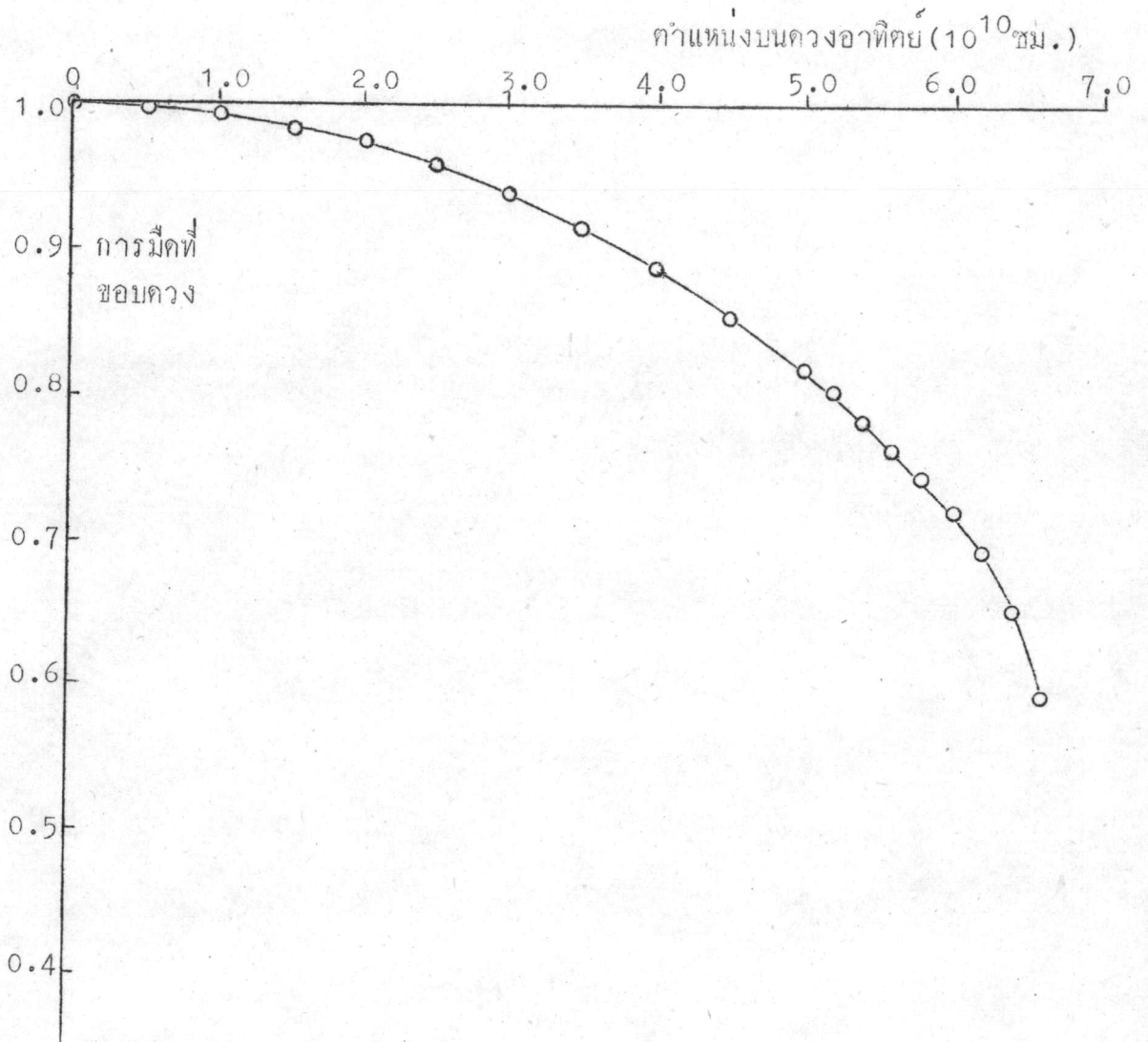
4.5 การเปรียบเทียบข้อมูล ข้อมูลอ้างอิง (Kuiper, 1965) ที่นำมา เปรียบเทียบมีความยาวคลื่นตรงกับเฉพาะที่ 5000 และ 5500 อังสตรอม ได้ภาพเปรียบเทียบดังแสดงในภาพที่ 5.16 และ 5.18 ตามลำดับ ข้อมูลอ้างอิงมีความเข้มสูงกว่า ข้อมูลที่ได้เล็กน้อย เว้นแต่ตอนปลายของเส้นความยาวคลื่น 5000 อังสตรอมซึ่งข้อมูล อ้างอิงมีความเข้มต่ำกว่า อย่างไรก็ตามความแตกต่างของข้อมูลที่มีค่ามากที่สุดบริเวณที่ θ มีค่า ระหว่าง 30 ถึง 50 องศา ($R \sin \theta = 0.35 - 0.55$ เซนติเมตร) มีค่าประมาณ ร้อยละ 4 และร้อยละ 2.5 สำหรับความยาวคลื่น 5000 และ 5500 อังสตรอมตามลำดับ



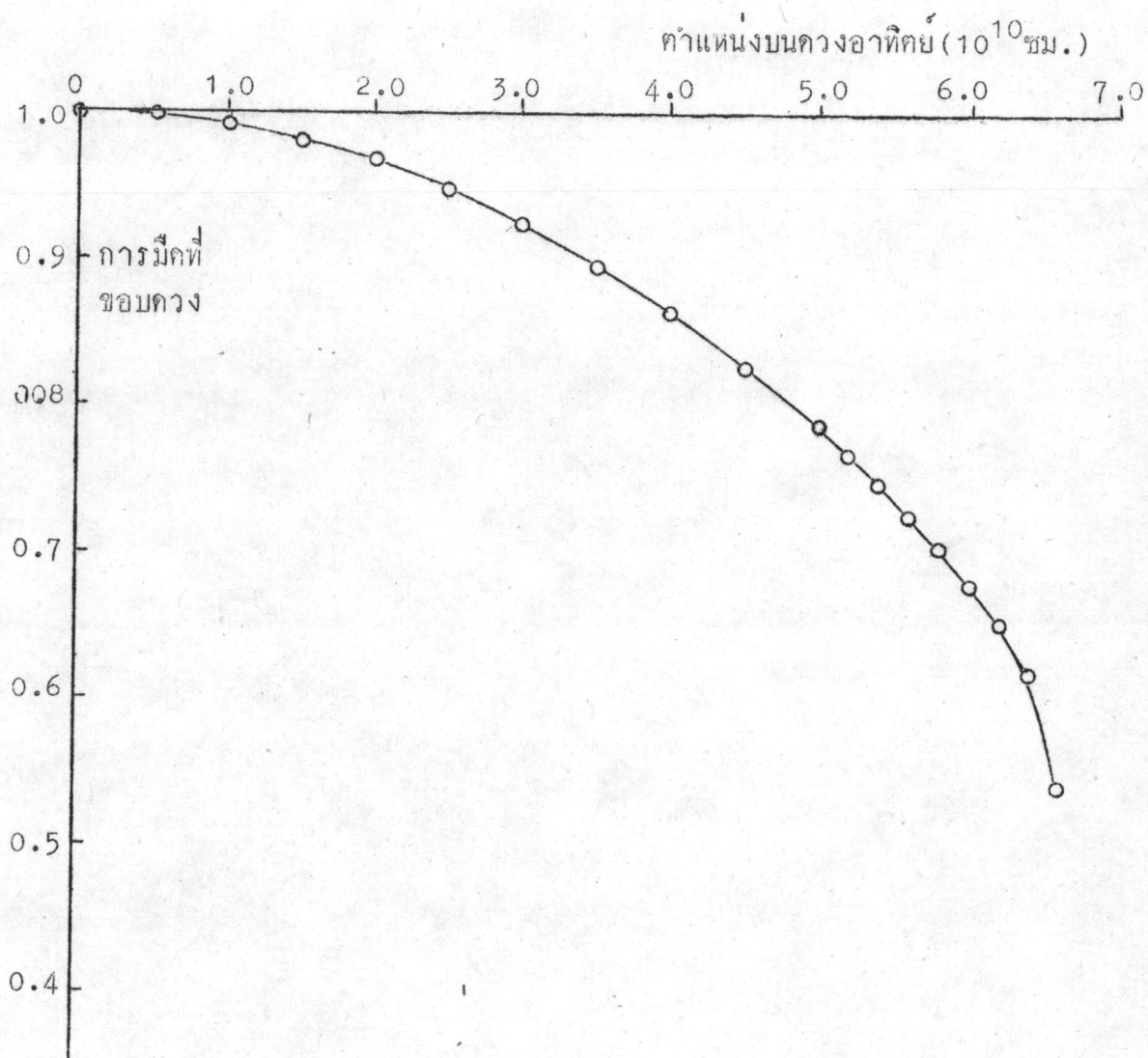
ภาพที่ 5.12 แสดงเส้นการมีคที่ขอบควงของควงอาทิตย์
ที่ความยาวคลื่น 4200 อังสตรอม



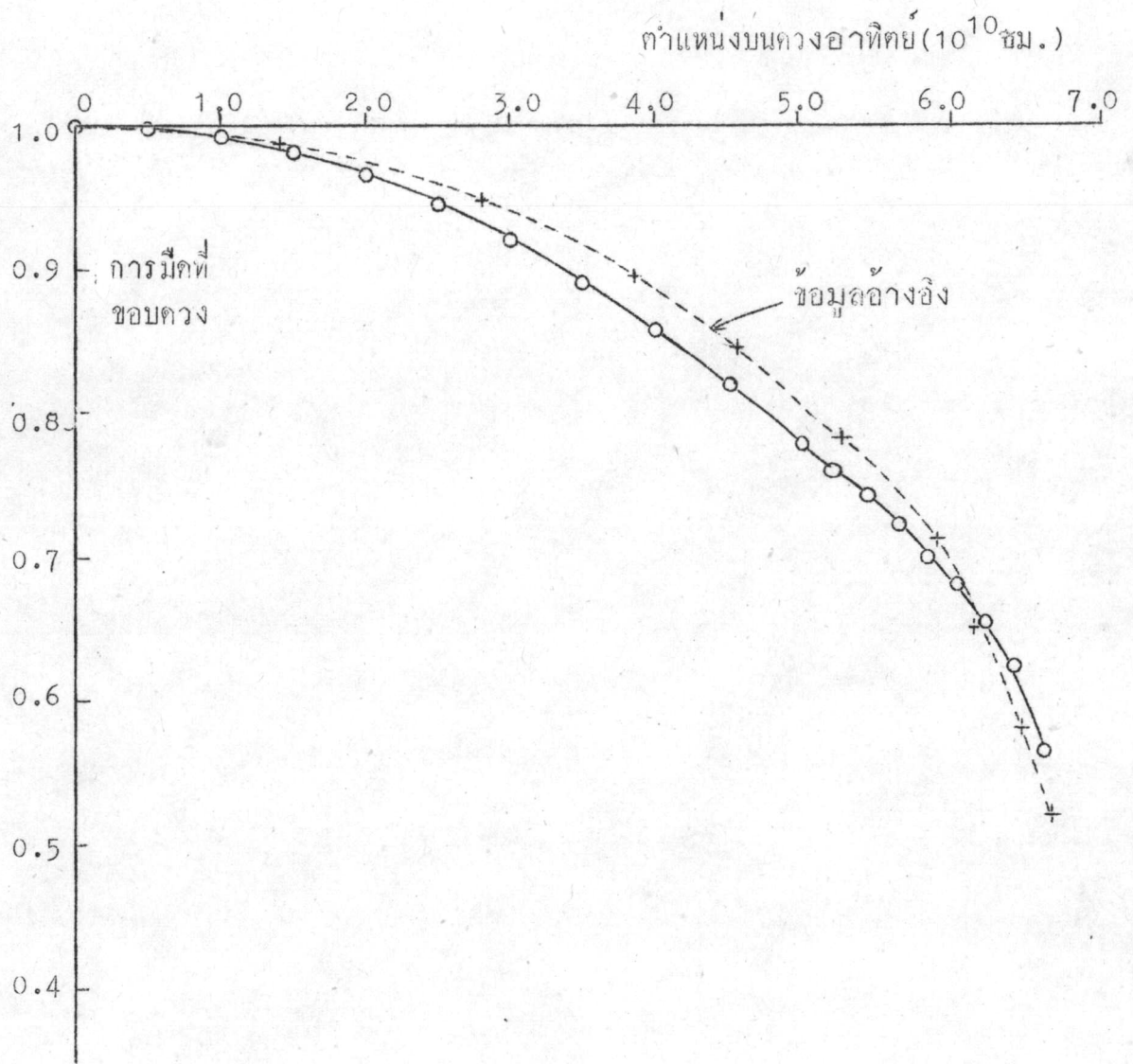
ภาพที่ 5.13 แสดงเส้นการมีกที่ขอบดวงของดวงอาทิตย์
ที่ความยาวคลื่น 4400 อังสตรอม



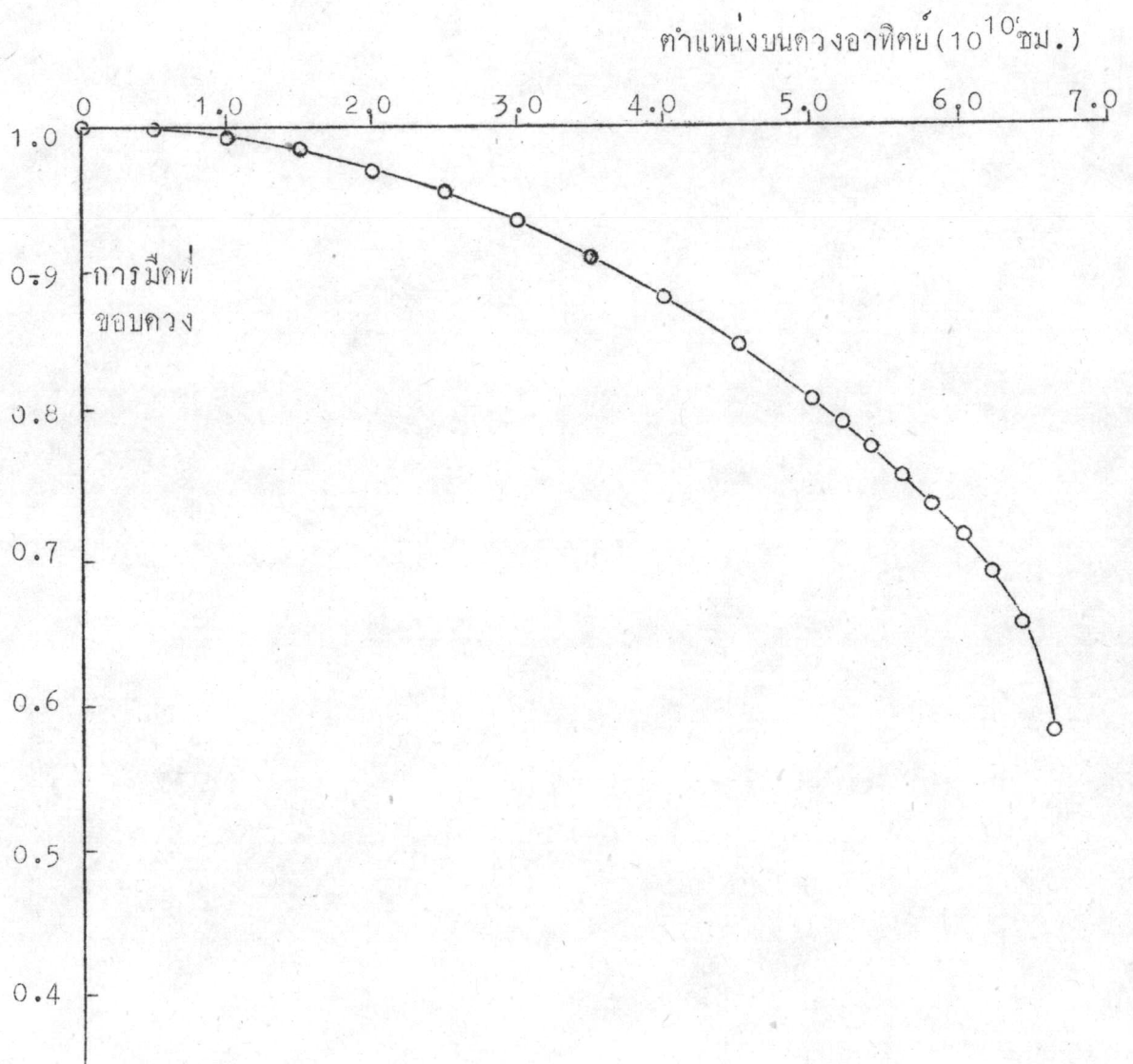
ภาพที่ 5.14 แสดงเส้นการมีคที่ขอบดวงของดวงอาทิตย์
ที่ความยาวคลื่น 4600 อังสตรอม



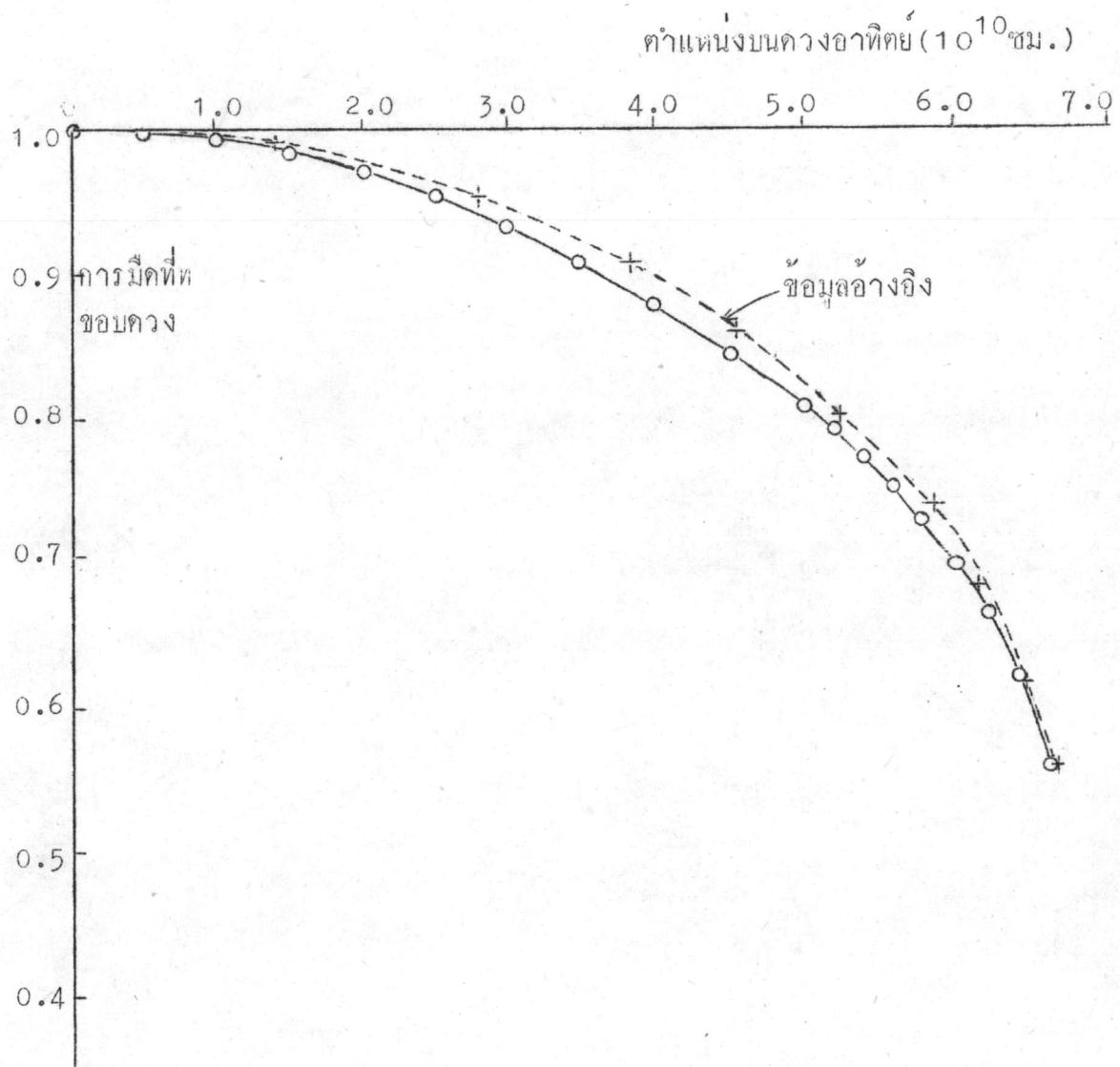
ภาพที่ 5.15 แสดงเส้นการมีคที่ขอบดวงของดวงอาทิตย์
ที่ความยาวคลื่น 4800 อังสตรอม



ภาพที่ 5.16 แสดงเส้นการมีคที่ขอบดวงของดวงอาทิตย์ที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงที่ความยาวคลื่น 5000 อังสตรอม



ภาพที่ 5.17 แสดงเส้นการมีคที่ขอบดวงของดวงอาทิตย์
ที่ความยาวคลื่น 5200 อังสตรอม



ภาพที่ 5.18 แสดงเส้นการมืดที่ขอบดวงของดวงอาทิตย์ที่ได้เปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงที่ความยาวคลื่น 5500 อังสตรอม