



การวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาว เนื่องจากบรรยากาศของโลก ณ หอดูดาวแห่งชาติ (TNO) Measurement of Atmospheric Extinction Coefficient at Thai National Observatory (TNO)

ดลฤดี สุขใจ¹, ถิรนนท์ สอนแก้ว¹, จันทรสว่าง พนมไพร¹, เสาวพร พงศ์ไพศรีริกุล¹, พรรณผกา สุโรพันธ์¹,
ปรวิทย์ ไทยใหม่¹, สมสวัสดิ์ รัตนสุรีย์² และ Ronald Macatangay²
Donrudee Sookjai¹, Thiranan Sonkeaw¹, Jansawang Panomprai¹, Sauwaporn Pongpraisirikul¹,
Phanphaka Surophan¹, Prorawit Thaimai¹, Somsawat Rattanasoon² and Ronald Macatangay²

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

² สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Lampang Rajabhat University

² National Astronomical Research Institute of Thailand (Public Organization)

Received : 29 September 2021

Revised : 3 January 2023

Accepted : 12 January 2023

บทคัดย่อ

แสงดาวที่ผ่านบรรยากาศของโลกจะเกิดการกระเจิงและการดูดกลืน ทำให้ความเข้มแสงและสีปรากฏของดาวที่ตรวจวัดได้เปลี่ยนแปลงจากค่าจริงขึ้นอยู่กับสภาพบรรยากาศในแต่ละสถานที่และมุมเงยของดาว หอดูดาวที่ติดตั้งต้องมีผลการลดของแสงดาวที่น้อย การวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลก ณ หอดูดาวแห่งชาติ (Thai National Observatory, TNO) ที่สูงจากระดับน้ำทะเล 2,457 เมตร ละติจูด 18.57 องศาเหนือ และลองจิจูด 98.48 องศาตะวันออก โดยเลือกศึกษาในช่วงที่ท้องฟ้าโปร่งเดือนพฤศจิกายนทำการถ่ายภาพดาวจากกล้องโทรทรรศน์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร ด้วยเทคนิคซีซีดี โฟโตเมตรี ประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์ IRIS ใช้แผ่นกรองแสงในช่วงความยาวคลื่น U B V R และ I พบว่าได้สัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 0.57 ± 0.023 0.33 ± 0.025 0.20 ± 0.013 0.12 ± 0.013 และ 0.11 ± 0.065 ในหน่วยของโชติมาตรปรากฏต่อมวลอากาศ ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ศึกษาจากหอดูดาวชั้นนำของประเทศอื่น ค่าดังกล่าวนี้เมื่อนำมาแยกเป็นแต่ละปัจจัยพบว่าผลจากการกระเจิงแบบเรย์ลีที่มีผลต่อสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวมีค่ามากในช่วงความยาวคลื่นสั้น ส่วนไอโซนมีผลเฉพาะช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นได้ และอนุภาคละอองลอยในอากาศมีผลต่อการกระเจิงในทุกช่วงความยาวคลื่น โดยได้ความสัมพันธ์ในรูปของสมการกึ่งทดลอง (semi-empirical) คือ $k_{\text{aer}}(\lambda, h) = 0.078\lambda^{-0.58}$ วิธีการหาความสัมพันธ์ของอนุภาคละอองลอยในอากาศด้วยวิธีนี้ สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในประมาณค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอยในช่วงเวลากลางคืนที่เครื่องมืออื่นไม่สามารถตรวจวัดได้ และสามารถนำไปใช้ประกอบการศึกษาทางดาราศาสตร์ต่อไป

คำสำคัญ : สัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลก ; โชติมาตรปรากฏ ; มวลอากาศ ; ละอองลอย ;

การกระเจิงแบบเรย์ลี



Abstract

The apparent intensity and color of starlight can be dwindled by the scattering and absorption of the earth's atmosphere. This is called atmospheric extinction, which depends on atmospheric conditions of the observing site and altitude of the targets. This research aims to study the extinction of starlight at the Thai National Observatory (TNO), with an elevation of 2,457 meters, latitude 18.57° N and longitude 98.48° E during a clear sky condition in November 2018. The atmospheric extinction coefficient was investigated using a reflecting telescope with a diameter of 2.4 meters, whose images were captured by a CCD camera through light filters and photometric analysis was carried out using the IRIS software package. The results showed that the atmospheric extinction coefficients were 0.57 ± 0.023 0.33 ± 0.025 0.20 ± 0.013 0.12 ± 0.013 and 0.11 ± 0.065 (magnitudes/airmass) through the wavelength filters of U, B, V, R and I, respectively. There are comparable to the atmospheric extinctions previously reported from observatories in other countries. The atmospheric extinction coefficients were also decomposed into ozone absorption, Rayleigh scattering and Mie scattering components. Ozone absorption affects primarily to the visible wavelength Rayleigh scattering dominates the ultraviolet bands but the extinction decreases rapidly as the wavelength increases. The relation of extinction due to Mie scattering from atmospheric aerosols as a function of wavelength was determined empirically and is given by $k_{\text{aer}}(\lambda, h) = 0.078\lambda^{-0.58}$. This method can be useful in determining aerosol optical properties on a routine basis especially during the nighttime when standard measurement techniques are not viable. The atmospheric extinction coefficient can be used as preliminary compensation data for the TNO.

Keywords : the Atmospheric Extinction Coefficients ; apparent magnitude ; airmass ; aerosols ; Rayleigh scattering



บทนำ

บรรยากาศเป็นส่วนหนึ่งที่ครอบคลุมพื้นผิวโลก ในแง่ของการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์ บรรยากาศเป็นอุปสรรคที่มีผลต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากวัตถุบนท้องฟ้า แสงจากวัตถุบนท้องฟ้าซึ่งประกอบด้วยแสงหลายความยาวคลื่นที่ผ่านบรรยากาศโลกเข้ามาจะถูกดูดกลืนและกระเจิงจากอนุภาคต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศ ทำให้ความเข้มแสงหรือโชติมาตรปรากฏ (apparent magnitude, $m(\lambda)$) ลดลงแต่ละความยาวคลื่นไม่เท่ากัน ในทางดาราศาสตร์การวัดโชติมาตรปรากฏจะใช้เครื่องมือวัดแต่ละย่านความยาวคลื่นโดยการใส่แผ่นกรองแสงชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น ย่านสีน้ำเงิน (B) อินฟราเรด (R) และอัลตราไวโอเล็ต (U) เป็นต้น ค่าโชติมาตรที่วัดได้จากเครื่องมือหากแก้ไขผลจากชั้นบรรยากาศของโลก และผลจากเครื่องมือวัด จะทำให้สามารถวิเคราะห์สมบัติหลายประการของวัตถุบนท้องฟ้า รวมถึงการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบการถ่ายภาพของหอดูดาวได้ต่อไป

หอดูดาวแห่งชาติเป็นหอดูดาวเพียงไม่กี่แห่งในโลกที่ตั้งอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ที่สูงจากเหนือระดับน้ำทะเล 2,457 เมตร ละติจูด 18.57 องศาเหนือ และลองจิจูด 98.48 องศาตะวันออก ทำให้สามารถศึกษาข้อมูลทางดาราศาสตร์ได้แตกต่างจากบริเวณอื่นของโลก มีการติดตั้งกล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เมตร พร้อมระบบอัตโนมัติที่มีขนาดใหญ่และทันสมัยที่สุดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในปัจจุบันหอดูดาวแห่งชาติยังไม่มีการศึกษาสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลก (Atmospheric Extinction Coefficients) มีข้อมูลเพียงเล็กน้อยจากการศึกษาสัมประสิทธิ์การลดของแสงโดยรวมด้วยเครื่องมือถ่ายภาพ UltraSpec โดย Dhillon *et al.*, 2014 ในย่านคลื่น R และ G แต่ไม่ได้มีรายละเอียดอื่นมากนัก

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกมีหลายวิธีด้วยกัน ซึ่งล้วนอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต-บูแกร์ (Beer – Bouguer – Lambert's law) ที่พิจารณาคุณสมบัติการดูดกลืนและกระเจิงของรังสีตามความยาวคลื่นที่ผ่านตัวกลางในธรรมชาติต่างกัน ดังเช่นแสดงในงานวิจัยของ Laken *et al.*, 2016; Hale *et al.*, 2017; Sanchez-Bajo & Alvarez, 2012 เป็นต้น สำหรับเทคนิคและวิธีการศึกษาในงานวิจัยนี้จะเป็นไปแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Hu, 2011 เป็นหลัก โดยใช้เครื่องมือโฟโตมิเตอร์ (Photometer) เป็นเครื่องมือวัดความเข้มหรือสภาพส่องสว่างพร้อมแผ่นกรองแสงของระบบ จอห์นสัน-คัสซิง (Johnson – Cousins) ที่สามารถศึกษาแสงจากดาวด้วยการวัดแต่ละย่านความยาวคลื่นจากแผ่นกรองแสงชนิด U B V R และ I การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกตามทฤษฎีของบูแกร์ (Bouguer) เป็นการศึกษาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของความสัมพันธ์ระหว่างโชติมาตรปรากฏของดาวที่วัดได้กับมวลอากาศ (airmass) ในมุมเงยต่าง ๆ ดังสมการที่ 1 โดยมวลอากาศที่มุมเงยของดาวที่จุดจอมฟ้า (Zenith, Z) มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1 และมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงขอบฟ้า

$$m(\lambda)_{\text{ins}} = m(\lambda)_{\text{obs}} + k'_{m(\lambda)} M(Z) + k''_{m(\lambda)} CM(Z) \quad (1)$$



เมื่อ $m(\lambda)_{ins}$ คือโชติมาตรปรากฏของดาวที่วัดโดยเครื่องมือ (Instrumental Magnitude) มีผลเนื่องบรรยากาศโลก, $m(\lambda)_{obs}$ คือโชติมาตรปรากฏของดาวที่วัดโดยเครื่องมือไม่มีผลเนื่องบรรยากาศโลก, $k'_m(\lambda)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่หนึ่ง ในหน่วยของโชติมาตรปรากฏต่อมวลอากาศ, $k''_m(\lambda)$ คือค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่สอง ในหน่วยของโชติมาตรปรากฏต่อมวลอากาศต่อดัชนีสี, C คือดัชนีสี (Color index) และ $M(z)$ คือ มวลอากาศ (airmass) สำหรับมวลอากาศหาได้จากแบบจำลองของบูแกร์ที่เป็นทรงกลม มวลอากาศจึงสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2 (Hu, 2011; Zhang *et al.*, 2013)

$$M(Z) = \sec Z - 0.0018167(\sec Z - 1) - 0.002875(\sec Z - 1)^2 - 0.0008083(\sec Z - 1)^3 \quad (2)$$

สมการนี้ขึ้นกับ $\sec Z$ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3 เมื่อ ϕ คือละติจูดของหอดูดาว δ คือเดคลิเนชันของดาว และ H คือมุมซันของดาวในหน่วยองศา (Chakraborty, 2005)

$$\sec Z = (\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos H)^{-1} \quad (3)$$

สัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกเกิดจาก 3 ปัจจัย ได้แก่ 1. การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอย (Aerosol scattering, aer) 2. การกระเจิงแบบเรย์ลีห์จากโมเลกุลของก๊าซ (Rayleigh scattering by molecules, ray) และ 3. การดูดกลืนโดยโมเลกุลจากโอโซน (Absorption by ozone, oz) การกระเจิงเนื่องจากอนุภาคละอองลอยและการกระเจิงแบบเรย์ลีห์ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของรังสีที่ตกกระทบชั้นบรรยากาศและความสูงจากระดับน้ำทะเล (h) ของหอดูดาว แต่การดูดกลืนโดยโมเลกุลของโอโซนที่กระจายอยู่ในชั้นสตราโตสเฟียร์ส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นเท่านั้น เนื่องจากความสูงจากระดับน้ำทะเลของหอดูดาวไม่ได้สูงถึงระดับชั้นดังกล่าว ทำให้ไม่มีผลต่อการลดลงของแสง (Stalin *et al.*, 2008) ในการเก็บข้อมูลใช้แผ่นกรองแสงที่ตรงกับการดูดกลืนรังสีช่วงคลื่นฮักกินส์ (Huggins) ที่อยู่ในย่านอัลตราไวโอเล็ต และชัปปุยส์ (Chappuis) ที่อยู่ในย่านแสง (Gorshlev *et al.*, 2014) ส่วนการดูดกลืนโดยโมเลกุลของไอน้ำที่มีการผันแปรค่อนข้างมากนั้น ไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากไอน้ำมีอิทธิพลต่อการดูดกลืนเฉพาะในช่วงคลื่นอินฟราเรดซึ่งอยู่นอกย่านการวัด

การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอยในบรรยากาศจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของอนุภาคละอองลอยในช่วงนั้น ซึ่งแตกต่างกันตามฤดูกาล อันเป็นผลมาจากทั้งการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติ และการกระทำของมนุษย์เช่น การเผาป่าที่ทำให้อนุภาคละอองลอยในอากาศเพิ่มขึ้น เป็นต้น สัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอยในรูปของสมการทั่วไปตามทฤษฎี คือ $K_{aer}(\lambda, h) = A_0 \lambda^{-\alpha} e^{(-h/H)}$ (Stalin *et al.*, 2008) จึงไม่สามารถใช้บอกค่าได้แม่นยำมากนักเนื่องจากสาเหตุดังกล่าว ดังนั้นการพิจารณาอนุภาคละอองลอยจากข้อมูลที่วัดได้จริงจะมีความแม่นยำมากกว่า ซึ่งผลที่ได้จากการวัดจริงนี้สามารถสร้างสมการกึ่งทดลองโดยมีลักษณะเป็นการลดลงแบบเลขชี้กำลัง (Exponential decay)



$$k_{aer}(\lambda, h) = \beta \lambda^{-\alpha} \tag{4}$$

เมื่อ β และ α คือค่าคงที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นความสัมพันธ์ของลอการิทึมที่ความยาวคลื่นใด ๆ กับ ลอการิทึมของค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอย ($k_{aer}(\lambda, h)$) ในชั้นบรรยากาศที่ระดับความสูงเหนือน้ำทะเล (h) ของหอดูดาวที่วัดได้ และ β เป็นฟังก์ชันของความสูงตามรูปแบบสมการทั่วไปของสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากละอองลอย

วิธีดำเนินการวิจัย

นักวิจัยได้ถ่ายภาพดาวด้วยเครื่องซีซีดีโฟโตมิเตอร์ (CCD Photometer) รุ่น ARC 4K ความละเอียด 4096 x 4096 พิกเซล ขนาดภาพ 9.0' x 9.0' ที่ติดตั้งกับกล้องโทรทรรศน์สะท้อนแสง 2.4 เมตร และบันทึกภาพผ่านตัวกรองแสง U B V R และ I มีความยาวคลื่นเท่ากับ 365 440 550 700 และ 880 นาโนเมตร ตามลำดับ ณ หอดูดาวแห่งชาติ ประมวลผลภาพถ่ายดาวฤกษ์ด้วยซอฟต์แวร์ IRIS ดังแสดงในภาพที่ 1

การวิจัยนี้ได้ศึกษาสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกอันดับที่หนึ่งและสอง สมการแปลงค่าโชติมาตรปรากฏที่วัดได้จากเครื่องมือเป็นค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริงของดาว ($m(\lambda)_{std}$) และสมการสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอย โดยมีลำดับผลการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

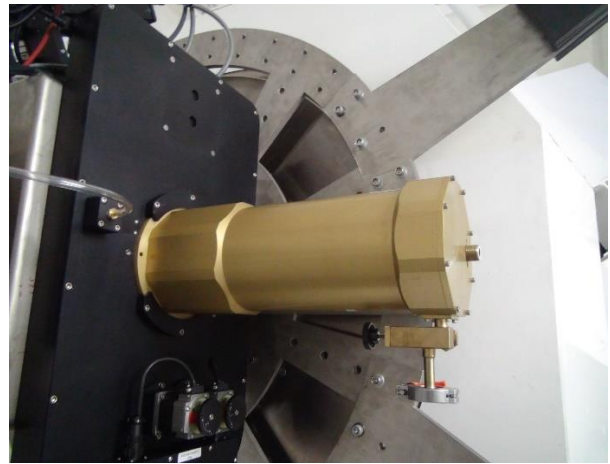
ค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกอันดับที่หนึ่งและสอง

งานวิจัยนี้เลือกถ่ายภาพมาตรฐานในกลุ่ม GD_71 (Giclas *et al.*, 1971) จำนวน 4 ดวง โดยใช้ข้อมูลตำแหน่งและโชติมาตรปรากฏ ($m(\lambda)_{std}$) จาก Landolt Standard (Landolt, 1992) เป็นข้อมูลไว้สำหรับวิเคราะห์และตรวจสอบผลที่ได้จากการศึกษาดังตารางที่ 1 ทำการถ่ายภาพดาวเริ่มที่ระดับมุมเงยมากกว่า 30 องศา ผ่านแผ่นกรองแสง U B V R และ I สลับกันตามลำดับเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 04.00-06.00 น. ได้จำนวนภาพถ่ายของแต่ละแผ่นกรองแสงเฉลี่ยดวงละ 60 ภาพรวมเป็น 240 ภาพต่อแผ่นกรองแสง เก็บข้อมูลเป็นเวลาหลายวันแต่เลือกวันที่ท้องฟ้าโปร่งและสภาพอากาศดีที่สุดคือในวันที่ 23 พฤศจิกายน 2561 มีค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 80%

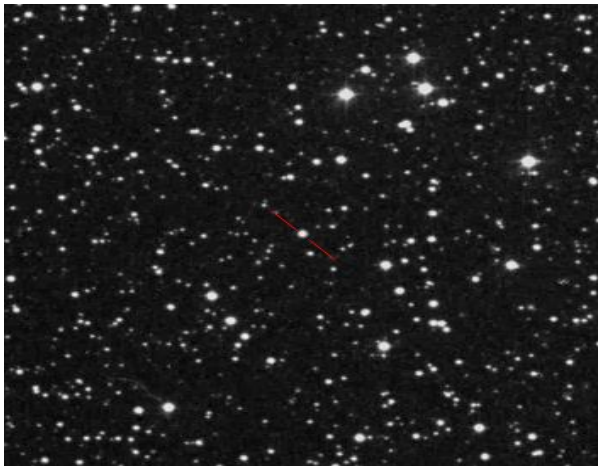
วิเคราะห์มวลอากาศและโชติมาตรปรากฏของดาวทุกดวงในแต่ละแผ่นกรองแสงด้วยโปรแกรม IRIS โดยมีมวลอากาศมีวิธีการหาจากการเปลี่ยนวันจูเลียนเป็นมุมชั่วโมงของดาว (H) แล้วใช้ค่านี้นำแทนในสมการที่ 3 และ 2 ตามลำดับ นำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่หนึ่ง ($k'_m(\lambda)$) ของแต่ละแผ่นกรองแสงด้วยสมการที่ 1 จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $M(Z)$ กับ $m(\lambda)_{ins} - m(\lambda)_{std}$ เมื่อ $m(\lambda)_{std}$ คือโชติมาตรปรากฏของดาวมาตรฐาน 4 ดวง ข้อมูลจาก Landolt Standard



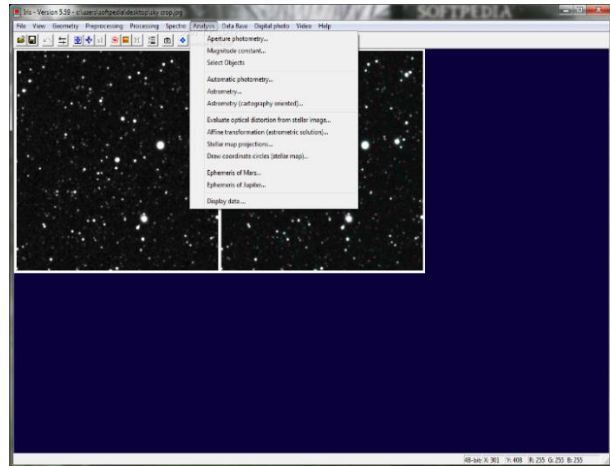
The 2.4-meter telescope (TNO)



The ARC 4K Photometer camera



The field of the GD_71 standard star



IRIS Software to estimate apparent magnitude

Figure 1 Equipments and software used for observations and data processing.

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่สอง ($k''_m(\lambda)$) ที่เป็นผลจากความแตกต่างระหว่างสีของดาว (คุณนหภูมิของดาว) แต่ละดวงที่วัดจากแผ่นกรองแสง สามารถวิเคราะห์ค่านี้ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $[(M(Z)_1 * (B-V)_{star1}) - (M(Z)_2 * (B-V)_{star2})]_{ins}$ กับ $(m(\lambda)_{star1} - m(\lambda)_{star2})_{ins}$ ตามรูปแบบสมการถดถอยที่ 5 (Buchheim, 2005)

$$(m(\lambda)_{star1} - m(\lambda)_{star2})_{ins} = k''_m(\lambda) [(M(Z)_1 * (B-V)_{star1}) - (M(Z)_2 * (B-V)_{star2})]_{ins} + (m(\lambda)_{star1} - m(\lambda)_{star2})_{obs} \quad (5)$$



สำหรับคู่ดาวต้องเลือกดาวที่มีอุณหภูมิต่างกันกำหนดให้เป็นดาวดวงที่ 1 (star1) และดาวดวงที่ 2 (star2) ในการวิจัยนี้ใช้ดาวจำนวน 3 คู่ ดังนี้ 1.GD71และGD71A 2.GD71และGD71B 3.GD71และGD71C ซึ่งดาว GD_71 เป็นดาวแคระขาว (White dwarf) ที่มีอุณหภูมิสูงกว่าดาว GD_71A, GD_71B และ GD_71D

Table 1 Landolt U B V R I photometric standards of GD_71

Name	Position		Magnitude		Color Index				
	RA (h m s)	DEC (° ' ")	V	B - V	U - B	V - R	R - I	V - I	
GD 71	05 52 27.619	+15 53 13.23	13.033	-0.248	-1.110	-0.138	-0.166	-0.304	
GD 71A	05 52 33.562	+15 51 59.38	12.643	+1.176	+0.897	+0.651	+0.621	+1.265	
GD 71B	05 52 21.530	+15 52 41.61	12.599	+0.680	+0.166	+0.404	+0.399	+0.800	
GD 71D	05 52 24.788	+15 54 58.01	12.898	+0.570	+0.097	+0.359	+0.363	+0.719	

สมการแปลงค่าโชติมาตรปรากฏที่วัดได้จากเครื่องมือเป็นค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริงของดาว

โชติมาตรปรากฏของดาวที่วัดโดยเครื่องมือถึงแม้จะลบออกจากค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกดังสมการที่ 6 ยังคงไม่ใช่ค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริงของดาว เนื่องด้วยค่า $m(\lambda)_{obs}$ ต้องคิดรวมผลที่ทำให้แสงดาวลดลงจากขนาดและคุณภาพของกล้องโทรทรรศน์ ชนิดของแผ่นกรองแสง และเครื่องมือถ่ายภาพ เป็นต้น ดังนั้นค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริงของดาว ($m(\lambda)_{std}$) จากระบบการถ่ายภาพจะได้ดังสมการที่ 7

$$m(\lambda)_{obs} = m(\lambda)_{ins} - k'_{m(\lambda)}M(Z) - k''_{m(\lambda)}CM(Z) \tag{6}$$

โชติมาตรปรากฏ ($m(\lambda)_{obs}$) ในงานวิจัยนี้ไม่คิดพจน์ $k''_{m(\lambda)}$ เนื่องจากมีค่าน้อยมากดังแสดงในตารางที่ 4 จึงสามารถตัดค่านี้ออกได้ เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hu Bo ที่ไม่คิดผลนี้เช่นกัน ดังนั้นจึงคิดเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่หนึ่ง ($k'_m M(Z)$) เท่านั้น

$$m(\lambda)_{std} = m(\lambda)_{obs} + \epsilon C_{std} + \xi_{m(\lambda)_{std}} \tag{7}$$



ดังนั้นค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริงของดาว ($m(\lambda)_{std}$) จากระบบถ่ายภาพ สามารถวิเคราะห์ได้จากรูปแบบสมการถดถอยที่ 7 สมการนี้หาได้โดยใช้ข้อมูลดาวตรวจสอบจาก Landolt Standard แทนค่าดัชนีสี (C_{std}) และ $m(\lambda)_{std}$ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสี (C_{std}) กับผลต่างของ $m(\lambda)_{std} - m(\lambda)_{obs}$ สมการถดถอยที่ได้ ϵ คือสัมประสิทธิ์การแปลง (Transformation Coefficients) และ $\xi_{m(\lambda)_{std}}$ คือค่าคงที่ของจุดศูนย์ (Zero – point Constants) หรือจุดตัดแกนตั้ง

สำหรับดัชนีสีที่แท้จริง (C_{std}) จากระบบถ่ายภาพที่ใช้แทนค่าในสมการแปลงค่าที่ได้นั้น สามารถวิเคราะห์ได้จากรูปแบบสมการถดถอยที่ 8 โดยสมการนี้หาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ดัชนีสีจากเครื่องมือวัดที่ได้แก่ผลเนื่องจากชั้นบรรยากาศของโลก (C_{obs}) กับดัชนีสี (C_{std}) ของดาวตรวจสอบจาก Landolt Standard เช่นกัน

$$C_{std} = \mu C_{obs} + \xi_{C_{std}} \quad (8)$$

เมื่อ μ คือสัมประสิทธิ์การแปลง (Transformation Coefficients) และ $\xi_{C_{std}}$ คือค่าคงที่ของจุดศูนย์ (Zero – point Constants)

สมการสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละของลอย

ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละของลอย ($k_{aer}(\lambda, h)$) ไม่สามารถวิเคราะห์ผลได้แม่นยำมากนักจากสมการตามทฤษฎีดังกล่าวข้างต้น แต่สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบเรย์ลีห์จากโมเลกุลของก๊าซ ($k_{ray}(\lambda, h)$) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโมเลกุลจากโอโซน ($k_{oz}(\lambda)$) ทั้งสองนี้มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงตามสมการที่ 11 และ 12 (Stalin *et al.*, 2008) ดังนั้นสำหรับค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละของลอย จึงต้องหาค่าใหม่ได้จากสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกอันดับที่หนึ่งจากเครื่องมือวัด ($k'_{m(\lambda)_{ins}}$) (ผลที่ได้จากสมการที่ 1) นำมาลบกับค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบเรย์ลีห์จากโมเลกุลของก๊าซ และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโมเลกุลจากโอโซนดังสมการที่ 9

$$k_{aer}(\lambda, h) = k'_{m(\lambda)_{ins}} - k_{ray}(\lambda, h) - k_{oz}(\lambda) \quad (9)$$

ตามทฤษฎีแล้วค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละของลอย ($k_{aer}(\lambda, h)$) อยู่ในสมการรูปทั่วไปคือ

$$k_{aer}(\lambda, h) = A_0 \lambda^{-\alpha} e^{(-h/H)} \quad (10)$$



เมื่อค่าคงที่ $H = 1.5$ กิโลเมตร $A_0 = 0.087$ และ $\alpha = 0.8$ และ λ คือความยาวคลื่นในหน่วยไมโครเมตร และ h คือความสูงของหอดูดาวเหนือระดับน้ำทะเลในหน่วยกิโลเมตร (Stalin *et al.*, 2008) ดังนั้นหอดูดาวแห่งชาติมีค่า h เท่ากับ 2.457 กิโลเมตร เมื่อแทนค่าตัวแปรดังกล่าวในสมการที่ 10 ทำให้ได้สมการนี้คือ $K_{aer}(\lambda, h) = 0.0169\lambda^{-0.8}$

ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบเรย์ลีห์จากโมเลกุลของก๊าซ ($k_{ray}(\lambda, h)$) และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโมเลกุลจากโอโซน ($k_{oz}(\lambda)$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11 และ 12 ตามลำดับ

$$k_{ray}(\lambda, h) = 9.4977 \times 10^{-3} \left(\frac{1}{\lambda} \right)^4 C_{ray}^2 \times e^{(-h/7.996)} \quad (11)$$

โดยที่

$$C_{ray} = 0.23465 + \left[\frac{1.076 \times 10^2}{146 - (1/\lambda)^2} \right] + \left[\frac{0.93161}{41 - (1/\lambda)^2} \right]$$

เมื่อ λ คือความยาวคลื่นในหน่วยไมโครเมตร, h คือความสูงเหนือระดับน้ำทะเลในหน่วยกิโลเมตร และ C_{ray} คือค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น

$$k_{oz}(\lambda) = 0.27775 C_{Oz}(\lambda) \quad (12)$$

โดยที่

$$C_{Oz}(\lambda) = 3025e^{-131(\lambda-0.26)} + 0.1375e^{-188(\lambda-0.59)^2}$$

ดังนั้นสามารถสร้างสมการสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอยให้เป็นสมการลดลงแบบเลขชี้กำลัง ดังสมการที่ 4 ด้วยการวิเคราะห์กราฟล็อก-ล็อก (Log-Log graph) ของลอการิทึมความยาวคลื่น กับค่าลอการิทึมค่า $K_{aer}(\lambda, h)$ ที่ได้จากสมการที่ 9 ของแต่ละแผ่นกรองแสง U B V R และ I

ผลการวิจัย

สัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกอันดับที่หนึ่ง

สัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกอันดับที่หนึ่ง ($k'_m(\lambda)$) ของแผ่นกรองแสง U B V R และ I ที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $M(Z)$ กับ $m(\lambda)_{ins} - m(\lambda)_{std}$ แสดงดังภาพที่ 2

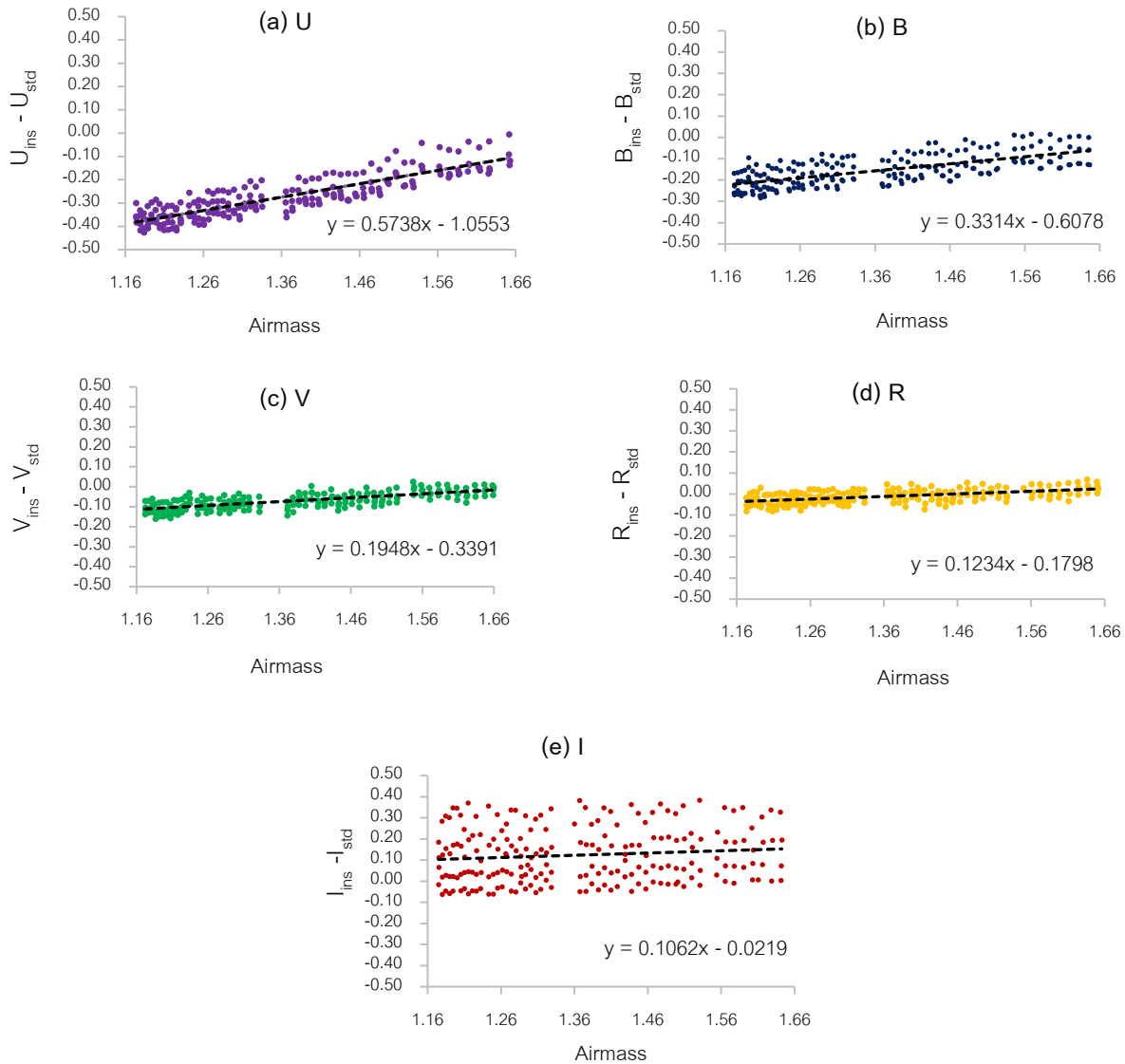


Figure 2 (a-e) The fits of the first-order extinction coefficients of (a) U, (b) B, (c) V, (d) R and (e) I obtained from the linear relationships of $M(Z)$ and $m(\lambda)_{ins} - m(\lambda)_{std}$.

จากผลการทดลองที่ได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่หนึ่งของแผ่นกรองแสง U B V R และ I เท่ากับ 0.57 ± 0.023 0.33 ± 0.025 0.20 ± 0.013 0.12 ± 0.013 และ 0.11 ± 0.065 ตามลำดับ มีค่าแปรผกผันกับความยาวคลื่นของแผ่นกรองที่ใช้ หรือลดลงตามความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ค่านี้จะถูกนำไปใช้สำหรับแก้ผลของแสงเนื่องจากบรรยากาศของโลก ณ หอดูดาวแห่งชาติ และใช้สร้างสมการเพื่อหาสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอยเนื่องจากบรรยากาศของโลกต่อไป

สัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่สอง

สัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่สอง ($k''_m(\lambda)$) ของแผ่นกรองแสง U B V R และ I จากการสร้างกราฟของความสัมพันธ์ของ $[(M(Z)_1 * (B-V)_{star1}) - (M(Z)_2 * (B-V)_{star2})]_{ins}$ และ $(m(\lambda)_{star1} - m(\lambda)_{star2})_{ins}$ แสดงตัวอย่างระหว่างดาว GD71 และ GD71A ดังภาพที่ 3 และแสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกอันดับที่สองทั้ง 3 คู่ คือ GD71-GD71A GD71-GD71B และ GD71-GD71C ในตารางที่ 2

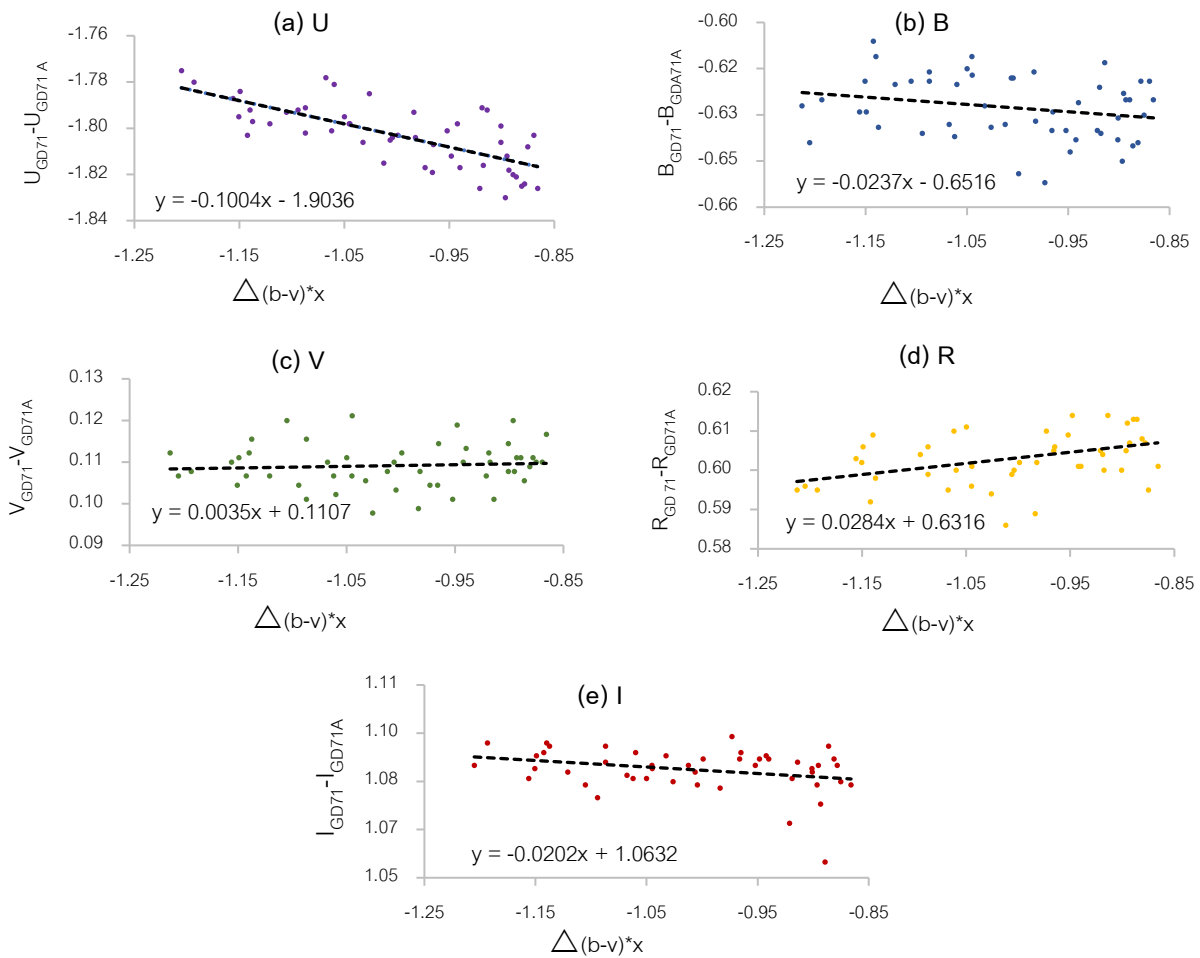


Figure 3 (a-e) An example of the linear fits for the second-order extinction coefficients of (a) U, (b) B, (c) V, (d) R and (e) I, using the star-pair GD71 and GD71A.



จากข้อมูลที่ได้พบว่าแผ่นกรองแสงชนิด U ให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่สองเฉลี่ยมากที่สุด และแผ่นกรองแสง V ให้ค่าน้อยที่สุด ทั้งนี้ในภาพรวมมีค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่สองของทุกชนิดแผ่นกรองแสงในค่าที่น้อย

Table 2 The second-order extinction coefficient ($k_m''(\lambda)$) for each filter

The second-order extinction coefficients	Filters				
	U	B	V	R	I
K'' (GD71-GD71A)	-0.1004	-0.0237	0.0035	0.0284	-0.0202
K'' (GD71-GD71B)	-0.0643	-0.0712	0.0109	0.0042	0.0151
K'' (GD71-GD71D)	-0.1285	-0.0650	-0.0113	-0.0036	-0.0189
K'' (Average)	-0.0977	-0.0533	0.0010	0.0097	-0.0080

สมการแปลงค่าโชติมาตรปรากฏที่วัดได้จากเครื่องมือเป็นค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริงของดาว

สมการแปลงค่าโชติมาตรปรากฏที่วัดได้จากเครื่องมือเป็นค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริงของดาวในแต่ละแผ่นกรองแสง U_{std} , B_{std} , V_{std} , R_{std} และ I_{std} จากระบบการถ่ายภาพ ณ หอดูดาวแห่งชาติ หาดสมการได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์นี้คือ (C_{std}) จากโชติมาตรปรากฏจากค่ามาตรฐาน คือ $(U-B)_{std}$, $(B-V)_{std}$, $(B-V)_{std}$, $(V-R)_{std}$ และ $(R-I)_{std}$ กับดัชนีสีที่ได้จากโชติมาตรปรากฏจากค่ามาตรฐานลบกับค่าเฉลี่ยโชติมาตรปรากฏที่วัดได้จากเครื่องมือที่มีการแก้ไขผลเนื่องจากบรรยากาศของโลก คือ $(U_{std}-U_{obs})$, $(B_{std}-B_{obs})$, $(V_{std}-V_{obs})$, $(R_{std}-R_{obs})$ และ $(I_{std}-I_{obs})$ แสดงผลดังภาพที่ 4 และสมการการแปลงค่าโชติมาตรปรากฏที่วัดได้จากเครื่องมือ U_{obs} , B_{obs} , V_{obs} , R_{obs} และ I_{obs} เป็นค่าโชติมาตรที่แท้จริง U_{std} , B_{std} , V_{std} , R_{std} และ I_{std} สรุปได้ดังสมการที่ 13 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การแปลง (\mathcal{E}) และค่าคงที่ของจุดศูนย์ (ξ) ตามสมการแสดงค่าในตารางที่ 4

โดยที่ค่าดัชนีสี $(U-B)_{std}$, $(B-V)_{std}$, $(V-R)_{std}$ และ $(R-I)_{std}$ ในสมการที่ 13 นี้พิจารณาได้จากสมการที่ 14

$$\left. \begin{aligned}
 U_{std} &= U_{obs} + (0.040 \pm 0.026) (U - B)_{std} + 1.590 \pm 0.019 \\
 B_{std} &= B_{obs} + (0.082 \pm 0.028) (B - V)_{std} + 0.881 \pm 0.020 \\
 V_{std} &= V_{obs} - (0.044 \pm 0.007) (B - V)_{std} + 0.556 \pm 0.005 \\
 R_{std} &= R_{obs} - (0.074 \pm 0.020) (V - R)_{std} + 0.318 \pm 0.009 \\
 I_{std} &= I_{obs} - (0.389 \pm 0.151) (R - I)_{std} + 0.240 \pm 0.063
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

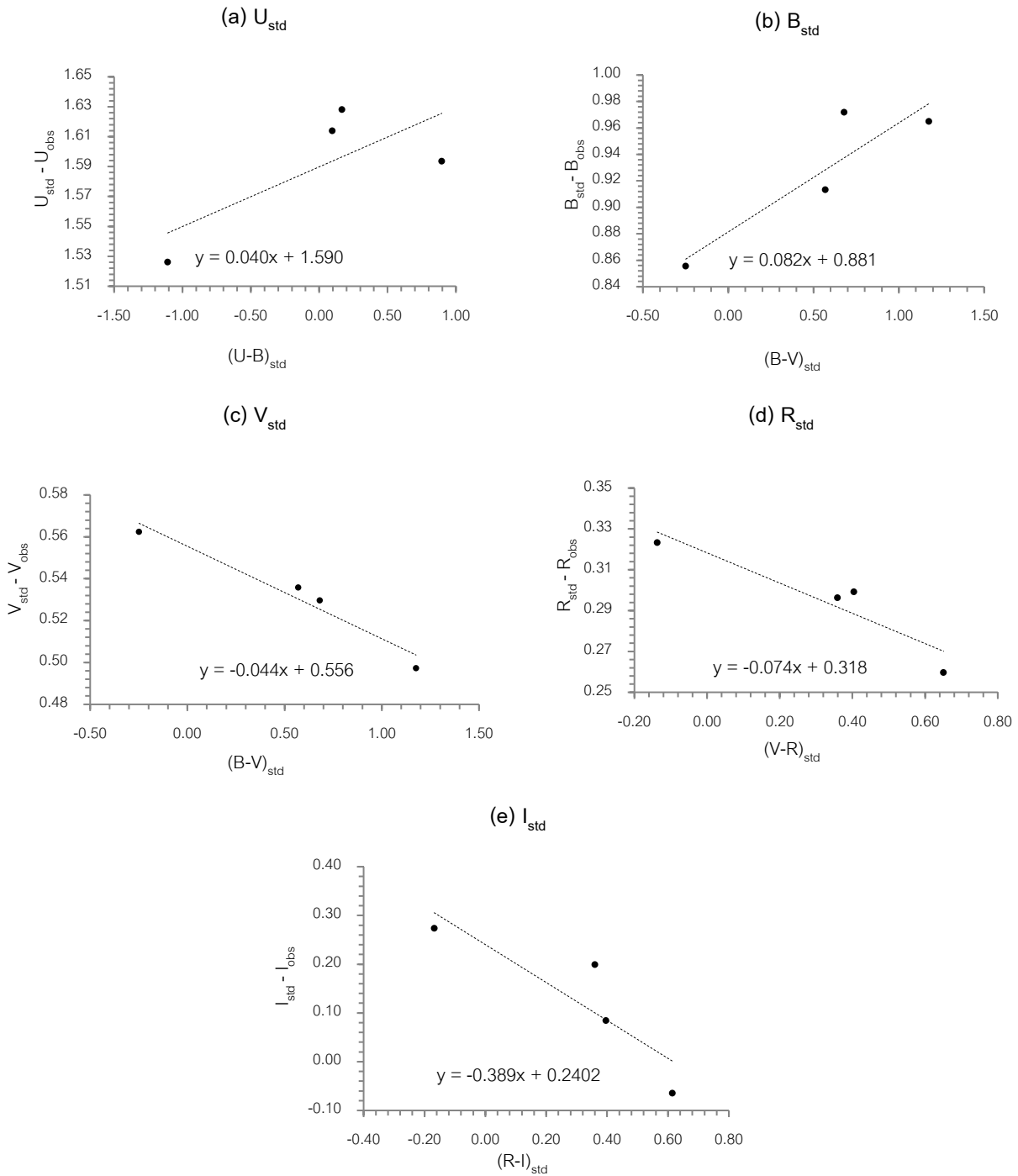


Figure 4 (a-e) The transformation instrumental magnitudes (U_{obs} , B_{obs} , V_{obs} , R_{obs} and I_{obs}) to the standard system magnitudes (U_{std} , B_{std} , V_{std} , R_{std} and I_{std}) for TNO.



สมการแปลงดัชนีสีที่แท้จริงหาสมการได้จากการสร้างกราฟจากความสัมพันธ์ค่าดัชนีสีที่วัดได้จากเครื่องมือที่แก้ผลการลดลงของแสงเนื่องจากชั้นบรรยากาศของโลก $(U-B)_{obs}$ $(B-V)_{obs}$ $(V-R)_{obs}$ และ $(R-I)_{obs}$ กับค่าดัชนีสีที่ใช้ข้อมูลจาก Landolt คือ $(U-B)_{std}$ $(B-V)_{std}$ $(V-R)_{std}$ และ $(R-I)_{std}$ ดังภาพที่ 5

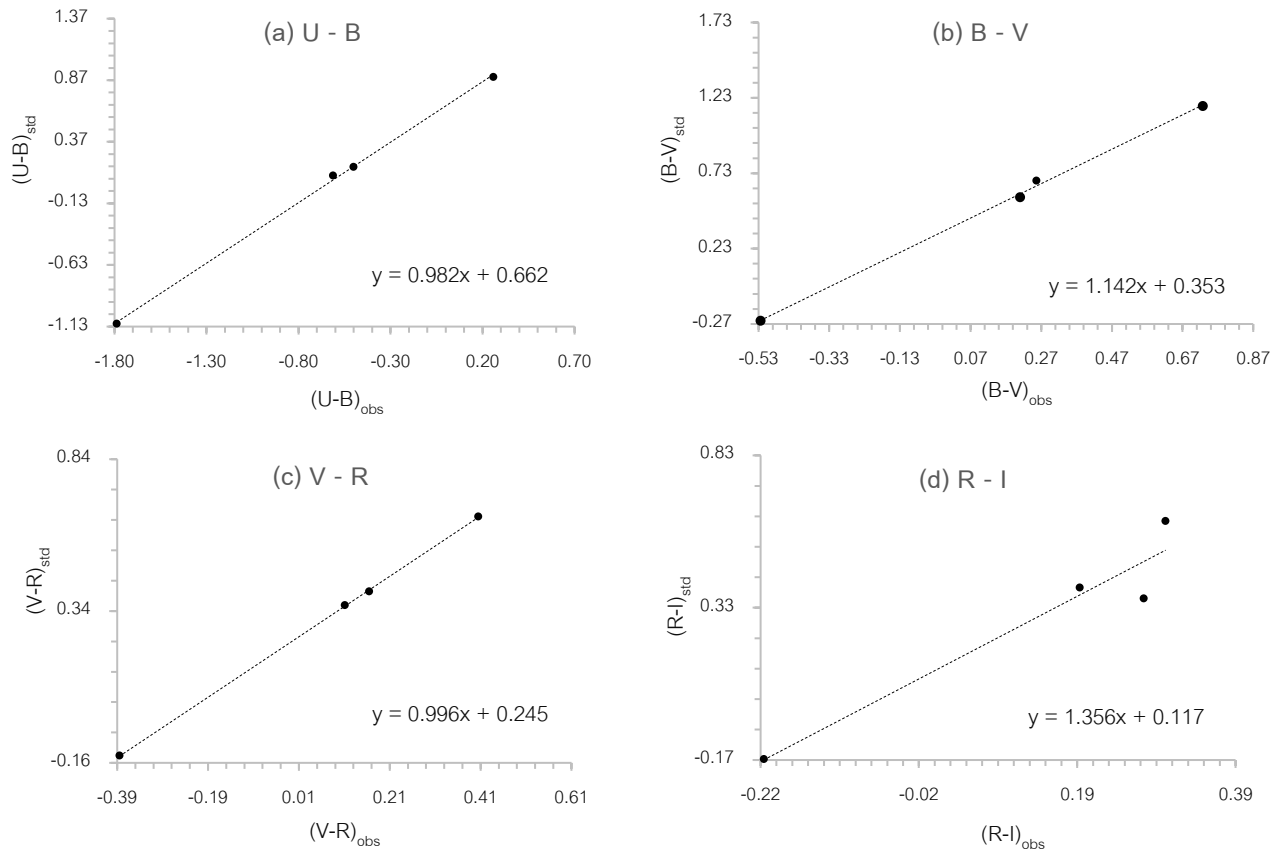


Figure 5 (a-d) The transformation instrumental color indices [$(U-B)_{obs}$ $(B-V)_{obs}$ $(V-R)_{obs}$ and $(R-I)_{obs}$] to the standard system color indices [$(U-B)_{std}$ $(B-V)_{std}$ $(V-R)_{std}$ and $(R-I)_{std}$] for TNO.

จากผลการวิเคราะห์ห้ข้อมูลในภาพที่ 5 สมการที่ใช้แปลงค่าดัชนีสีที่วัดได้จากเครื่องมือที่แก้ผลการลดลงของแสงเนื่องจากชั้นบรรยากาศของโลก $(U-B)_{obs}$ $(B-V)_{obs}$ $(V-R)_{obs}$ และ $(R-I)_{obs}$ เป็นค่าดัชนีสีที่แท้จริง $(U-B)_{std}$ $(B-V)_{std}$ $(V-R)_{std}$ และ $(R-I)_{std}$ ได้ดังสมการที่ 14



$$\begin{aligned}
 (U - B)_{std} &= (0.982 \pm 0.021) (U - B)_{obs} + 0.662 \pm 0.021 \\
 (B - V)_{std} &= (1.142 \pm 0.033) (B - V)_{obs} + 0.353 \pm 0.016 \\
 (V - R)_{std} &= (0.996 \pm 0.008) (V - R)_{obs} + 0.245 \pm 0.002 \\
 (R - I)_{std} &= (1.356 \pm 0.271) (R - I)_{obs} + 0.117 \pm 0.066
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

สมการสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอย

สมการสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอย ($k_{aer}(\lambda, h)$) ที่วิเคราะห์ได้เขียนอยู่ในรูปสมการลดลงแบบเลขชี้กำลังได้เป็น

$$k_{aer}(\lambda, h) = 0.078 \lambda^{-0.58} \tag{15}$$

เมื่อใช้สมการนี้หาค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงจากอนุภาคละอองลอยจะได้ค่าดังตารางที่ 3 และหากรวมค่านี้กับค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบเรย์ลีจากโมเลกุลของก๊าซและค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโมเลกุลจากโอโซนจะได้สัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกรวมทั้ง 3 สมการ [(15) + (11) + (12)] มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือ ($k'_{m(\lambda)ins}$) มากกว่าค่าผลรวมจากสมการทั่วไป [(10) + (11) + (12)] ทั้งนี้สามารถแสดงผลค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวของทุกเทอมได้ในตารางที่ 3 และแสดงผลกราฟของความสัมพันธ์ของแต่ละเทอมเช่นกัน ได้ดังภาพที่ 6

Table 3 The calculated and measured values of the atmospheric extinction coefficient at TNO

Filter (nm)	Observed $k'_{m(\lambda)ins}$	Atmospheric extinction coefficient					
		Theoretical values calculated				Calculated values from a semi-empirical equation	
		$k_{aer}(\lambda, h)$ Equation (10)	$k_{ray}(\lambda, h)$ Equation (11)	$k_{oz}(\lambda)$ Equation (12)	$k(\lambda)(10)$ Total (10) + (11) + (12)	$k_{aer}(\lambda, h)$ Equation (15)	$k(\lambda)(15)$ Total (15) + (11) + (12)
365 (U)	0.5738	0.0379	0.4252	0.0009	0.4640	0.1394	0.5655
440 (B)	0.3314	0.0326	0.1957	0.0006	0.2289	0.1252	0.3215
550 (V)	0.1948	0.0273	0.0784	0.0282	0.1339	0.1101	0.2167
700 (R)	0.1234	0.0225	0.0294	0.0039	0.0558	0.0958	0.1291
880 (I)	0.1062	0.0187	0.0117	5.19E-09	0.0304	0.0840	0.0957

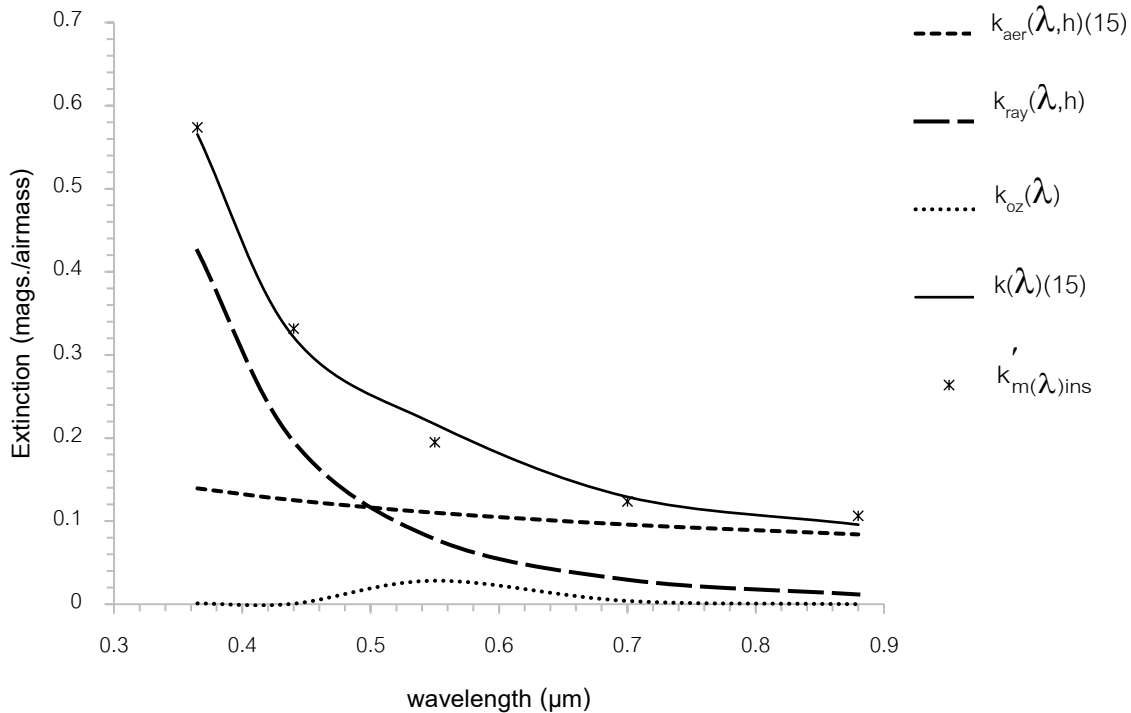


Figure 6 Comparison between the measured and calculated atmospheric extinction coefficients.

วิจารณ์ผลการวิจัย

โชติมาตรปรากฏ

โชติมาตรปรากฏที่วัดได้จากเครื่องมือไม่ใช่ค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริงของดาว เพราะบรรยากาศของโลก หน หอดูดาวแต่ละแห่งไม่เหมือนกัน รวมถึงผลที่เกิดจากเครื่องมือวัดที่ใช้ในการศึกษาอาจใช้แตกต่างกัน อาทิเช่น กล้องโทรทรรศน์ชนิดของแผ่นกรองแสง และกล้องถ่ายภาพ เป็นต้น จึงส่งผลทำให้ค่าโชติมาตรปรากฏของดาวที่วัดได้จากเครื่องมือได้ค่าแตกต่างกัน ดังนั้นค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริงของดาวจากระบบการถ่ายภาพของหอดูดาวแห่งชาติที่ศึกษานี้จึงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้คือ $m(\lambda)_{std} = m(\lambda)_{ins} - k'_m(\lambda)M(Z) - k''_m(\lambda)CM(Z) + \epsilon C_{std} + \xi_m(\lambda)_{std}$ สำหรับค่าตัวแปลงสมการนี้ของแผ่นกรองแสง U B V I และ R แสดงในตารางที่ 4



Table 4 Observational results of the first-order extinction coefficient ($k'_m(\lambda)$), the second-order extinction coefficient ($k''_m(\lambda)$), transformation coefficients (ϵ) and zero – point constants ($\xi_{m(\lambda)}_{std}$) in the U, B, V, R and I bands.

Filter	$k'_m(\lambda)$	$k''_m(\lambda)$	ϵ	$\xi_{m(\lambda)}_{std}$
U	0.5738 ± 0.023	-0.0977 ± 0.014	0.040 ± 0.026	1.590 ± 0.019
B	0.3314 ± 0.025	-0.0533 ± 0.009	0.082 ± 0.028	0.881 ± 0.020
V	0.1948 ± 0.013	0.0010 ± 0.006	-0.044 ± 0.007	0.556 ± 0.005
R	0.1234 ± 0.013	0.0097 ± 0.008	-0.074 ± 0.020	0.318 ± 0.009
I	0.1062 ± 0.065	-0.0080 ± 0.041	-0.389 ± 0.151	0.240 ± 0.063

ค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกลำดับที่หนึ่งของหอดูดาวแห่งชาติกับหอดูดาวชั้นนำอื่น ๆ ได้แก่ หอดูดาวแห่งชาติคิตพีค (Kitt Peak National Observatory, KPNO) ตั้งอยู่ที่ระดับความสูง 2,120 เมตร (Landolt & Uomoto, 2007) และหอดูดาวเดวาสทาล (Devasthal) ตั้งอยู่ที่ระดับความสูง 2,450 เมตร (Mohan *et al.*, 1999) หอดูดาวเกาเมกู (Gaomeigu) ตั้งอยู่ที่ระดับความสูง 3,200 เมตร (Hu, 2011) หอดูดาวอินเดีย (Indian Astronomical Observatory, Hanle) ตั้งอยู่ที่ระดับความสูง 4,467 เมตร (Stalin *et al.*, 2008) และหอดูดาวเมานาเกีย (Mauna Kea) ตั้งอยู่ที่ระดับความสูง 4,200 เมตร พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลก ในแต่ละสถานที่ที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน ทั้งนี้หอดูดาวแห่งชาติมีแนวโน้มใกล้เคียงที่สุดกับหอดูดาวเกาเมกู หอดูดาวแห่งชาติคิตพีค และหอดูดาวเดวาสทาล ซึ่งตั้งอยู่ที่ระดับความสูงที่ระดับใกล้เคียงกัน แสดงในภาพที่ 7 นั้นหมายความว่าหอดูดาวแห่งชาติตั้งอยู่ในพิกัดที่เหมาะสมและมีทัศนวิสัยทางดาราศาสตร์เทียบเคียงกับหอดูดาวนานาชาติ

ทั้งนี้เมื่อเทียบกับการศึกษาของ Dhillon *et al.*, 2014 ด้วยกล้อง UltraSpec ที่หอดูดาวนี้ ในช่วงเดือน พฤศจิกายน 2556 ถึง เมษายน 2557 ค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกให้ค่าอยู่ที่ 0.2 ในช่วงความยาวคลื่น G (482.5 nm) และเท่ากับ 0.1 ในช่วงคลื่น R (626.1 nm) ซึ่งอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับผลการศึกษานี้เช่นกัน ดังภาพที่ 7

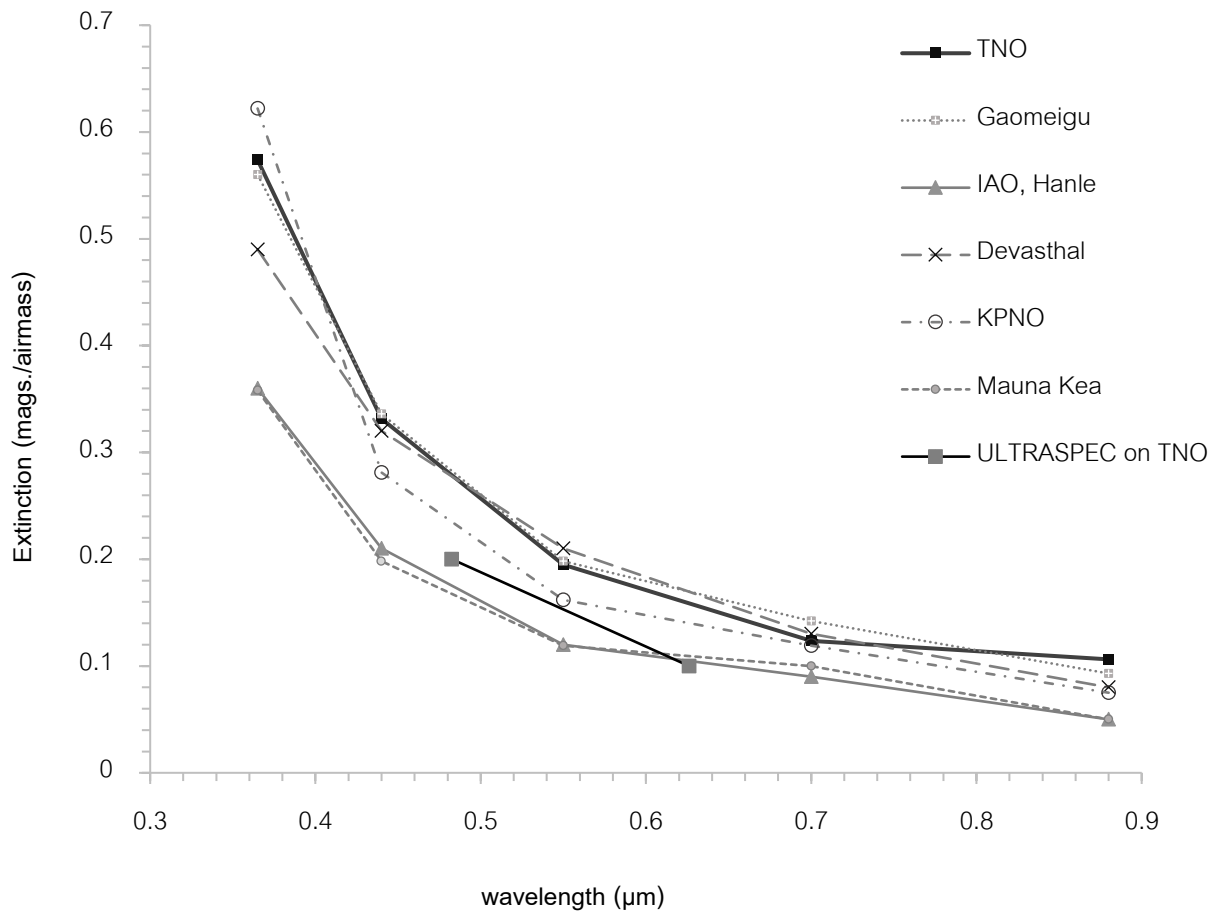


Figure 7 Comparisons of the measured atmospheric extinction coefficients at the Thai National Observatory (TNO) from this study with the other literatures.

ปัจจัยที่ส่งผลต่อสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลก

จากสมการการกระเจิงของแสงในชั้นบรรยากาศโลก ณ หอดูดาวแห่งชาติ พบว่าผลของการกระเจิงแบบเรย์ลีห์ให้ค่าการกระเจิงมากในช่วงความยาวคลื่นสั้น (U และ B) ซึ่งตรงตามทฤษฎีการกระเจิงของแสงชนิดเรย์ลีห์ที่มีค่าผกผันตามสมการที่ 11 หรือในรูปอย่างง่าย $k_{ray} \propto (1/\lambda^4)$ ส่วนค่าการกระเจิงเนื่องจากอนุภาคละอองลอย พบว่าเป็นค่าที่ไม่ขึ้นอยู่กับค่าความยาวคลื่นมากนักสอดคล้องตามหลักการกระเจิงชนิดมี (Mie Scattering) ซึ่งจากภาพที่ 6 จะเห็นว่ากราฟที่แสดงการกระเจิงเนื่องจากอนุภาคละอองลอยค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับปัจจัยอื่น และส่วนการกระเจิงที่เกิดจากไอโซนนั้นจะเห็นว่ามีค่าการกระเจิงมีค่ามากโดยเฉพาะในช่วงคลื่น V และ R ซึ่งอยู่ในช่วงการดูดกลืนย่านชัปป์ยูส์เท่านั้น สำหรับสมการการกระเจิงของอนุภาคละอองลอยที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ $k_{aer} = 0.078\lambda^{-0.58}$ เมื่อนำไปรวมกับผลคำนวณของค่าการกระเจิงแบบเรย์ลีห์และ



ค่าการดูดกลืนโมเลกุลจากไอโซน พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกมีค่าแนวโน้มเดียวกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือตั้งในภาพที่ 6 นั้นแสดงว่าสมการดังกล่าวสามารถใช้ประมาณสัมประสิทธิ์การกระเจิง จากอนุภาคละอองลอยของหอดูดาวแห่งชาติได้อย่างแม่นยำ

การวิเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยนี้ให้ผลแค่เพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ทั้งนี้การกระเจิงเนื่องจากโมเลกุลของก๊าซในบรรยากาศ (ไนโตรเจน ออกซิเจน และไอโซน) ในภูมิภาคใกล้เส้นศูนย์สูตรจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่การกระเจิงของแสงจากอนุภาคละอองลอยในชั้นบรรยากาศของโลก จะได้ค่าและสมการที่เปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับฤดูกาล โดยเฉพาะในช่วงฤดูที่มีการเผาไหม้ทางชีวมวลที่มีอยู่มากในภาคเหนือของประเทศไทย เดือนกุมภาพันธ์-เมษายน ของทุกปี หากมีการเก็บข้อมูลอย่างต่อเนื่องจะทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ที่เหมาะสมกับช่วงที่สังเกตได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้ความสูงของหอดูดาวแห่งนี้ตั้งอยู่ในที่ความสูงมากกว่าระดับชั้นขอบเขตโลก (Boundary layer) ทำให้ค่าอนุภาคละอองลอยมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อยต่อการสังเกตการณ์ทางดาราศาสตร์ เว้นเสียแต่มีการเผาไหม้เกิดในพื้นที่ใกล้เคียงกับหอดูดาว

สรุปผลการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดของแสงดาวเนื่องจากบรรยากาศของโลกที่เกิดจากการกระเจิงโดยอนุภาคละอองลอย การดูดกลืนโดยไอโซน และการกระเจิงแบบเรย์ลีห์ ณ หอดูดาวแห่งชาติ ด้วยกล้องโทรทรรศน์ขนาด 2.4 เมตร ผ่านแผ่นกรองแสงในช่วงความยาวคลื่น U B V R และ I พบว่าได้ผลที่ใกล้เคียงกับหอดูดาวชั้นนำอื่น ๆ ได้สมการแปลงค่าโชติมาตรปรากฏจากระบบเครื่องมือวัด ณ หอดูดาวแห่งชาติเป็นค่าโชติมาตรปรากฏที่แท้จริง โดยเทียบค่าโชติมาตรปรากฏนี้ได้จาก Landolt Standard และได้สร้างสมการที่ทดลองเพื่อใช้ประมาณค่าการกระเจิงจากอนุภาคละอองลอยของแสงในบรรยากาศโดยมีลักษณะเป็นการลดลงแบบเลขชี้กำลัง (Exponential decay) คือ $k_{\text{aer}}(\lambda, h) = 0.078\lambda^{-0.58}$ อีกทั้งผลวิจัยที่ได้เหล่านี้สามารถนำไปใช้กับการถ่ายภาพด้วยเทคนิค ซีซีดี โฟโตเมตรี ปรับปรุงพัฒนาเทคโนโลยีระบบปรับสภาพตามแสง (Adaptive Optics) และกำหนดความเหมาะสมของอุปกรณ์การถ่ายภาพทางดาราศาสตร์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ทีมวิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนทุนการวิจัยและเจ้าหน้าที่ในการดำเนินการวิจัย ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำปางที่สนับสนุนและส่งเสริมการทำงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

Buchheim, B. (2005). The Magnitude and Constancy of Second-Order Extinction at a Low-Altitude Observatory Site. In *The Society for Astronomical Sciences 24th Annual Symposium on Telescope Science*. (pp.111). Society for Astronomical Sciences.



- Chakraborty, P., Das, H.K., & Tandon, S.N. (2005). Exposure Time Calculator for IFOSC and Sky Background Estimation. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 33 (4), 513.
- Dhillon, V.S., Marsh T.R., Atkinson, D.C., Bezawada, N., Bours, M.C.P., Copperwheat, C.M., Gamble, T., Hardy, L.K., Hickman, R.D.H., Irawati, P., Ives D.J., Kerry, P., Leckngam, A., Littlefair, S.P., McLay, S. A., O'Brien, K., Peacocke, P.T., Poshyachinda, S., Richichi, A., Soonthornthum, B. & Vick, A. (2014). ULTRASPEC: a High - Speed Imaging Photometer on the 2.4 m Thai National Telescope, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444, 3504–3516, doi:10.1093/mnras/stu1660
- Giclas, H.L., Burnham, J.R., & Thomas, N.G. (1971). *Lowell Proper Motion Survey Northern Hemisphere*. Flagstaff, Arizona: Lowell Observatory.
- Gorshelev, V., Serdyuchenko, A., Weber M., Chehade W., & Burrows J. P. (2014). High Spectral Resolution Ozone Absorption Cross- Sections–Part 1: Measurements, Data Analysis and Comparison with Previous Measurements Around 293 K. *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 609–624, doi:10.5194/amt-7-609-2014
- Hale, S.J., Chaplin, W.J., Davies, G.R., Elsworth, Y.P., Howe, R., Lund, M.N., Moxon, E.Z., Thomas, A., Pallé, P.L., & Rhodes, Jr. E. J. (2017). Atmospheric Extinction Coefficients in the Ic Band for Several Major International Observatories: Results from the BiSON Telescopes, 1984–2016. *The Astronomical Journal*, 154 (3), 89, doi.org/10.3847/1538-3881/aa81d0
- Hu, B. (2011). Preliminary Results of Atmospheric Extinction Coefficient Measurements at Gaomeigu Observational Station. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 35, 199-208.
- Laken, B. A., Parviainen, H., Alejandro, G. - G., Casiana, M. - T., Varela, A. M., Sergio, F. - A., & Pallé, P. (2015). Thirty Years of Atmospheric Extinction from Telescopes of the North Atlantic Canary Archipelag. *Journal of Climate*, 29(1), doi: 10.1175/JCLI-D-14-00600.1
- Landolt, A. U. (1992). UBVRI Photometric Standard Stars in the Magnitude Range 11.5<V<16.0 Around the Celestial Equator. *Astronomical Journal*, 104 (1), 340-491.



- Landolt, A. U., & Uomoto, A. K. (2007). Optical Multicolor Photometry of Spectrophotometric Standard Stars. *The Astronomical Journal*, 133(3), 768.
- Mohan, V., Uddin, W., Sagar, R., & Gupta, S. K. (1999). Atmospheric Extinction at Devasthal, Naini Tal. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 27, 601-608.
- Sanchez-Bajo, F., and Alvarez, D.R.-E. (2012). On the Estimation of Atmospheric Aerosol Extinction Parameters from Measurements in the Johnson–Cousins Photometric System. *The Astronomical Society of Australia*, 29 (1), 12–19, doi.org/10.1071/AS11037
- Stalin, C.S., Hegde, M., Sahu, D.K., Parihar, P.S., Anupama, G.C., Bhatt, B.C., & Prabhu, T.P.P. (2008). Night Sky at the Indian Astronomical Observatory During 2000-2008. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 36, 111-127.
- Zhang, H. - H., Liu, X. - W., Yuan, H. - B., Zhao, H. - B., Yao, J. - S., Zhang, H. - W., & Xiang, M. - S. (2005). Atmospheric Extinction Coefficients and Night Sky Brightness at the Xuyi Observation Station. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 13 (4), 490-500.