



การวิเคราะห์กราฟแสงของระบบดาวคู่แบบแตะกันเชิงลึก TIC 125754458

Light Curve Analysis of Overcontact Binary System TIC 125754458

สุพัตรา วงศ์ศรียา*

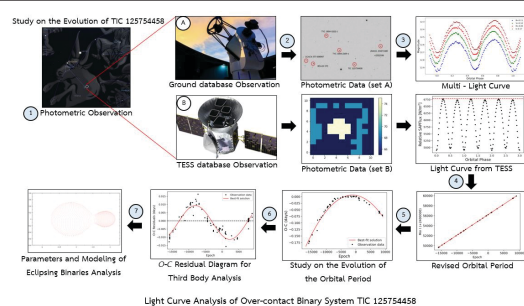
กลุ่มวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ บุรีรัมย์ 31000

Supattra Wongsriya*

Physics program, Faculty of Science, Buriram Rajabhat University, Buriram 31000

Received 31 January 2024; Received in revised 30 November 2024; Accepted 4 December 2024

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

The objectives of this study were to analyze the light curves and investigate the evolutionary stages of overcontact eclipsing binary star systems with low mass ratios ($q < 0.25$). Observations were conducted using optical data gathered from a reflecting telescope in the visible spectrum, following the Johnson-Cousins UBV_RI_C photometric systems, along with data from the TESS telescope. The optical analysis results were applied to determine the physical characteristics and develop a model for studying the evolution of the overcontact binary system. The findings revealed a symmetrical light curve typical of a W UMa Subtype a eclipsing binary system, with a newly determined orbital period of 0.412519 ± 0.000001 days. According to the Angular Momentum Loss (AML) theory, this period is decreasing at a rate of

$1.354039 \pm 1.382400 \times 10^{-7}$ day per year. Additionally, the third light in the eclipsing binary system (EB) was analyzed, indicating a sinusoidal pattern with an amplitude of approximately 0.007950 days and an orbital period of about 20 years for the third body.

คำสำคัญ

การวิเคราะห์กราฟแสง;
ระบบดาวคู่แบบแตะกันเชิงลึก;
วิวัฒนาการ;
แบบจำลอง

Keywords

Light curve analysis;
Overcontact binary system;
Model of system;
Evolution

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์กราฟแสงและศึกษาวิวัฒนาการของระบบดาวคู่อุปราคาแบบแตะกันเชิงลึกที่มีอัตราส่วนมวลต่ำ ($q < 0.25$) สังเกตการณ์ทางแสงด้วยกล้องโทรทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นตามมาตรฐานของจอห์นสันและมอร์แกน (BVR_I) และข้อมูลสังเกตการณ์จากกล้องโทรทรรศน์อวกาศ TESS ผลการวิเคราะห์ทางแสงนำไปหาสมบัติทางกายภาพและสร้างแบบจำลองของระบบดาวคู่ เพื่อให้เข้าใจวิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบแตะกันเชิงลึก ข้อมูลที่ได้ยืนยันผลการจำแนกประเภทของระบบดาวคู่เป็นชนิด W UMa ชนิดย่อย A คาบการโคจรระบบใหม่ 0.412519 ± 0.000001 วัน คาบการโคจรระบบลดลงต่อเนื่องที่อัตรา $1.354039 \pm 1.382400 \times 10^{-7}$ วันต่อปี อันเป็นไปตามทฤษฎี AML นอกจากนี้ยังวิเคราะห์แสงที่สามเพื่อตรวจสอบผลจากวัตถุที่สามในระบบ ผลปรากฏลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีอัมพลิจูดประมาณ 0.007950 วัน และคาบการโคจรสมาชิกดวงที่สามประมาณ 20 ปี

*ผู้รับผิดชอบบทความ: Supattra.ws@bru.ac.th

DOI: 10.14456/tstj.2025.18

1. บทนำ

ระบบดาวคู่ TIC 125754458 (CU Tau, TYC 1804-2416-1) จัดเป็นระบบดาวคู่อยู่ในกลุ่มดาววัว จากการสืบค้นข้อมูลในบัญชีรายชื่อของ GCVS (General catalogue of variable stars) พบว่าระบบดาวคู่นี้จัดอยู่ในชนิดสเปกตรัม G0 ค้นพบการแปรแสงครั้งแรกโดย Binnendijk [1] จากการสังเกตการณ์ด้วยเทคนิคโฟโตกราฟฟิโกลิเมตริที่นับว่าเป็นการค้นพบโดยบังเอิญ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบการบังกันของแสงดาวในระบบพบคาบการโคจรยุคแรกที่ 0.4126022 ± 0.0000009 วัน โดยในขณะนั้นยังไม่สามารถระบุประเภทตามลักษณะกราฟแสงได้แน่ชัด ต่อมา Kholopov et al. [2] จัดให้เป็นระบบดาวคู่แบบแตะกัน ประเภท W UMa โดยพิจารณาจากลักษณะกราฟแสงที่ได้จากการสังเกตการณ์ที่มีตำแหน่งอุปราคาปฐมภูมิและอุปราคาทุติยภูมิใกล้เคียงกันมาก อันเกิดจากสมาชิกในระบบมีเปลือกนอกที่สัมผัสกันหรือใช้ชั้นบรรยากาศร่วมกันส่งผลให้การแลกเปลี่ยนมวลอย่างรวดเร็ว และเข้าสู่ภาวะสมดุลทางความร้อน โดยในงานวิจัยนี้ได้รวบรวมข้อมูลทางแสงด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กทริกโฟโตเมตริ (Photoelectric photometry; Pe) ดังสมการ (1)

$$\text{Min I} = \text{BJD}2440969.233300 + 0.^d411967E \quad (1)$$

จากนั้นเรื่อยมาได้มีนักดาราศาสตร์จำนวนไม่น้อยได้รวบรวมค่าเวลาของแสงน้อยที่สุด (Time of minima; Min) ที่แสดงผลการลดลงของคาบการโคจรระบบอย่างต่อเนื่องโดยมีวิวัฒนาการที่เป็นไปตามทฤษฎีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum loss; AML) เมื่อสมาชิกดาวในระบบเปลี่ยนแปลงพลวัตส่งผลให้ดาวสมาชิกในระบบเกิดการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมโดยทั่วไปมักจะปรากฏให้เห็นจากการเปลี่ยนแปลงคาบโคจร (Orbital period change; dP/dE)

ต่อมา Yang และ Liu [3] สร้างกราฟแสงจากการสังเกตการณ์ด้วยเทคนิคซีซีดีโฟโตเมตริ (Charge-coupled device photometry; CCD photometry) ใน

ช่วงความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน (B) และช่วงแสงสีเขียว (V) อีกครั้ง แต่ผลการวิเคราะห์ก็ยังไม่ปรากฏคาบการโคจรของระบบที่สมบูรณ์ เนื่องจากพบค่าเวลาที่แสงน้อยที่สุดเพียง 4 ค่าเท่านั้น อีกทั้งข้อมูลที่รวบรวมได้ก่อนหน้านี้ที่วิเคราะห์ผ่านแผนภาพ O-C ในช่วงกลางการเกิดอุปราคา (Mid-eclipse timing) จำนวน 19 ข้อมูล ก็ยังคงแสดงการกระจายค่อนข้างมาก ส่งผลให้ไม่สามารถตรวจสอบการลดลงของคาบการโคจรระบบที่แน่ชัดได้ และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่ผิดปกตินี้ จึงต้องปรับเปลี่ยนคาบการโคจรระบบใหม่เป็น 0.413415 วัน อีกทั้งยังใช้ซอฟต์แวร์ Wilson-devinney [4, 5] เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ผลที่ได้แสดงให้เห็นชัดว่าระบบดาวคู่นี้จัดเป็นระบบดาวคู่แบบแตะกัน ประเภท W UMa ชนิดย่อย A ที่มีอัตราส่วนมวลต่ำ ($q : 0.180$) โดยดาวปฐมภูมิมีมวลมาก ขนาดใหญ่ และอุณหภูมิพื้นผิวชั้นโฟโตสเฟียร์สูงกว่า ส่วนดาวทุติยภูมิมีมวลน้อย ขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าสมาชิกดาวฤกษ์ในระบบมีการบังกันแบบเต็มดวง (Total eclipses) โดยพบความต่างของกราฟแสงที่ตำแหน่งสว่างสุดในช่วงความยาวคลื่น V (แมกนิจูด 0.015) ผลที่ได้นี้คาดการณ์ว่าเป็นผลจากปรากฏการณ์โอคอนเนล (O'Connell effect) [6] โดยทั่วไปมักจะปรากฏความสว่างแตกต่างบนกราฟแสงที่มีความสูงของจุดสูงสุดในแต่ละครั้งของคาบการโคจรของระบบดาวคู่ที่เฟสประมาณ 0.25 (Secondary maximum) และ 0.75 (Primary maximum) ลักษณะที่เด่นชัดนี้อาจเป็นผลมาจากการมีจุดมืดหรือจุดสว่างบนดาว (Starspots) โดยในระบบดาวคู่อื่นๆ อาจเป็นผลมาจากการถ่ายโอนมวลระหว่างดาว (Mass transfer) แรงแม่เหล็กและกิจกรรมทางแม่เหล็ก (Magnetic activity) การมีรูปร่างของดาวที่ไม่เป็นทรงกลมสมบูรณ์ (Tidal distortion) ลักษณะของจานสะสมมวล (Accretion disk) หรือการเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบของระบบ (System configuration changes) เช่น การมีอยู่ของวัตถุที่สามในระบบดาวคู่ เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยนี้ คาดว่าอาจมีจุดสว่าง (Cool spot) บนพื้นผิวดาวทุติยภูมิ

ในปีถัดมา Qian et al. [7] ได้สังเกตการณ์ทางแสงทั้งสองช่วงความยาวคลื่นอีกครั้ง เพื่อตรวจสอบผลการสังเกตการณ์ในครั้งที่ผ่านมา โดยพบค่าเวลาที่สั้นลงน้อยที่สุดจำนวน 2 ค่า และรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมด้วยเทคนิคโฟโตอิเล็กทริกและซีซีดีโฟโตเมทรี จำนวน 24 ข้อมูล ผลปรากฏว่าการโคจรระบบที่ถูกต้องและแม่นยำขึ้นอยู่ที่ 0.412538 วัน รวมทั้งยังแสดงแผนภาพ O-C ที่ระบุการลดลงของคาบการโคจรระบบดาวคู่อย่างต่อเนืองในอัตรา 1.810×10^{-6} วันต่อปี ที่เป็นไปตามพัฒนาการเป็นระบบดาวคู่แบบตะวันตกเชิงลึกที่มีองศาการตะวันตก $f = 50.1 \pm 3.2$ เปอร์เซนต์ และมีอัตราส่วนต่ำมาก (q) อยู่ที่ 0.177 นอกจากนี้ยังได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาสมบัติทางกายภาพของระบบด้วยวิธีการของวิลสัน-เดวิลนี (Wilson-devinney synthetic method) ผลการวิเคราะห์ที่ได้ไม่พบผลจากปรากฏการณ์โอคอนเนลตามที่ Yang และ Liu [3] ได้คาดการณ์ไว้

จากผลการสังเกตการณ์ที่น่าสนใจนี้ Nelson [8] จึงได้ติดตามวิวัฒนาการโดยการสังเกตการณ์ผ่านทางซีซีดีโฟโตเมทรีในช่วงคลื่นแสง V , R_c และ I_c อีกครั้ง โดยเริ่มจากการศึกษาคาบการโคจรระบบดาวคู่ได้สมการเส้นตรงอพิเมอร์ส ดังสมการ (2)

$$\text{Min } I = \text{BJD}2456210.91096 + 0.412518E \quad (2)$$

จากนั้นวิเคราะห์หาอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจร พบว่าระบบมีคาบการโคจรลดลงอย่างต่อเนื่องในอัตรา 1.94×10^{-6} วันต่อปี รวมถึงได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพด้วยซอฟต์แวร์ Wilson-devinney [4, 5] เพื่อศึกษาวิวัฒนาการของระบบ อีกทั้งยังสังเกตการณ์แถบสเปกตรัมด้วยสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อวิเคราะห์ความเร็วในแนวเล็งระบบ [9] นำไปสู่การหามวลดาวปฐมภูมิ (M_1) และมวลดาวทุติยภูมิ (M_2) เพื่อยืนยันผลการสังเกตการณ์ที่กระบวนการทางโฟโตเมทรีไม่สามารถหาค่าได้ จากผลการวิเคราะห์พบว่าระบบดาวคู่นี้มีอัตราส่วนมวล $q = 0.190 \pm 0.002$ ($M_1 = 1.390 \text{ Mo}$,

$M_2 = 0.263 \text{ Mo}$) จะเห็นได้ว่าค่าอัตราส่วนมวลไม่สอดคล้องกันหากเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Yang และ Liu [3] และ Qian et al. [7] โดยคาดว่ามีความโน้มถ่วงลดลงอย่างต่อเนื่อง และยังคงพบความสอดคล้องกันขององศาการตะวันตก เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาาระบบดาวคู่แบบตะวันตกเชิงลึกคาบสั้นระบบอื่นที่มีลักษณะบางประการคล้ายคลึงกัน อาทิ TIC 46305445 (AH Cnc), TIC 320852086 (TV Mus) และ TIC 28179701 (IK Per) [7, 10, 11, 12] อีกทั้งยังรวมไปถึงอุณหภูมิดาวปฐมภูมิและดาวตะวันตกเชิงลึก ($T_1 = 5940 \pm 114$, $T_2 = 5800 \pm 115$ เคลวิน) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Qian et al. [7] โดยระบุว่า T_2 มากกว่า T_1 และยังคงจัดเป็นระบบดาวคู่แบบตะวันตกเชิงลึก ชนิดย่อย A

จากข้อสังเกตข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการสังเกตการณ์ระบบดาวคู่นี้ นับว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาต่อเนือง เพื่ออธิบายกลไกการแปรแสงของสมาชิกดาวในระบบดาวคู่แบบตะวันตกเชิงลึกคาบสั้นที่เป็นไปตามวิวัฒนาการของระบบดาวคู่อุปราคาแบบใกล้ชิด ซึ่งโดยทั่วไปจะมีวิวัฒนาการของสมาชิกในระบบผ่านหลายขั้นตอน เมื่อสมาชิกดาวถูกขังอยู่ใกล้กันมาก การแลกเปลี่ยนมวล และการถ่ายโอนพลังงานจึงมีบทบาทสำคัญที่ส่งผลให้ลักษณะและพฤติกรรมของระบบเปลี่ยนแปลงไปตามช่วงต่าง ๆ ซึ่งอธิบายได้จากหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุมและพลังงาน เมื่อระบบดาวคู่มีการถ่ายโอนมวลจะมีการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรระบบอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะขึ้นอยู่กับลักษณะของการสูญเสียมวลและการกระจายโมเมนตัมในระบบ สำหรับระบบดาวคู่นี้ผู้วิจัยมุ่งเน้นศึกษาวิวัฒนาการระบบดาวคู่แบบตะวันตกเชิงลึกที่คาดการณ์ว่าระบบจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรลดลงอย่างต่อเนื่อง อีกทั้งยังตรวจสอบสมมติฐานที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยเพิ่มการวิเคราะห์การมีอยู่ของแสงที่สามในระบบ (Third light) ที่คาดว่าอาจโคจรรอบระบบดาวคู่นี้ โดยการตรวจสอบการเดินทางของแสงที่แตกต่างกันเล็กน้อยก่อนที่จะเดินทางมาถึงโลกหรือที่เรียกว่า

“ผลกระทบของเวลาเดินทางของแสง (Light Travel Time Effect; LTTE)” สังเกตการณ์ด้วยกล้องโทรทรรศน์ภาคพื้น (Ground-based observation) ในช่วงคลื่นแสงที่ตามองเห็นได้ (Optical window) และกล้องโทรทรรศน์อวกาศ (Space-based observation) จากดาวเทียมสำรวจดาวเคราะห์นอกระบบหรือ TESS (Transiting exoplanet survey satellite) จากนั้นวิเคราะห์กราฟแสง เพื่อหาค่าประกอบทางกายภาพ และสร้างแบบจำลองระบบดาวคู่เป็นครั้งแรก

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

การเก็บข้อมูลทางแสงของดาวเป้าหมาย สังเกตการณ์บนภาคพื้นด้วยทางกล้องโทรทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง รุ่น Proline PL09000 เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เมตร ติดตั้งบนฐานตั้งกล้องระบบเส้นศูนย์สูตร พร้อมระบบติดตามดาวอัตโนมัติ และบันทึกสัญญาณโฟตอนที่ส่งผ่านจากดาวเป้าหมาย ด้วยเครื่องซีซีดีโฟโตมิเตอร์ ความละเอียดสูง 3056x3056 พิกเซล ผ่านแผ่นกรองแสงในระบบโฟโตเมทรีแถบช่วงกว้าง (Wide-band system) BVR_C ณ หอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบ พระชนมพรรษา นครราชสีมา สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) พิกัดที่ตั้ง 14°52'17.16" °N, 102°1'41.24" °E เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อหาตำแหน่งดาวผ่านทางซอฟต์แวร์ The sky X ถ่ายภาพด้วยซอฟต์แวร์ MaxIm DL6 Pro ผู้วิจัยเก็บข้อมูลในระหว่างวันที่ 19-20 ธันวาคม 2565 จากนั้นนำข้อมูลภาพถ่ายเข้าสู่กระบวนการรีดักชันข้อมูล (Data reduction) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนจากภาพถ่ายทางดาราศาสตร์ก่อนวัดความสว่างด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลโฟโตเมทรีผ่านซอฟต์แวร์ AstroimageJ และดาวน์โหลดข้อมูลทางแสงจากฐานข้อมูล TESS โดยการปรับแก้ Light-curve V.0.9.6 [13] บนฐานข้อมูลของ MAST (Mikulski archive for space telescopes) [14]

จากนั้นสร้างกราฟแสงข้อมูลบนภาคพื้นทีที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์สัมพัทธ์ (Relative flux) หรือความสว่างปรากฏกับวันจูเลียนเบริเซนทริกศูนย์สุริยะ (BJD) ส่วนข้อมูลจากกล้องโทรทรรศน์อวกาศ TESS พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์โฟโตเมทรีรูบ์แสงแบบง่าย (Simple aperture photometry flux; SAP flux) กับวันจูเลียนเบริเซนทริกเทสส์ศูนย์สุริยะ (Barycentric TESS Julian Date; BTJD) เพื่อวิเคราะห์ผลการแปรแสงสู่การจำแนกประเภท รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลทางแสงส่วนอื่นๆ

จากกราฟแสงที่ได้นำมาวิเคราะห์หาเวลาการเกิดอุปราคาช่วงกลางในระบบ ได้แก่ เวลาแสงน้อยที่สุดปฐมภูมิ (Primary eclipse; Min I) และทุติยภูมิ (Secondary eclipse; Min II) จากนั้นรวบรวมกับงานวิจัยที่ผ่านมา เพื่อหาคาบการโคจรระบบดาวคู่ผ่านสมการเส้นตรงอีพีมอริสใหม่ (New linear ephemeris) ที่คำนวณจากงานวิจัยอ้างอิง

สำหรับการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจรของระบบดาวคู่ (dP/dE) ศึกษาความสัมพันธ์ได้จากแผนภาพ O-C จากนั้นตรวจสอบการมีอยู่ของวัตถุที่สามในระบบดาวคู่ด้วยแผนภาพ O-C เรสซิดูวส์ ก่อนเข้าสู่การวิเคราะห์หาค่าประกอบทางกายภาพ และสร้างภาพกราฟฟิคจำลองระบบดาวคู่ (Graphic image) จากกราฟแสงด้วยซอฟต์แวร์ PHOEBE (Physical of eclipsing binariEs)³ [15] ผ่านทาง Desktop UI Client และใช้ภาษาไพทอนสำหรับดาวน์โหลด วิเคราะห์ผลทางสถิติ และสร้างกราฟต่างๆ

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

3.1. การสังเกตการณ์และกราฟแสง

ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลทางแสงของระบบดาวคู่ TIC 125754458 ใช้เวลาเปิดหน้ากล้อง (Exposure time) 120, 60, 30 และ 45 วินาที ในช่วงความยาวคลื่น BV R_C ตามลำดับ รวม 473 ข้อมูล (B: 118, V: 22, R_C: 117, I_C: 116) โดยเลือกดาว TYC 1804-2339-1 เป็นดาว

เปรียบเทียบ และดาวตรวจสอบ ได้แก่ 2MASS J03471480+2522186, TYC 1804-1922-1, BD+24 570, UCAC4 577-008987 เพื่อให้การวัดความสว่างของดาว

เป้าหมายด้วยวิธีการโฟโตเมทรีมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จากระบบฐานข้อมูลทางดาราศาสตร์ Simbad (SIMBAD astronomical database) (Table 1, Figure 1)

Table 1 Coordinates of TIC 125754458, comparison star, and check stars (epoch = 2000)

Stars	RA (α_{J2000})	Dec (δ_{J2000})	m (V)
TIC 125754458	03 ^h 47 ^m 36.9103 ^s	+25°23'15.8451"	12.02
Comparison star	03 ^h 47 ^m 42.4825 ^s	++25°20'15.7349"	12.48
Check star-1	03 ^h 47 ^m 14.8034 ^s	+25°22'18.5887"	12.34
Check star-2	03 ^h 47 ^m 46.6981 ^s	+25°17'13.0077"	11.73
Check star-3	03 ^h 48 ^m 02.9542 ^s	+25°20'31.6911"	11.88
Check star-4	03 ^h 48 ^m 06.7604 ^s	+25°19'35.8034"	13.70

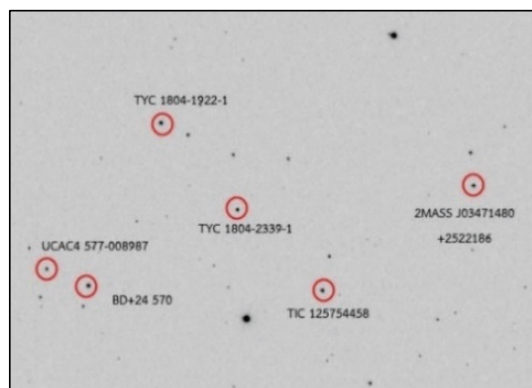


Figure 1 Reduced image and coordinates of target, comparison, and check stars

ข้อมูลภาพถ่ายทั้งหมดผ่านกระบวนการลบสัญญาณรบกวนทางดาราศาสตร์ โดยเริ่มจากการวัดความสว่างของเป้าหมาย ดาวเปรียบเทียบ และดาวตรวจสอบ เพื่อตรวจสอบการแปรแสงของระบบดาวคู่นี้ จากนั้นสร้างกราฟแสงในขณะที่สมาชิกดาวในระบบที่เคลื่อนที่บ่งกันครบ 1 รอบ (Orbital phase) (Figure 2)

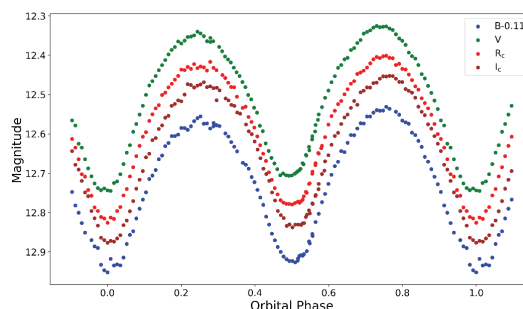


Figure 2 Multiple light curves of TIC 125754458

กราฟแสงที่ได้แสดงให้เห็นว่าระบบดาวคู่นี้ตอบสนองแสงในช่วงความยาวคลื่น V ได้ดีที่สุด ตามด้วย R_c , I และ B ตามลำดับ ผลที่ได้สนับสนุนการจัดชนิดสเปกตรัมของสมาชิกดาวฤกษ์ในระบบ โดยการประมาณอุณหภูมิและองค์ประกอบทางเคมีของดาวได้ โดยพบว่าระบบมีความร้อนค่อนข้างสูงแสงสีแดงมากกว่าสีน้ำเงิน นอกจากนี้ยังพบตำแหน่งอุปราคาที่มีแมกนิจูดปรากฏต่างกัน ~ 0.30 โดยผลการบดบังของแสงนี้เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างมวลในระบบ แสดงให้เห็นความสอดคล้องกับระบบดาวคู่ประเภท W UMa และความสว่างที่เฟส ~ 0.25 และ ~ 0.75 มีความสมมาตรกันอย่างยิ่งได้ชัด

นอกจากนี้ยังรวบรวมข้อมูลจากการสังเกตการณ์จากกล้องโทรทรรศน์อวกาศ TESS ล่าสุดในปี พ.ศ. 2565 ผลที่ได้แสดงให้เห็นความสว่างและลักษณะของดาวฤกษ์ที่ถูกเก็บเป็นภาพพิกเซลความละเอียดสูงปรากฏเห็นเป็นระบบดาวคู่แบบใกล้ชิด (Figure 3) ในรังสีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near Infrared; NIR) มีช่วงความยาวคลื่น 600-1000 nm เริ่มต้นโดยการดาวนโหลดและสร้างกราฟแสงที่ไม่ผ่านการประมวลผลซับซ้อนหรือ SAP Flux และสร้างกราฟแสงนอัมไลซ์ (Figure 5) จาก Sector-42, Sector-43 and Sector-44 กราฟแสงที่ได้ทั้งหมดแสดงการแปรแสงในช่วง 4700-6650 W/m² และค่อนข้างสมมาตรที่ตำแหน่งความสว่าง ~6650 W/m² (Figure 4)

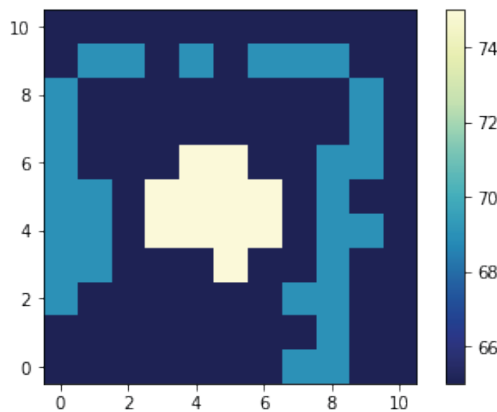


Figure 3 Pixels as an image of TIC 125754458

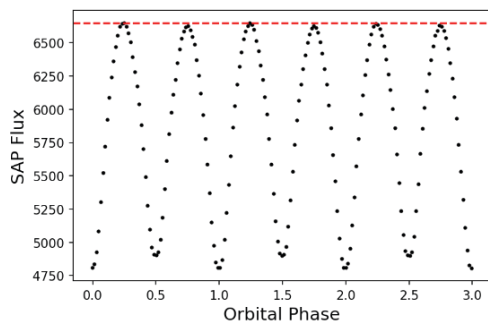


Figure 4 Zoomed-in view to describe the symmetric light curve of TIC 125754458 from the TESS mission8

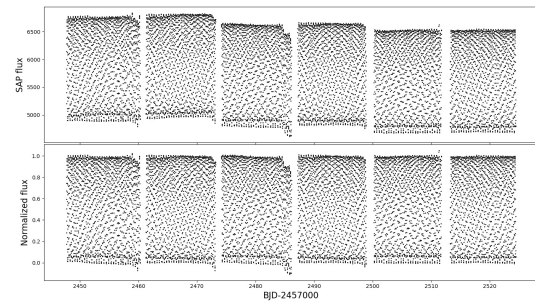


Figure 5 Light curves of TIC 125754458 from TESS mission during BTJD-2459447.690849 to BTJD-2459524.439535 in Sector-42, Sector-43 and Sector-44

3.2. คาบและการเปลี่ยนแปลงคาบการโคจร

ในส่วนนี้เริ่มจากการวิเคราะห์ตำแหน่งอุปราคา-ปฐมภูมิ (Min I) สำหรับข้อมูลสังเกตการณ์ภาคพื้นเล็ทช่วงเวลาเกิดอุปราคา (Min I) ในแต่ละฟิลเตอร์ด้วยวิธีพหุนามกำลังสอง ก่อนนำมาหาค่าเฉลี่ย สำหรับข้อมูล TESS หาค่า Min I จากกราฟแสงใน Figure 5 (ภาพบน) ก่อนรวบรวมกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ นับจากปี พ.ศ. 2536-2560 จำนวน 33 ข้อมูล จากนั้นนำข้อมูลทั้ง 204 ข้อมูล (ภาคพื้น: 1 ข้อมูล, TESS: 170 ข้อมูล, รวบรวม: 33 ข้อมูล) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Epoch กับ Min I (Table 2) โดยชุดข้อมูลแสดงแนวโน้มเป็นเส้นตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้การประมาณค่าด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) ที่อ้างอิงในสมการ (2) และ Figure 6 แสดงผลลัพธ์ไว้ในสมการเส้นตรงอิมเมอร์สใหม่ ที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การทำนาย (R^2) เข้าใกล้ 1 ดังสมการ (3)

$$\text{Min I} = \text{BJD}2456210.849538 \pm (0.002420) + 0.412519 (\pm 0.000001) \times E \quad (3)$$

จากสมการ (3) แสดงให้เห็นว่าระบบดาวคู่นี้มีคาบการโคจรระบบ $0.412519 (\pm 0.000001)$ วันหรือ ~10 ชั่วโมง ก่อนการคำนวณ O-C ได้กำหนดให้วงโคจร

ของระบบเป็นวงกลม ($e : 0$) เพื่อลดความซับซ้อนในขั้นตอนเพื่อตรวจสอบสมมติฐาน เริ่มต้นโดยนำค่า E จากงานวิจัยอ้างอิง คำนวณหาเวลาที่แสงน้อยที่สุด (C) และจากการสังเกตการณ์ (O) สำหรับส่วนนี้ผู้วิจัยเลือกข้อมูลทั้ง Min I และ Min II จำนวน 241 ข้อมูล เพื่อให้ผลการวิเคราะห์การเลื่อนไปของเวลาในแต่ละการโคจรของระบบ หรือค่า $O-C$ ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ผลการวิเคราะห์นั้นแสดงไว้ใน Table 2 ผลของแผนภาพ $O-C$ ที่ได้แสดงลักษณะพาราโบลา ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีการถดถอยพหุนาม (Polynomial regression) ดังแสดงใน Figure 7

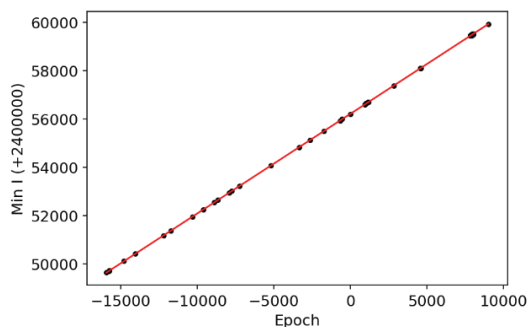


Figure 6 New linear ephemeris graph between optical observation (black circle) and synthetic (red line) during the years 1993-2022

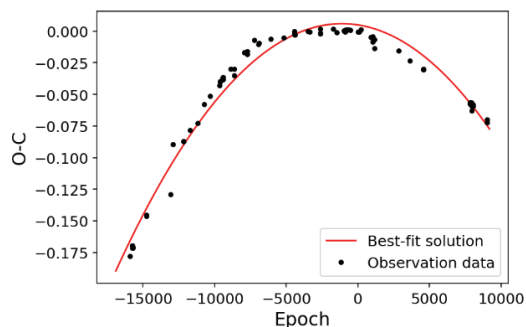


Figure 7 O-C diagram of TIC 125754458

จากกราฟใน Figure 7 แสดงแนวโน้มเป็นพาราโบลาว่า ($a < 0$) ฉะนั้นผู้วิจัยจึงเลือกประมาณค่าเชิงตัวเลขด้วยสมการโพลิโนเมียลลำดับ 2 ผลที่ได้แสดงในสมการ (4)

$$\begin{aligned} O-C = & (-7.841131 \pm 0.000008) \times 10^{-10} E^2 \\ & (-1.736826 \pm 0.000005) \times 10^{-6} E \\ & + (4.957051 \pm 0.000694) \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (4)$$

จากค่าสัมประสิทธิ์ในสมการข้างต้น นำมาคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงคาบโคจรของระบบดาวคู่นี้ จากสมการ $dP/dE = 2a$ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าระบบดาวคู่นี้มีอัตราการคาบการโคจรลดลงอย่างต่อเนื่องที่ $1.354039 \pm 1.3824 \times 10^{-7}$ วันต่อปี

3.3. การมีอยู่ของแสงที่สามในระบบดาวคู่

ในส่วนนี้เป็นการอธิบายเพิ่มเติมเกี่ยวกับความไม่สอดคล้องกันของงานวิจัยที่ผ่านมา เนื่องจากในปี พ.ศ. 2547 Yang and Liu [3] ได้กล่าวถึงการแปรแสงในระบบดาวคู่อัตราส่วนมวลต่ำที่มีลักษณะพิเศษนี้ โดยระบุว่าอาจเป็นผลมาจากปรากฏการณ์โอคอนเนล ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดในกราฟแสงของระบบดาวคู่แบบ W UMa ที่มีวิวัฒนาการแบบแตกต่างกัน ในขณะที่ Qian et al. [7] และ Nelson [8] ระบุว่าระบบดาวคู่นี้ไม่มีผลของปรากฏการณ์ดังกล่าว ดังนั้นเพื่อเป็นการตรวจสอบข้อมูลที่ไม่สอดคล้องกันนี้ ผู้วิจัยจึงต้องตรวจสอบการมีอยู่ของวัตถุที่สามในระบบ ผ่านการวิเคราะห์ส่วนที่เหลือของแสงน้อยที่สุดในขณะที่สมาชิกดาวทั้งสองบดบังกันผ่านทางแผนภาพ $O-C$ เรสซิดิวส์ ดังสมการ (5)

$$(O-C)_2 = (7.3602 \times 10^{-3}) + 0.0251 \sin\left(\pi \left(\frac{E + 21049.5416}{17012.2307} \right)\right) \quad (5)$$

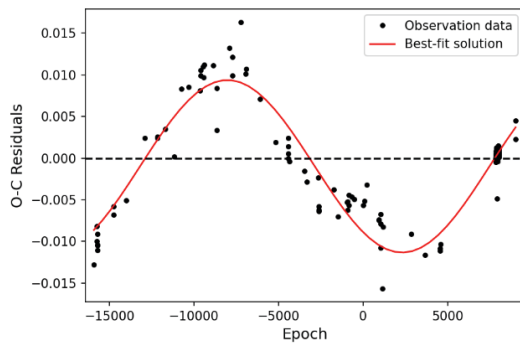


Figure 8 Third light residual diagram of TIC 125754458

กราฟที่ได้แสดงคลื่นที่มีลักษณะเป็นคาบอัมพลิจูด (A) ~ 0.00795 วัน มีค่าครึ่งแกนเอก (Semi-amplitude) ~ 0.00398 สมาชิกดวงที่สามนี้มีระยะทางจากจุดศูนย์กลางระบบดาวคู่อยู่ที่ 2.06×10^{11} เมตรหรือ ~ 1.4 AU โดยมีคาบการโคจรวัตถุที่สาม ~ 20 ปี (Figure 8)

Table 2 All photoelectric photometry and CCD light minimum times

BJD(+2400000)	Epoch	(O-C) ₁	(O-C) ₂	อ้างอิง
49639.73374	-15929.0	-0.1780	-0.01280	[16]
49710.28284	-15758.0	-0.1695	-0.00820	[17]
49710.48734	-15757.5	-0.1712	-0.00997	[17]
49721.42054	-15731.0	-0.1697	-0.00911	[17]
49722.24434	-15729.0	-0.1710	-0.01039	[17]
49722.45054	-15728.5	-0.1710	-0.01046	[17]
49723.27504	-15726.5	-0.1716	-0.01104	[17]
50114.36825	-14778.5	-0.1454	-0.00582	[17]
50115.39865	-14776.0	-0.1463	-0.00677	[17]
50422.32913	-14032.0	-0.1292	-0.00509	[18]
50883.34702	-12914.5	-0.1002	0.00240	[16]
51184.29192	-12185.0	-0.0872	0.00240	[19]
51185.32342	-12182.5	-0.0870	0.00256	[20]
51376.12171	-11720.0	-0.0782	0.00347	[16]
51600.33071	-11176.5	-0.0728	0.00017	[21]
51780.61591	-10739.5	-0.0579	0.00830	[21]

BJD(+2400000)	Epoch	(O-C) ₁	(O-C) ₂	อ้างอิง
51955.32371	-10316.0	-0.0515	0.00851	[21]
52229.45071	-9651.5	-0.0427	0.00810	[21]
52251.11041	-9599.0	-0.0402	0.00991	[3]
52251.31731	-9598.5	-0.0396	0.01054	[3]
52306.59691	-9464.5	-0.0374	0.01097	[16]
52319.38411	-9433.5	-0.0382	0.00971	[22]
52332.58661	-9401.5	-0.0363	0.01122	[16]
52551.84652	-8870.0	-0.0297	0.01116	[23]
52644.04422	-8646.5	-0.0298	0.00842	[16]
52644.65792	-8645.0	-0.0349	0.00332	[16]
52942.92644	-7922.0	-0.0169	0.01323	[24]
53020.06814	-7735.0	-0.0161	0.01211	[7]
53021.09724	-7732.5	-0.0183	0.00988	[7]
53228.39895	-7230.0	-0.0069	0.01630	[16]
53349.46955	-6936.5	-0.0103	0.01014	[25]
53360.60835	-6909.5	-0.0095	0.01071	[25]
53701.76406	-6082.5	-0.0062	0.00709	[25]
54074.88778	-5178.0	-0.0050	0.00189	[26]
54388.61158	-4417.5	-0.0011	0.00139	[27]
54388.61258	-4417.5	-0.0001	0.00239	[27]
54389.43518	-4415.5	-0.0026	-0.00005	[27]
54389.43578	-4415.5	-0.0020	0.00055	[27]
54406.76078	-4373.5	-0.0027	-0.00042	[28]
54781.32997	-3465.5	0.0001	-0.00153	[29]
54832.27507	-3342.0	-0.0007	-0.00284	[30]
55121.86527	-2640.0	0.0018	-0.00232	[31]
55136.50567	-2604.5	-0.0022	-0.00639	[16]
55136.50587	-2604.5	-0.0020	-0.00619	[16]
55136.50627	-2604.5	-0.0016	-0.00579	[16]
55498.90676	-1726.0	0.0019	-0.00378	[32]
55602.23946	-1475.5	-0.0012	-0.00702	[16]
55815.51305	-958.5	0.0006	-0.00530	[33]
55839.43815	-900.5	-0.0003	-0.00623	[33]
55839.43915	-900.5	0.0007	-0.00523	[33]
55870.37755	-825.5	0.0002	-0.00565	[33]
55870.37875	-825.5	0.0014	-0.00445	[33]
55937.41265	-663.0	0.0011	-0.00463	[33]
55992.27715	-530.0	0.0007	-0.00491	[33]
56210.91026	0.0	-0.0007	-0.00564	[34]
56247.41846	88.5	-0.0003	-0.00512	[33]

Table 2 All photoelectric photometry and CCD light minimum times (Continue)

BJD(+2400000)	Epoch	(O-C) ₁	(O-C) ₂	อ้างอิง
56297.74736	210.5	0.0014	-0.00317	[35]
56597.43547	937.0	-0.0049	-0.00747	[37]
56597.43557	937.0	-0.0048	-0.00737	[37]
56643.22127	1048.0	-0.0086	-0.01080	[37]
56643.22417	1048.0	-0.0057	-0.00790	[37]
56643.22537	1048.0	-0.0045	-0.00670	[16]
56690.24307	1162.0	-0.0138	-0.01565	[36]
56692.31307	1167.0	-0.0064	-0.00823	[37]
57387.39681	2852.0	-0.0155	-0.00910	[38]
57718.43452	3654.5	-0.0235	-0.01161	[16]
58095.26274	4568.0	-0.0305	-0.01113	[16]
58095.26304	4568.0	-0.0302	-0.01083	[16]
58107.63884	4598.0	-0.0300	-0.01030	[16]
59447.88271	7847.0	-0.0570	-0.00004	TESS
59448.29521	7848.0	-0.0570	-0.00004	TESS
59448.70803	7849.0	-0.0567	0.00027	TESS
59449.11989	7850.0	-0.0574	-0.00037	TESS
59449.53317	7851.0	-0.0566	0.00040	TESS
59449.94519	7852.0	-0.0571	-0.00008	TESS
59450.35781	7853.0	-0.0570	0.00004	TESS
59450.77053	7854.0	-0.0568	0.00025	TESS
59451.18234	7855.0	-0.0575	-0.00045	TESS
59451.59570	7856.0	-0.0567	0.00041	TESS
59452.00751	7857.0	-0.0574	-0.00028	TESS
59452.42026	7858.0	-0.0571	-0.00003	TESS
59452.83288	7859.0	-0.0570	0.00008	TESS
59453.24483	7860.0	-0.0576	-0.00047	TESS
59453.65754	7861.0	-0.0574	-0.00027	TESS
59454.07016	7862.0	-0.0573	-0.00015	TESS
59454.48274	7863.0	-0.0573	-0.00008	TESS
59454.89571	7864.0	-0.0568	0.00039	TESS
59455.30764	7865.0	-0.0574	-0.00018	TESS
59455.72031	7866.0	-0.0572	-0.00001	TESS
59456.13302	7867.0	-0.0570	0.00019	TESS
59456.54569	7868.0	-0.0569	0.00035	TESS
59456.95834	7869.0	-0.0568	0.00050	TESS
59457.37052	7870.0	-0.0571	0.00018	TESS

Table 2 All photoelectric photometry and CCD light minimum times (Continue)

BJD(+2400000)	Epoch	(O-C) ₁	(O-C) ₂	อ้างอิง
59457.78299	7871.0	-0.0572	0.00014	TESS
59458.19575	7872.0	-0.0569	0.00040	TESS
59458.60836	7873.0	-0.0568	0.00051	TESS
59459.02118	7874.0	-0.0565	0.00082	TESS
59459.43396	7875.0	-0.0562	0.00110	TESS
59459.84643	7876.0	-0.0563	0.00107	TESS
59461.49569	7880.0	-0.0571	0.00031	TESS
59461.90896	7881.0	-0.0564	0.00108	TESS
59462.32100	7882.0	-0.0568	0.00062	TESS
59462.73372	7883.0	-0.0566	0.00083	TESS
59463.14625	7884.0	-0.0566	0.00086	TESS
59463.55808	7885.0	-0.0573	0.00018	TESS
59463.97075	7886.0	-0.0572	0.00035	TESS
59464.38330	7887.0	-0.0571	0.00039	TESS
59464.79522	7888.0	-0.0577	-0.00019	TESS
59465.20853	7889.0	-0.0569	0.00062	TESS
59465.62050	7890.0	-0.0575	0.00008	TESS
59466.03388	7891.0	-0.0566	0.00096	TESS
59466.44595	7892.0	-0.0571	0.00052	TESS
59466.85784	7893.0	-0.0577	-0.00009	TESS
59467.27129	7894.0	-0.0568	0.00086	TESS
59467.68325	7895.0	-0.0573	0.00031	TESS
59468.09670	7896.0	-0.0564	0.00126	TESS
59468.50864	7897.0	-0.0570	0.00069	TESS
59468.92053	7898.0	-0.0576	0.00008	TESS
59469.33389	7899.0	-0.0568	0.00093	TESS
59469.74591	7900.0	-0.0573	0.00045	TESS
59470.15918	7901.0	-0.0565	0.00121	TESS
59470.57101	7902.0	-0.0572	0.00054	TESS
59470.98293	7903.0	-0.0578	-0.00004	TESS
59471.39619	7904.0	-0.0570	0.00072	TESS
59471.80816	7905.0	-0.0576	0.00018	TESS
59472.22071	7906.0	-0.0576	0.00022	TESS
59472.63373	7907.0	-0.0571	0.00074	TESS
59473.04540	7908.0	-0.0579	-0.00009	TESS
59474.28274	7911.0	-0.0581	-0.00026	TESS
59474.69593	7912.0	-0.0574	0.00043	TESS

Table 2 All photoelectric photometry and CCD light minimum times (Continue)

BJD(+2400000)	Epoch	(O-C) ₁	(O-C) ₂	อ้างอิง
59475.10789	7913.0	-0.0580	-0.00012	TESS
59475.52120	7914.0	-0.0572	0.00068	TESS
59475.93326	7915.0	-0.0577	0.00024	TESS
59476.34525	7916.0	-0.0582	-0.00027	TESS
59476.75859	7917.0	-0.0574	0.00056	TESS
59477.17047	7918.0	-0.0580	-0.00006	TESS
59477.58321	7919.0	-0.0578	0.00018	TESS
59477.99582	7920.0	-0.0577	0.00028	TESS
59478.40848	7921.0	-0.0576	0.00044	TESS
59478.82113	7922.0	-0.0574	0.00059	TESS
59479.23324	7923.0	-0.0578	0.00019	TESS
59479.64588	7924.0	-0.0577	0.00033	TESS
59480.05849	7925.0	-0.0576	0.00044	TESS
59480.47123	7926.0	-0.0574	0.00067	TESS
59480.88316	7927.0	-0.0580	0.00010	TESS
59481.29579	7928.0	-0.0579	0.00022	TESS
59481.70845	7929.0	-0.0577	0.00037	TESS
59482.12110	7930.0	-0.0576	0.00052	TESS
59482.53374	7931.0	-0.0575	0.00066	TESS
59482.94642	7932.0	-0.0573	0.00084	TESS
59483.35829	7933.0	-0.0580	0.00020	TESS
59483.77102	7934.0	-0.0578	0.00043	TESS
59484.18374	7935.0	-0.0576	0.00065	TESS
59484.59633	7936.0	-0.0575	0.00073	TESS
59485.00323	7937.0	-0.0631	-0.00487	TESS
59485.42162	7938.0	-0.0572	0.00101	TESS
59485.83315	7939.0	-0.0582	0.00003	TESS
59487.48359	7943.0	-0.0578	0.00047	TESS
59487.89634	7944.0	-0.0576	0.00071	TESS
59488.30899	7945.0	-0.0575	0.00086	TESS
59488.72082	7946.0	-0.0582	0.00018	TESS
59489.13425	7947.0	-0.0573	0.00111	TESS
59489.54625	7948.0	-0.0578	0.00060	TESS
59489.95952	7949.0	-0.0570	0.00137	TESS
59490.37150	7950.0	-0.0576	0.00085	TESS
59490.78353	7951.0	-0.0580	0.00037	TESS
59491.19675	7952.0	-0.0574	0.00109	TESS

Table 2 All photoelectric photometry and CCD light minimum times (Continue)

BJD(+2400000)	Epoch	(O-C) ₁	(O-C) ₂	อ้างอิง
59491.60866	7953.0	-0.0580	0.00050	TESS
59492.02125	7954.0	-0.0579	0.00058	TESS
59492.43395	7955.0	-0.0577	0.00077	TESS
59493.25920	7957.0	-0.0575	0.00102	TESS
59493.67117	7958.0	-0.0580	0.00049	TESS
59494.08309	7959.0	-0.0586	-0.00010	TESS
59494.49628	7960.0	-0.0580	0.00059	TESS
59494.90824	7961.0	-0.0585	0.00005	TESS
59495.32152	7962.0	-0.0578	0.00082	TESS
59495.73339	7963.0	-0.0584	0.00019	TESS
59496.14534	7964.0	-0.0590	-0.00036	TESS
59496.55867	7965.0	-0.0582	0.00046	TESS
59496.97062	7966.0	-0.0587	-0.00009	TESS
59497.38315	7967.0	-0.0587	-0.00007	TESS
59497.79592	7968.0	-0.0585	0.00019	TESS
59498.20866	7969.0	-0.0582	0.00043	TESS
59498.62080	7970.0	-0.0586	0.00008	TESS
59500.68394	7975.0	-0.0581	0.00069	TESS
59501.09589	7976.0	-0.0586	0.00014	TESS
59501.50865	7977.0	-0.0584	0.00039	TESS
59501.92128	7978.0	-0.0583	0.00053	TESS
59502.33393	7979.0	-0.0582	0.00067	TESS
59502.74666	7980.0	-0.0579	0.00089	TESS
59503.15859	7981.0	-0.0585	0.00032	TESS
59503.57129	7982.0	-0.0583	0.00052	TESS
59503.98389	7983.0	-0.0583	0.00061	TESS
59504.39664	7984.0	-0.0580	0.00086	TESS
59504.80932	7985.0	-0.0579	0.00103	TESS
59505.22121	7986.0	-0.0585	0.00042	TESS
59505.63388	7987.0	-0.0583	0.00059	TESS
59506.04647	7988.0	-0.0583	0.00067	TESS
59506.45921	7989.0	-0.0581	0.00090	TESS
59506.87190	7990.0	-0.0579	0.00110	TESS
59507.28384	7991.0	-0.0585	0.00053	TESS
59507.69650	7992.0	-0.0583	0.00069	TESS
59508.10915	7993.0	-0.0582	0.00084	TESS
59508.52193	7994.0	-0.0579	0.00111	TESS

Table 2 All photoelectric photometry and CCD light minimum times (Continue)

BJD(+2400000)	Epoch	(O-C) ₁	(O-C) ₂	อ้างอิง
59508.93455	7995.0	-0.0578	0.00123	TESS
59509.34649	7996.0	-0.0584	0.00066	TESS
59509.75984	7997.0	-0.0576	0.00151	TESS
59510.17173	7998.0	-0.0582	0.00089	TESS
59510.58444	7999.0	-0.0580	0.00110	TESS
59510.99731	8000.0	-0.0577	0.00147	TESS
59511.40904	8001.0	-0.0584	0.00069	TESS
59513.47138	8006.0	-0.0587	0.00052	TESS
59513.88400	8007.0	-0.0586	0.00063	TESS
59514.29671	8008.0	-0.0584	0.00084	TESS
59514.70857	8009.0	-0.0591	0.00019	TESS
59515.12193	8010.0	-0.0582	0.00105	TESS
59515.53390	8011.0	-0.0588	0.00051	TESS
59515.94646	8012.0	-0.0587	0.00057	TESS
59516.35902	8013.0	-0.0587	0.00063	TESS
59516.77100	8014.0	-0.0592	0.00010	TESS
59517.18438	8015.0	-0.0584	0.00098	TESS
59517.59633	8016.0	-0.0589	0.00043	TESS
59518.00975	8017.0	-0.0580	0.00134	TESS
59518.42157	8018.0	-0.0587	0.00066	TESS
59518.83353	8019.0	-0.0593	0.00012	TESS
59519.24696	8020.0	-0.0584	0.00104	TESS
59519.65885	8021.0	-0.0590	0.00043	TESS
59520.07145	8022.0	-0.0589	0.00052	TESS
59520.48407	8023.0	-0.0588	0.00064	TESS
59520.89603	8024.0	-0.0594	0.00010	TESS
59521.30939	8025.0	-0.0585	0.00096	TESS
59521.72125	8026.0	-0.0592	0.00032	TESS
59522.13396	8027.0	-0.0590	0.00052	TESS

Table 2 All photoelectric photometry and CCD light minimum times (Continue)

BJD(+2400000)	Epoch	(O-C) ₁	(O-C) ₂	อ้างอิง
59522.54663	8028.0	-0.0588	0.00068	TESS
59522.95862	8029.0	-0.0594	0.00017	TESS
59523.37208	8030.0	-0.0584	0.00113	TESS
59523.78401	8031.0	-0.0590	0.00055	TESS
59524.19677	8032.0	-0.0588	0.00081	TESS
59934.22838	9026.0	-0.0701	0.00450	BVR _c
59933.19488	9023.5	-0.0723	0.00225	BVR _c

3.3. องค์ประกอบทางกายภาพและแบบจำลอง

การวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของดาวเป้าหมายเพื่อหาค่าอัตราส่วนมวล (Mass ratio; q) ที่เป็นไปได้จากการสังเกตจากค่า χ^2 โดยวิเคราะห์ผลผ่านการทดสอบการแจกแจงของข้อมูลด้วยวิธีทดสอบไคสแควร์ (Chi-square test) ผ่านทางกราฟแสงที่ได้จากการสังเกตการณ์เทียบกับแบบจำลองทางฟิสิกส์หรือสร้างกราฟแสงสังเคราะห์ผ่านซอฟต์แวร์ PHOEBE โดยข้อมูลทั้งสองต้องมีความสอดคล้องกัน เริ่มต้นจากการกำหนดตัวแปรเริ่มต้น (Default Parameter) เพื่อให้การลู่เข้าของผลลัพธ์เป็นไปอย่างถูกต้องแม่นยำ ได้แก่ P_0 , BJD_0 , i , q , Ω_{in} , Ω_{out} , $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$, T_1 , T_2 , X_1 , X_2 , Y_1 , Y_2 , A_2 , A_2' , g_1 , g_2 , f เป็นต้น ในที่นี้ได้กำหนด q ตั้งแต่ 0.15-0.25 ที่อ้างอิงจากงานวิจัยของ Qian et al. [7] และ Nelson [8] และจากผลการศึกษาทางแสงของระบบดาวคู่แบบตะกันเชิงลึกที่มีอัตราส่วนมวลต่ำ (Deep, low-mass ratio; DLMR) ได้ผลการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนมวลระบบที่เป็นไปได้ ในช่วง 0.17-0.18 เนื่องจากมีแนวโน้ม χ^2 ต่ำที่สุด หรือข้อมูลเหมาะสมที่สุดสำหรับการอธิบายข้อมูลการสังเกตการณ์นี้ (Figure 9)

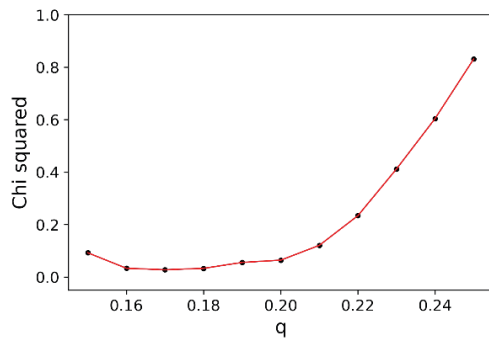


Figure 9 Mass ratio of TIC 125754458

ผลที่ได้ใน Figure 9 วิเคราะห์ข้อมูลซ้ำอีกครั้ง เพื่อหาผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำ โดยการเพิ่มความละเอียดในเลขนัยสำคัญของพารามิเตอร์เริ่มต้นทั้งหมด ผลปรากฏค่า Chi2 ต่ำที่สุดประมาณ 0.021 นั้นแสดงให้เห็นว่าระบบดาวคู่นี้มีค่าอัตราส่วนมวลที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.1710 ± 0.0004 และแสดงค่าองค์ประกอบทางกายภาพที่ดีที่สุดของระบบดาวคู่ทั้งหมดไว้ใน Table 3

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นชัดว่าระบบดาวคู่อุปราคาทำให้เกิดการบังกันแบบบางส่วนที่มีระนาบความเอียงของวงโคจรระบบตามแนวขวางกับตาผู้สังเกตการณ์ (i) เท่ากับ 76.75 องศา หากพิจารณาค่าศักย์ภายในและภายนอกพื้นผิวสมคักย์ที่จุดลากรางจตามแบบจำลองของโรชส์ (Roche's model) ใกล้เคียงกันอยู่ที่ 2.159 ± 0.007 และ 2.049 ± 0.012 ตามลำดับ กล่าวคือดาวปฐุมภูมิจะถ่ายโอนมวลและความร้อนสู่ดาวทุติยภูมิ ซึ่งมีความสอดคล้องกับอุณหภูมิพื้นผิวดที่ชั้นโฟโตสเฟียร์ของดาวปฐุมภูมิและดาวทุติยภูมิอยู่ที่ 5940 ± 2.8 เคลวิน และ 5853 ± 10.0 เคลวิน ตามลำดับ โดยมีความสว่างพื้นผิวดาวฤกษ์เป็น 0.959 และ 0.781 mag/arcsec² ตามลำดับ (Figure 10)

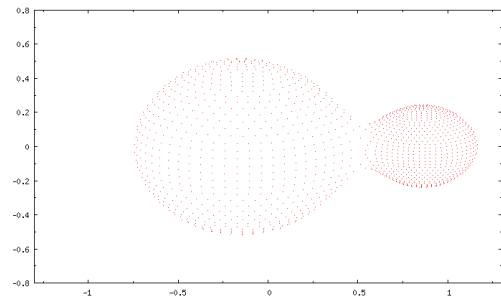


Figure 10 Model of eclipsing binary (phase 0.25) of TIC 125754458

จากข้อมูลใน Table 3 หองศาการแตะกันของระบบดาวคู่ (Fill-out factor; f) จากสมการ (6)

$$f = (\Omega_{in} - \Omega) / (\Omega_{in} - \Omega_{out}) \quad (6)$$

ผลที่ได้พบว่าระบบดาวคู่นี้ร้อยละองศาการแตะกันของสมาชิกดาวฤกษ์อยู่ที่ 60.98 หากเทียบกับการศึกษาที่ผ่านมา แสดงให้เห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปสมาชิกดาวฤกษ์ในระบบมีการแตะกันมากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามวิวัฒนาการของระบบดาวคู่แบบแตะกันเชิงลึก (DLMR) ที่มีถ่ายเทมวลของสมาชิกในระบบดาวคู่ที่มีความพันธ์กับเวลาจากสมการ $\frac{dm}{dE} = \frac{m_1 m_2}{3P(m_1 + m_2)} = 3.530 \times 10^{-7}$ เท่าของมวลดวงอาทิตย์ต่อปี

Table 3 Physical composition of TIC 125754458

Parameters	Best solution (Star)		Unit
	Primary	Secondary	
$\xi_1 = \xi_2$ (Assumed)	0.32		-
$A_1 = A_2$ (Assumed)	0.50		-
Ω_{in}	2.159±0.007		-
Ω_{out}	2.049±0.012		-
$\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$	2.092±0.006		-
$q (m_2/m_1)$	0.1710±0.0004		-
i	76.95±0.26		degree
$T (T_1 : \text{Assumed})$	5940±2.8	5853±10	K
Surf. Bright	0.959	0.781	mag/arc ²
$M (M_{sun})$	1.405	0.240	Mo
$R (R_{sun})$	1.539	0.734	Ro
M_{bol}	5.403	3.730	mag
Log (g)	4.211	4.087	cgs
Chi2 (B)	0.0209		
Chi2 (V)	0.0225		
Chi2 (R_c)	0.0203		
Chi2 (I_c)	0.0202		

จากการเปรียบเทียบข้อมูลบางส่วนของระบบดาวแบบแต่ละกันลิกระบบอื่นสามารถแสดงความสอดคล้องกันของระบบดาวคู่แบบแต่ละกันเชิงลึกที่เป็นไปตามทฤษฎี AML (Table 4)

Table 4 Comparison of physical composition

Target star	q	f (%)	Ref.
TIC 265015162 (FG Hya)	0.11	86.0	[1]
TIC 26102953 (GR Vir)	0.12	79.0	[2]
TIC 101645013 (V728 Her)	0.16	81.0	[3]
TIC 320852086 (TV Mus)	0.17	74.3	[4]
TIC 125754458 (CU Tau)	0.179	49.0	[5]
	0.177	50.1	[6]
	0.171	61.0	[7]

4. บทสรุป

จากการสังเกตการณ์ทางแสงของระบบดาวคู่ TIC 125754458 พบว่ากราฟแสงมีลักษณะสมมาตรในช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ที่มีลักษณะการบังกันแบบเต็มดวง (Total eclipse) ที่มีคาบการโคจรระบบล่าสุด 0.4125190±0.0000009 วัน จากผลการวิเคราะห์วิวัฒนาการพบว่าจัดระบบดาวคู่แบบแต่ละกันลึก ประเภท W UMa ชนิดย่อย A กล่าวคือดาวปฐมภูมิมีมวลและรัศมีมากกว่าดาวทุติยภูมิ โดยมีอัตราส่วนมวลต่ำ และร้อยละองศาการแต่ละกันสูง (f) ที่นำไปสู่การทำความเข้าใจวิวัฒนาการดาวคู่ช่วงท้ายที่เป็นไปตามทฤษฎี AML อันเกิดจากการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมผ่านลมดาว (Stellar wind loss) ที่ออกจากพื้นผิวดาวอย่างต่อเนื่อง เมื่อลมดาวฤกษ์พัดพาอนุภาคออกจากดาวอนุภาคเหล่านั้นจะลากพลังการหมุนของดาวติดออกไปด้วย ส่งผลให้ทั้งดาวและระบบดาวคู่สูญเสียพลังงานการหมุน จนวงโคจรของดาวทั้งสองเริ่มหดสั้นลงเมื่อเวลาผ่านไป [39] นอกจากนี้ยังมีการถ่ายโอนมวลและโมเมนตัมระหว่างสมาชิกดาวฤกษ์ในระบบ (Mass and angular momentum transfer) กล่าวคือ เมื่อระบบคู่มีระยะใกล้กันเพียงพอ การถ่ายโอนมวลจากดาวดวงหนึ่งไปยังอีกดวงผ่านจุดลากจูงจะเกิดขึ้น โดยกระบวนการนี้ส่งผลกระทบต่อโมเมนตัมเชิงมุมของระบบ เนื่องจากมวลที่ถ่ายโอนเปลี่ยนแปลงการกระจายมวลและพลังงานในระบบ โดยการถ่ายโอนมวลสามารถเพิ่มหรือสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมโดยรวมของระบบ ขึ้นอยู่กับทิศทางของมวลที่เคลื่อนที่เมื่อสมาชิกดาวในระบบเกิดการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม อาจนำไปสู่การรวมตัวกันของดาวในระบบ (Merger) หรือทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่ดาวคู่มีการปะทุ เช่น Nova หรือ Supernova ในบางกรณี เมื่อสมาชิกดาวปฐมภูมิและดาวทุติยภูมิเติมผิวห่อหุ้มของโรซ์และอยู่ในแถบลำดับหลักตามแผนภาพแฮร์ตสปรอง-รัสเซล (H-R diagram) ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของดาวเดี่ยวที่หมุนรอบตัวเองสูงมาก (Blue straggler stars) อีกทั้งยังพบว่าระบบดาวคู่ TIC 125754458 คาดว่าอาจมีวิวัฒนาการในระบบมากกว่าผล

ของโอคอนเนลตามที่เคยตั้งสมมติฐานก่อนหน้านี้ กล่าวคือหากพิจารณาปัจจัยที่เกิดจากการบิดเบี้ยวของ สมาชิกดาว (Tidal distortion) โดยแรงโน้มถ่วงระหว่าง ดาวคู่สามารถทำให้เกิดการบิดเบี้ยวหรือการเปลี่ยนรูปร่างของดาวทั้งสองได้ ทำให้พื้นที่การแผ่รังสีเปลี่ยนไปตามตำแหน่งของดาวในวงโคจร ซึ่งส่งผลให้แสงสว่างที่สังเกตการณ์ได้ในช่วง Max I และ Max II แตกต่างกัน (เฟสประมาณ 0.25 และ 0.75) นอกจากนี้หากพิจารณาปัจจัยที่มาจากเกิดการเกิดจุดบนดาว (Starspots) หรือบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยรอบ บนพื้นผิวดาวอาจส่งผลให้เกิดความไม่สมมาตรในแสงดาวปล่อยออกมา หากจุดดาวเหล่านี้อยู่ในตำแหน่งที่ทำให้ดาวทั้งสองมีความสว่างแตกต่างกันในขณะที่โคจรรอบกัน ก็อาจส่งผลให้เกิดผลของโอคอนเนลได้ โดยผลการวิเคราะห์กราฟแสงของระบบดาวคู่นี้ค่อนข้างมีความสมมาตรและพบว่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดใน Table 3 มีแนวโน้มความเป็นไปได้ของผลจากปรากฏแสงที่สามอันเกิดจากจุดบนดาวตามที่เกิดการผันแปรต่ำมาก โดยพิจารณาจากความสอดคล้องของการวิเคราะห์ระหว่างข้อมูลสังเกตการณ์กับข้อมูลสังเคราะห์ที่แสดงในค่า χ^2 น้อยมากประมาณ 0.02 แต่มีความเป็นไปได้ว่ามีวัตถุที่สามในระบบดาวคู่นี้เนื่องมาจากการเลื่อนตำแหน่งของกลางอุปราคาในระบบดาวคู่ที่แสดงรูปแบบเป็นคลื่นไซน์อย่างเห็นได้ชัด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณนักวิชาการประจำหอดูดาวเฉลิมพระเกียรติ 7 รอบ พระชนมพรรษา นครราชสีมา สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่อนุเคราะห์เครื่องมือสังเกตการณ์ ขอขอบคุณผู้ช่วยสังเกตการณ์และวิเคราะห์ ประกอบด้วยคุณศิริลักษณ์สถาน คุณสุกษชา ยุติโสสง คุณภูมิพงษ์ ยุทธนาสิริกุล และคุณธนพัฒน์ วงศ์บุญเรือง และมหาวิทยาลัยราชภัฏ-บุรีรัมย์ที่อนุเคราะห์สนับสนุนทุนวิจัย

6. References

- [1] Binnendijk, L. (1950). Photographic lightcurves of AH Tauri and a new variable He 556. *Bull. Astron. Inst. Neth*; 11: P.209.
- [2] Kholopov, P. N., Samus, N. N., Frolov, M. S., Goranskij, V. P., Gorynya, N. A., Kireeva, N. N., Kukarkina, N. P., Kurochkin, N. E., Medvedeva, G. I. and Perova, N. B. (1988). *VizieR Online Data Catalog: General Catalog of Variable Stars*, 4th Ed. (GCVS4), Available Source: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1996yCat.2139...0K/abstract> December 10, 2023.
- [3] Yang, Y. G. and Liu, Q. (2004). CU Tauri: A W UMa-type system with a small mass ratio. *Astrophys. Space Sci*, 289(1), 137-145.
- [4] Wilson, R. E. and Devinney, E. J. (1971). Realization of accurate close-binary light curves: Application to MR Cygni, *Astrophys. J*, 166, 605-619.
- [5] Wilson, R. E. (1990). Accuracy and efficiency in the Binary star reflection effect. *Astrophys. J*, 356, 613-622.
- [6] Davidge, T. J. and Molone, E. F. (1984). A study of the O'Connell effect in the light curves of eclipsing binaries. *Astrophys. J. Suppl. Ser*, 55 (1), 571-584.
- [7] Qian, S. B., Yang, Y. G., Soonthornthum, B., Zhu, L. Y., He, J. J. and Yuan, J. Z., 2005, Deep, Low mass ratio Overcontact binary system. III. Cu Tauri and TV Muscae. *Astrophys. J*, 130(1), 224-233.
- [8] Nelson, R.H. (2013). *Inf. Bull. Var. Stars*, 6018, 1.

- [9] Kallrath, J., Milone, E. F., Terrell, D. and Young, A. T. (1998). Recent improvements to a version of the wilson-devinney program. *Astrophys. J.*, 508(1), 308-313.
- [10] Zhang, X. B., Zhang, R. X. and Deng, L. (2005). Photometric study of AH cancri, a wUMa-type system in M67. *Astrophys. J.*, 129(2), 979-984.
- [11] He, J., Qian, S. B. and Soonthornthum, B. (2011). New Progress on High Fill-Out, Extreme Mass Ratio Overcontact Binary Systems. *Proceedings of the 9th Pacific Rim Conference on Stellar Astrophysics (PRCSA2011)*, 14-20 Apr 2011, Lijiang, China.
- [12] Zhu, L. Y., Qian, S. B., Soonthornthum, B. and Yang, Y. G. (2006). Deep, low mass ratio overcontact binaries. II. IK persei. *Astrophys. J.*, 129(6), 2806-2814.
- [13] Crispim, J. T. M., Ramos, G. S., Amorim, R. G. S. B. de, Aguiar, J. L. A., and Brito, A. C. de. (2023). Para Proceedings 4. Sociedade Astronômica Brasileira (SAB). Retrieved from Available Source: <https://sab-astro.org.br/wp-content/uploads/2023/04/ParaProceedings-4.pdf> December 10, 2023.
- [14] Space Telescope Science Institute. (n.d.). Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST). (2023). Available Source: <https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html> December 10, 2023.
- [15] Prša, P., Conroy, K. E., Horvat, M., Pablo, H., Kochoska, A., Bloemen, S., Giammarco, J., Hambleton, K. M., Degroote, P., and Batalha, D. G. (2012). PHOEBE: A software package for modeling eclipsing binaries. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 201(2), 1-29.
- [16] Nelson, R.H. (2017). *Inf. Bull. Var. Stars*, 6234, 1.
- [17] Agerer, F. and Hübbscher, J. (1997). *Inf. Bull. Var. Stars*, 4472, 1.
- [18] Agerer, F. and Hübbscher, J. (1998). *Inf. Bull. Var. Stars*, 4562, 1.
- [19] Agerer, F. Dahm, M. and Hübbscher, J. (1999). *Inf. Bull. Var. Stars*, 4912, 1.
- [20] Agerer, F. and Hübbscher, J. (2000). *Inf. Bull. Var. Stars*, 4912, 1.
- [21] Agerer, F. and Hübbscher, J. (2002). *Inf. Bull. Var. Stars*, 5296, 1.
- [22] Agerer, F. and Hübbscher, J. (2003). *Information Bulletin on Variable Stars*, 5484, 1.
- [23] Nelson, R.H. (2003). *Inf. Bull. Var. Stars*, 5371, 1.
- [24] Nelson, R.H. (2004). *Inf. Bull. Var. Stars*, 5493, 1.
- [25] Hübbscher, J., Aston P. and Walter, F. (2005). *Inf. Bull. Var. Stars*, 5657, 1.
- [26] Nelson, R.H. (2006). *Inf. Bull. Var. Stars*, 5672, 1.
- [27] Brát, L., Šmelcer, L., Kučáková, H., Ehrenberger, R., Kocián, R., Lomoz, F., Urbančok, L., Svoboda, P., Trnka, J., Marek, P., Dřevěný, R., Uhlář, R., Poddaný, S., Zasche, P. and Skarka, M. (2008). B.R.N.O. Time of minimum. *Open. Eur. J. Var. stars*, 0094.

- [28] Nelson, R.H. (2008). *Inf. Bull. Var. Stars*, 5760, 1.
- [29] Hübscher, J., Aston P. and Walter, F. (2009). *BAV Mitteilungen*, 203, 1.
- [30] Hübscher, J. (2014). *Inf. Bull. Var. Stars*, 6118, 1.
- [31] Diethelm, R. (2010). *Inf. Bull. Var. Stars*, 5920, 1.
- [32] Diethelm, R. (2011). *Inf. Bull. Var. Stars*, 6011, 1.
- [33] Honkova, K., Jurysek, J., Lehky, M., Smelcer, L., Trnka, J. and Masek, M. (2013). *B.R.N.O. Time of minimum. Open. Eur. J. Var. stars*, 0160, 1.
- [34] Nelson, R.H. (2013). *Inf. Bull. Var. Stars*, 6050, 1.
- [35] Diethelm, R. (2013). *Inf. Bull. Var. Stars*, 6063, 1.
- [36] Basturk, O., Bahar, E., Senavci, H. V., Kilicoglu, T., Ozavci, I., Burdanov, A., Yilmaz, M., Caliskan, S., Tezcan, C. T., Yorukoglu, O., Ozkeles, A., Izci, D. D., Gumus, D., Avci, Z., Ozturk, D., Selam, S. O., Ekmekci, F. and Albayrak, B. (2014). *Inf. Bull. Var. Stars*, 6125, 1.
- [37] Honkova, K., Jurysek, J., Lehky, M., Smelcer, L., Trnka, J. and Masek, M. (2014). *B.R.N.O. Time of minimum of eclipsing binary. Open. Eur. J. Var. Stars*, 0165, 1.
- [38] Juryšek, J., Hoňková, K., Šmelcer, L., Mašek, M., Lehký, M., Bílek, F., Mazanec, J., Hanžl, D. and Magris, M. (2017). *B.R.N.O. Time of minimum. Open. Eur. J. Var. Stars*, 0179, 1.
- [39] Erkan, N. and Ulaş, B. (2016). The low mass ratio contact binary system V728 Herculis. *New Astron. Rev*, 46(1), 73-77.
- [40] Eaton, J. A. (2016). AW ursae majoris: a semidetached mass-transferring system indeed?. *Mon. Not. R. Astron. Soc*, 457(1), 836-843.
- [41] Wolf, M. (2014). Light-time effect as a valuable tool in stellar astrophysics. *Contrib. Astron. Obs. Skaln. Pleso*, 43(3), 493-497.
- [42] Rangsunghoen, T. (2015). Third body and evolution of a binary system FZ orionis. *KKU. Sci. J*, 43 (2), 333-345. (in Thai)
- [43] Honkova, K., Jurysek, J., Lehky, M., Smelcer, L., Masek, M. and Mazanec, J. (2015). *B.R.N.O. Time of minimum. Open. Eur. J. Var. Stars*, 0168, 1.
- [44] Soonthornthum, B. (2007). Thailand: Astro-physics. National Astronomical Research Institute of Thailand Ministry of Science and Technology.
- [45] University of Strasbourg/CNRS. Simbad Astronomical Database. (2020). Available Source: <https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=%09TIC+125754458&submit=SIMBAD+search> December 10, 2023.
- [46] Mass Ratio and Spot Parameter Estimation from Eclipsing Binary Star Light Curves Terrell, D. (2022). *Galaxie*, 10(1), 8.