



การวิเคราะห์กราฟแสงจากตัวอย่างข้อมูลดาวคู่อุปราคาประเภทดับเบิลยูเออร์ซามาเจอร์ริส  
ของโครงการสำรวจอัตโนมัติบนท้องฟ้าทั้งหมดสำหรับซูเปอร์โนวาในกลุ่มดาวหมีเล็ก  
Light Curve Analysis of All-Sky Automated Survey for Supernovae Data on  
a Sample of W Ursae Majoris Eclipsing Binary Stars in the  
Constellation Ursa Minor

ปฐมพงษ์ พันธุ์พิบูลย์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จ. มหาสารคาม 44000

Patapong Panpiboon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Physic, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Mahasarakham University, Mahasarakham, 44000 Thailand

E-mail: ppanpiboon@gmail.com

Received: 5 April 2021 | Revised: 2 August 2021 | Accepted: 30 August 2021

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบดาวคู่อุปราคาประเภทดับเบิลยู เออร์ซามาเจอร์ริส ในกลุ่มดาวหมีเล็ก 15 ระบบด้วยตัวอย่างข้อมูลจาก The ASAS-SN Catalog of Variable Stars ใช้การวิเคราะห์กราฟแสงบนพื้นฐานการคำนวณจาก Wilson–Devinney algorithm ด้วยโปรแกรม PHOEBE พบว่า ทั้ง 15 ระบบเป็นดาวคู่อุปราคาประเภทดับเบิลยู เออร์ซามาเจอร์ริส ชนิด A มีอัตราส่วนมวลน้อยกว่า 1 ทุกระบบ ขนาดของดาวปฐมภูมิใหญ่กว่าดาวทุติยภูมิทุกระบบ กราฟแสงของระบบดาวคู่ AT UMi แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิยังผลของดาวทุติยภูมิมากกว่าดาวปฐมภูมิ ขนาดของดาวทุติยภูมิใหญ่กว่าดาวฤกษ์ในช่วงวิวัฒนาการ ZAMS เมื่อมีมวลเท่ากัน ดาวสมาชิกทั้งสองของทุกระบบดาวคู่อยู่ในแถบลำดับหลัก ระบบดาวคู่ AP UMi และ RZ UMi มีจุดเย็นบนดาวทุติยภูมิ ร้อยละองศาการแตะกัน ค่าการขยับไปของเฟส และค่ามุมเอียงของระนาบวงโคจรสอดคล้องกับแบบจำลองโครงสร้างของระบบดาวคู่

### ABSTRACT

In This research, I study fifty W Ursae Majoris eclipsing binaries of constellation Ursa Minor from a sample of the ASAS-SN Catalog of Variable Stars. The light curve with PHOEBE program based on the Wilson–Devinney algorithm was used. The results show that the fifty systems are the A-subtype of W Ursae Majoris eclipsing binary. I found the mass ratio of all systems less than 1. The primary component of all systems is the massive one. The light curve of AT UMi binary displays the effective temperature of secondary component more than primary component. The secondary components of all systems have radii larger than ZAMS evolutionary of about the same mass. The all of stars sample are the main sequence stars. The cool spots appear on the secondary component of

the AP UMi and the RZ UMi binary. The degree of contact, the phase shift and the orbital inclination of all systems are corresponding to the geometric structure modeling.

**คำสำคัญ:** ดาวคู่อุปราคา ดับเบิลยู เออร์ซาเมเจอร์ิส กลุ่มดาวหมีเล็ก แบบจำลองกราฟแสง วิวัฒนาการของดาวฤกษ์

**Keywords:** Eclipsing binary, W Ursae Majoris, Ursa Minor Constellation, Light curve modeling, Stellar Evolution

## บทนำ

การศึกษาเกี่ยวกับระบบดาวคู่อุปราคา (eclipsing binaries) เป็นกระบวนการวิจัยที่ทำให้เราทราบถึงคุณสมบัติพื้นฐานของดาวฤกษ์ได้อย่างแม่นยำ การวิเคราะห์กราฟแสง (light curves) ช่วยให้เราคำนวณมวล (mass) อุณหภูมิยังผล (effective temperatures) รวมถึงกำลังส่องสว่าง (luminosities) ของดาวฤกษ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ คุณสมบัติพื้นฐานเหล่านี้ทำให้เราเรียนรู้วิวัฒนาการของดาวฤกษ์ (stellar evolutionary) โดยอาศัยการวิเคราะห์และการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยคอมพิวเตอร์

ดาวแปรแสงดับเบิลยู เออร์ซาเมเจอร์ิส (W Ursae Majoris; W Uma) ถูกค้นพบและบันทึกไว้ในปี ค.ศ. 1900 โดย Muller and Kempf (1903) ในอีก 19 ปีต่อมา Adams and Joy (1919) ชี้ให้เห็นว่าดับเบิลยู เออร์ซาเมเจอร์ิส เป็นระบบดาวคู่อุปราคา ปัจจุบันมีการค้นพบระบบดาวคู่ประเภทนี้มากกว่า 76,000 คู่ ซึ่งได้รวบรวมเป็นข้อมูลขนาดใหญ่บนฐานข้อมูลออนไลน์ ASAS-SN Variable Stars Database (asas-sn.osu.edu/variables)

ระบบดาวคู่ชนิดอุปราคาดับเบิลยู เออร์ซาเมเจอร์ิส (W UMa type; EW) มีคาบการโคจร (orbital periods) รอบจุดศูนย์กลางมวล (center of mass) ของระบบน้อยกว่า 1 วัน ดาวสมาชิกทั้งสองมีลักษณะเป็นทรงรีซึ่งอยู่ใกล้กันมากจนพื้นผิวของดาวสมาชิกทั้งสองอาจแตะกัน ผลจากการสังเกตการณ์ด้วยการวิเคราะห์กราฟแสงพบว่า ความลึกของกราฟแสงในขณะที่ดาวสมาชิกบังกันซึ่งแบ่งออกเป็นสองประเภท (อุปราคาปฐมภูมิและอุปราคาทุติยภูมิ) จะมีค่าใกล้เคียงกัน (Malatesta, 2021) โดยทั่วไประบบดาวคู่ชนิดนี้จะมีประเภทของสเปกตรัม (spectral types) ในช่วง F G และ K

เครือข่ายกล้องโทรทรรศน์อัตโนมัติ All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) ประกอบไปด้วยกล้องโทรทรรศน์ระบบอัตโนมัติ 24 ตัว เพื่อใช้สำรวจดาวฤกษ์บนท้องฟ้ารวมถึงสังเกตปรากฏการณ์ซูเปอร์โนวา ผ่านแผ่นกรองแสง

ในช่วงย่านที่ตามองเห็น (visual filter, V) ข้อมูลภาพถ่ายใช้วิเคราะห์ด้วยการเรียนรู้เครื่อง (machine learning) สำหรับการจำแนกประเภทจากการคำนวณคาบการแปรแสงของดาวฤกษ์ อีกทั้งยังได้จำแนกดาวแปรแสงที่รู้จักเป็นอย่างดี จำนวน 412,000 ดวง ซึ่งสอดคล้องกับดาวแปรแสงในฐานข้อมูลออนไลน์ The International Variable Star Index (VSX) Database ของสมาคมผู้สังเกตการณ์ดาวแปรแสงแห่งอเมริกา (The American Association of Variable Star Observers, AAVSO) (Jayasinghe et al. 2018)

ในบทความนี้ผู้วิจัยใช้ตัวอย่างข้อมูลจากฐานข้อมูลออนไลน์ ASAS-SN Variable Stars Database เพื่อศึกษาระบบดาวคู่อุปราคาประเภทดับเบิลยู เออร์ซาเมเจอร์ิส ในกลุ่มดาวหมีเล็ก (Ursa Minor, UMi) ซึ่งถูกรวบรวมไว้ทั้งหมด 15 ระบบ โดยการวิเคราะห์กราฟแสงบนพื้นฐานการคำนวณจาก Wilson-Devinney algorithm (Wilson and Devinney, 1971) ด้วยโปรแกรม PHOEBE (Prša and Zwitter, 2005) ผลเฉลยของพารามิเตอร์ (parameter solutions) จากการคำนวณด้วยโปรแกรมแสดงให้เห็นคุณสมบัติพื้นฐานของดาวสมาชิกในระบบดาวคู่ อีกทั้งยังใช้อธิบายวิวัฒนาการของดาวฤกษ์ได้

## วิธีดำเนินการวิจัย

ข้อมูลการสังเกตการณ์ด้วยกระบวนการโฟโตเมตรี (photometry) ผ่านแผ่นกรองแสงย่านที่ตามองเห็น (V filter) ของระบบดาวคู่อุปราคาประเภทดับเบิลยู เออร์ซาเมเจอร์ิส (EW type) ในกลุ่มดาวหมีเล็ก 15 ระบบ ดาวน์โหลดจากฐานข้อมูล The ASAS-SN Catalog of Variable Stars: II (Jayasinghe et al., 2018) จำนวน 14 ระบบ ได้แก่ AK Umi AL Umi AM Umi AN Umi AP Umi AQ Umi AR Umi AT Umi AX Umi RZ Umi VW Umi VY Umi WX UMi และ WZ UMi อีก 1 ระบบ ดาวน์โหลดจาก The ASAS-SN Catalog of Variable Stars: VI (Jayasinghe et al., 2020) คือ WW UMi โดยค่าพารามิเตอร์พื้นฐานได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 1

ในการวิจัยครั้งนี้สมมติให้ดาวปฐมภูมิ (primary component) เป็นดาวฤกษ์ที่มีวิวัฒนาการอยู่ในแถบลำดับหลัก (main sequence) บนแผนภาพแฮร์ทสพริง-รัสเซลล์ (Hertzprung–Russell diagram) และสามารถคำนวณหาค่าอุณหภูมิยังผลของดาวปฐมภูมิ ( $T_1$ ) ได้ด้วยค่าดัชนีสี (B-V) จากตารางความสัมพันธ์ที่นำเสนอไว้โดย Flower (1996) ดังแสดงในตารางที่ 2 สดมภ์ที่ 2 แต่มีดาวคู่ 3 ระบบ (AK Umi AL UMi และ AP UMi) ที่ไม่ทราบค่าดัชนีสี ผู้วิจัยจึงอ้างอิงค่าอุณหภูมิยังผลของดาวปฐมภูมิจากการคำนวณของ Gaia Collaboration (2018) ชุดข้อมูลจากการดาวนโหลดในรูปแบบไฟล์ .csv ซึ่งมี

รายละเอียดข้อมูลคือ 1) วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ (Heliocentric Julian Date; HJD) 2) ประเภทของกล้อง 3) ชนิดของแผ่นกรองแสง 4) ค่าโชติมาตร (magnitude) ร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อน (error) และ 5) ค่าฟลักซ์ (Flux) ร่วมกับค่าความคลาดเคลื่อน จากข้อมูลดังกล่าวนี้ผู้วิจัยได้เตรียมไฟล์ข้อมูลสำหรับนำเข้าโปรแกรม PHEOBE ให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ .txt ซึ่งมีรายละเอียดข้อมูลคือ 1) วันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ 2) ค่าโชติมาตร และ 3) ค่าน้ำหนักของข้อมูล (weight) โดยให้ความสำคัญ (น้ำหนัก) ของแต่ละข้อมูลเท่ากับ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์พื้นฐานของระบบดาวคู่อุปราดาในกลุ่มดาวหมีเล็ก 15 ระบบ จาก The ASAS-SN Catalog

Names (1)	Right Ascension (2)	Declination (3)	Mean V (4)	Epoch (HJD) (5)	Period (days) (6)	B-V (7)	$T_1$ (K) (8)
AK UMi	19 <sup>h</sup> 40 <sup>m</sup> 41.8 <sup>s</sup>	86° 21' 09.43"	12.83	2458413.70537	0.5365076	-	6010
AL UMi	19 <sup>h</sup> 57 <sup>m</sup> 12.3 <sup>s</sup>	86° 45' 26.21"	12.71	2456884.89483	0.4768653	-	4914
AM UMi	13 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup> 58.1 <sup>s</sup>	72° 53' 04.99"	14.61	2457565.79428	0.3104500	0.527	6170
AN UMi	13 <sup>h</sup> 16 <sup>m</sup> 19.3 <sup>s</sup>	73° 28' 21.43"	14.15	2456798.01608	0.3069610	1.082	4690
AP UMi	13 <sup>h</sup> 42 <sup>m</sup> 53.3 <sup>s</sup>	70° 01' 49.44"	14.65	2456809.87514	0.2587683	-	4894
AQ UMi	14 <sup>h</sup> 47 <sup>m</sup> 44.6 <sup>s</sup>	68° 38' 36.89"	13.51	2457560.89812	0.3148173	0.881	5088
AR UMi	15 <sup>h</sup> 31 <sup>m</sup> 13.6 <sup>s</sup>	70° 26' 52.33"	13.19	2456919.72245	0.3583980	0.558	6048
AT UMi	15 <sup>h</sup> 34 <sup>m</sup> 20.5 <sup>s</sup>	72° 25' 26.62"	15.12	2457857.00030	0.3157105	0.524	6182
AX UMi	15 <sup>h</sup> 45 <sup>m</sup> 41.1 <sup>s</sup>	80° 36' 10.30"	14.52	2457961.74554	0.3467567	0.509	6244
RZ UMi	14 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup> 25.8 <sup>s</sup>	86° 43' 37.74"	11.89	2457184.84415	0.3373492	0.674	5640
VW UMi	15 <sup>h</sup> 54 <sup>m</sup> 46.5 <sup>s</sup>	85° 40' 05.92"	12.15	2457891.12218	0.4889169	0.706	5540
VY UMi	17 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup> 14.0 <sup>s</sup>	76° 42' 13.57"	11.18	2457527.83480	0.3254046	1.059	4733
WW UMi	13 <sup>h</sup> 27 <sup>m</sup> 57.1 <sup>s</sup>	72° 56' 22.99"	12.00	2457607.75823	0.6019452	0.169	7957
WX UMi	13 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup> 13.9 <sup>s</sup>	74° 02' 39.12"	14.50	2457847.86266	0.3871486	0.553	6067
WZ UMi	13 <sup>h</sup> 51 <sup>m</sup> 16.8 <sup>s</sup>	74° 42' 43.96"	12.64	2457359.15878	0.6413805	0.509	6244

การกำหนดค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นในโปรแกรม PHOEBE ซึ่งพิจารณาจากประเภทของระบบดาวคู่ (EW) โดยผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลอง (model) ในโหมด Overcontact binary not in thermal contact เนื่องจากกราฟแสงของระบบดาวคู่ประเภทนี้มีความลึกของกราฟแสงช่วงเกิดอุปราดาปฐมภูมิ (ดาวทุติยภูมิบังดาวปฐมภูมิ) และช่วงเกิดอุปราดาทุติยภูมิ (ดาวปฐมภูมิบังดาวทุติยภูมิ) แตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งบ่งชี้ว่าสมาชิกของระบบดาวคู่ทั้งสองมีค่าอุณหภูมียังผล (effective temperature,  $T_{eff}$ ) ไม่เท่ากัน ในแบบจำลองนี้ค่าศักย์พื้นผิวของดาวสมาชิกทั้งสอง (surface potentials;  $W$ ) ต้องมีค่าเท่ากัน แต่

ศักย์พื้นผิวด้านนอก ( $W_{out}$ ) และศักย์พื้นผิวด้านใน ( $W_{in}$ ) จะมีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณร้อยละองศาการแตะกัน (degree of contact;  $f$ )

เริ่มต้นการป้อนพารามิเตอร์ในโปรแกรมจากค่าวันจูเลียนศูนย์กลางสุริยะ และคาบการโคจรจากตารางที่ 1 สดมภ์ที่ 5 และ 6 ตามลำดับ ยังมีค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นที่สำคัญคือค่าสัมประสิทธิ์การมืดคล้ำเนื่องจากความโน้มถ่วง (gravity darkening coefficients) ของดาวปฐมภูมิ ( $g_1$ ) และดาวทุติยภูมิ ( $g_2$ ) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.32 อ้างอิงจาก Lucy (1967) ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนโบลเมตริก (bolometric albedo

coefficient) ของดาวปฐุมภูมิ ( $A_1$ ) และดาวทุติยภูมิ ( $A_2$ ) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5 อ้างอิงจาก Rucinski (1969) ค่าสัมประสิทธิ์ความมืดคล้ำที่ขอบดาวฤกษ์ (logarithmic limb-darkening coefficients) จะถูกปรับตามตารางความสัมพันธ์ของ Van Hamme (1993) ทั้งนี้สมมติให้ระบบดาวคู่ทั้ง 15 ระบบมีอัตราการหมุนรอบตัวเองของดาวสมาชิกเท่ากับอัตราการโคจรรอบจุดศูนย์กลางมวล (synchronous rotation) ซึ่งมีวงโคจรเป็นวงกลม (circular orbit) ดังนั้นค่าความรีของวงโคจร (eccentricity;  $e$ ) จึงมีค่าเท่ากับศูนย์ อีกทั้งกำหนดให้ค่าครึ่งแกนเอกของวงโคจร (semi-major axis;  $a$ ) มีค่าเท่ากับ 1 ด้วย

พารามิเตอร์ที่ต้องการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้แก่ อุณหภูมิยังผลที่ผิวของดาวทุติยภูมิ ( $T_2$ ) อัตราส่วนมวล (mass ratio;  $q = M_2/M_1$ ) มุมเอียงของระนาบวงโคจร (orbital inclination;  $i$ ) การขยับไปของเฟส (phase shift;  $\phi$ ) และกำลังส่องสว่างสัมพัทธ์ของดาวปฐุมภูมิ (relative luminosity of primary component;  $L_1/(L_1+L_2)$ ) ขึ้นต่อไป ดำเนินการคำนวณหาเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุด (fitting curve) จากข้อมูลบน

**ตารางที่ 2** ผลเฉลยจากการคำนวณหาเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุด ของระบบดาวคู่อุปราคาในกลุ่มดาวหมีเล็ก 15 ระบบ

Names ( $T_2$ (K) (2)	$W_{in}$ (3)	$W_{out}$ (4)	$W$ (5)	$q$ (6)	$i$ ( $^\circ$ ) (7)	Phase shift (8)	Cost function (9)	
AK UMi	5744±8	1.979	1.910	1.951±0.015	0.107±0.004	74.50±0.04	0.0452±0.0019	0.056
AL UMi	4797±34	3.150	2.775	3.145±0.015	0.655±0.010	62.15±0.71	-0.0114±0.0017	0.066
AM UMi	5866±67	3.132	2.761	3.125±0.024	0.637±0.015	79.51±1.02	-0.0216±0.0015	0.069
AN UMi	4559±42	2.811	2.514	2.810±0.046	0.466±0.026	71.63±1.09	-0.0174±0.0019	0.038
AP UMi	4723±40	3.246	2.731	3.245±0.053	0.689±0.026	75.53±0.70	0.0002±0.0016	0.023
AQ UMi	5051±21	2.964	2.641	2.938±0.025	0.547±0.012	63.31±0.59	0.0031±0.0016	0.051
AR UMi	5770±9	2.497	2.302	2.482±0.005	0.314±0.002	59.04±0.25	0.0137±0.0008	0.063
AT UMi	6745±88	2.699	2.449	2.651±0.048	0.410±0.019	88.22±0.73	-0.0362±0.0023	0.025
AX UMi	6102±70	2.554	2.343	2.451±0.026	0.340±0.008	73.18±0.90	0.0011±0.0015	0.019
RZ UMi	5616±17	3.321	2.897	3.288±0.000	0.744±0.000	84.86±0.40	0.0142±0.0004	0.157
VW UMi	5573±28	2.188	2.071	2.163±0.011	0.182±0.004	74.30±0.75	0.0094±0.0008	0.071
VY UMi	4399±14	3.474	3.008	3.450±0.012	0.834±0.009	80.54±0.35	0.0058±0.0006	0.144
WW UMi	6946±16	2.965	1.870	2.964±0.018	0.172±0.007	51.60±0.50	0.0764±0.0024	0.013
WX UMi	5886±60	2.947	2.628	2.885±0.050	0.537±0.029	79.81±0.76	0.0210±0.0015	0.036
WZ UMi	5815±37	2.615	2.388	2.602±0.002	0.369±0.000	63.97±0.41	-0.0066±0.0014	0.021

กราฟแสง ซึ่งสังเกตผลลัพธ์ของการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดด้วยค่า cost function ต่ำสุด ดังตารางที่ 2 สดมภ์ที่ 9 จากนั้นบันทึกค่าผลลัพธ์จากการคำนวณ ข้อมูลกราฟแสงและข้อมูลแบบจำลองโครงสร้างทางกายภาพที่เฟส 0.25 โดยทำซ้ำจนครบทั้ง 15 ระบบ

### ผลการวิจัย

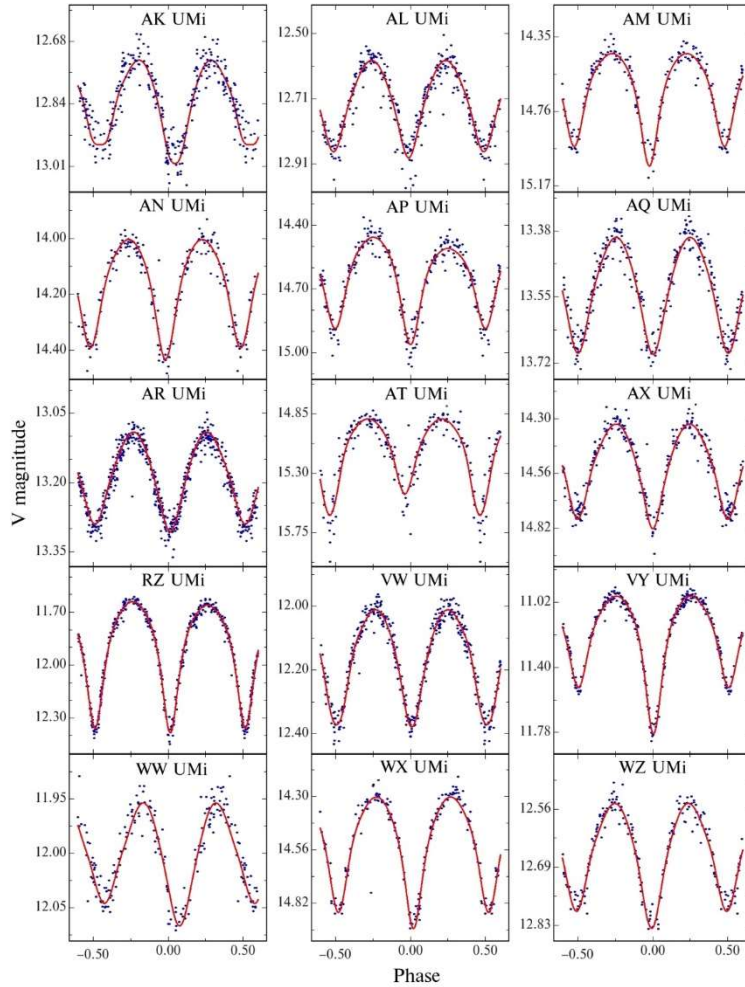
การคำนวณหาเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุดด้วยโปรแกรม PHOEBE บนพื้นฐานการคำนวณจาก W-D algorithm สำหรับกราฟแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นของระบบดาวคู่อุปราคาประเภทดับเบิลยู เออร์ซาเมเจอร์สในกลุ่มดาวหมีเล็ก 15 ระบบซึ่งมีผลเฉลยดังตารางที่ 2 นำค่าศักร์พื้นผิวในสดมภ์ที่ 3 4 และ 5 คำนวณหาค่าร้อยละองศาการแตะกันจาก  $f = (W - W_{in}) / (W_{out} - W_{in})$  นอกจากนี้ยังคำนวณหาค่าพารามิเตอร์สัมบูรณ์ โดยคำนวณด้วยชุดสมการของ Harmanec (1988) ด้วยการใช้อุณหภูมิยังผลของดาวปฐุมภูมิ ( $T_1$ ) สำหรับคำนวณมวลของดาวปฐุมภูมิ ( $M_1$ )

จากนั้นนำค่ามวลของดาวปฐุมภูมิคูณกับค่าอัตราส่วนมวลเพื่อหาค่ามวลของดาวทุติยภูมิ ( $M_2$ ) และในทำนองเดียวกันค่าอุณหภูมิยังผลของดาวของดาวปฐุมภูมิถูกนำมาใช้คำนวณหารัศมีของดาวปฐุมภูมิ ( $R_1$ ) แล้วคำนวณหารัศมีของดาวทุติยภูมิ ( $R_2$ ) จากอัตราส่วนที่ได้จากผลลัพธ์ของโปรแกรม ขึ้นต่อไปคือนำค่ามวลและรัศมีของดาวสมาชิกทั้งสองใช้คำนวณหาค่ากำลังส่อง

สว่างด้วยสมการ  $L=R^2T^4$  แสดงผลลัพธ์ดังตารางที่ 3 ข้อมูลจากการคำนวณหาเส้นโค้งที่เหมาะสมที่สุดถูกบันทึกข้อมูลออกมาจากโปรแกรม PHOEBE โดยพล็อตกราฟแสงของระบบดาวคู่อุปราคาทั้ง 15 ระบบ ดังรูปที่ 1 และแบบจำลองโครงสร้างทางกายภาพที่เฟส 0.25 ของทุกระบบดังรูปที่ 2

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์สมบูรณ์ของระบบดาวคู่อุปราคาในกลุ่มดาวหมีเล็ก 15 ระบบ

Names (1)	$f$ (%) (2)	$M_1/M_8$ (3)	$M_2/M_8$ (4)	$R_1/R_8$ (5)	$R_2/R_8$ (6)	$T_1/T_8$ (7)	$T_2/T_8$ (8)	$L_1/L_8$ (9)	$L_2/L_8$ (10)
AK UMi	40.58	1.19	0.13	1.28	0.49	1.04	0.99	1.92	0.23
AL UMi	1.33	0.81	0.53	0.91	0.74	0.85	0.83	0.43	0.26
AM UMi	1.89	1.24	0.79	1.33	1.11	1.07	1.01	2.30	1.31
AN UMi	0.34	0.73	0.34	0.82	0.58	0.81	0.79	0.30	0.13
AP UMi	0.19	0.81	0.56	0.90	0.75	0.85	0.82	0.42	0.25
AQ UMi	8.05	0.87	0.48	0.97	0.74	0.88	0.87	0.57	0.32
AR UMi	7.69	1.20	0.38	1.29	0.76	1.05	1.00	2.00	0.58
AT UMi	19.20	1.24	0.51	1.33	0.90	1.07	1.17	2.33	1.50
AX UMi	48.82	1.26	0.43	1.35	0.86	1.08	1.06	2.49	0.92
RZ UMi	7.78	1.06	0.79	1.16	1.02	0.98	0.97	1.22	0.92
VW UMi	21.37	1.03	0.19	1.13	0.53	0.96	0.96	1.08	0.24
VY UMi	5.15	0.75	0.62	0.84	0.77	0.82	0.76	0.32	0.20
WW UMi	0.09	1.80	0.31	1.80	0.80	1.38	1.20	1.16	1.33
WX UMi	19.44	1.21	0.65	1.30	0.98	1.05	1.02	2.05	1.04
WZ UMi	5.73	1.26	0.47	1.35	0.86	1.08	1.01	2.49	0.75

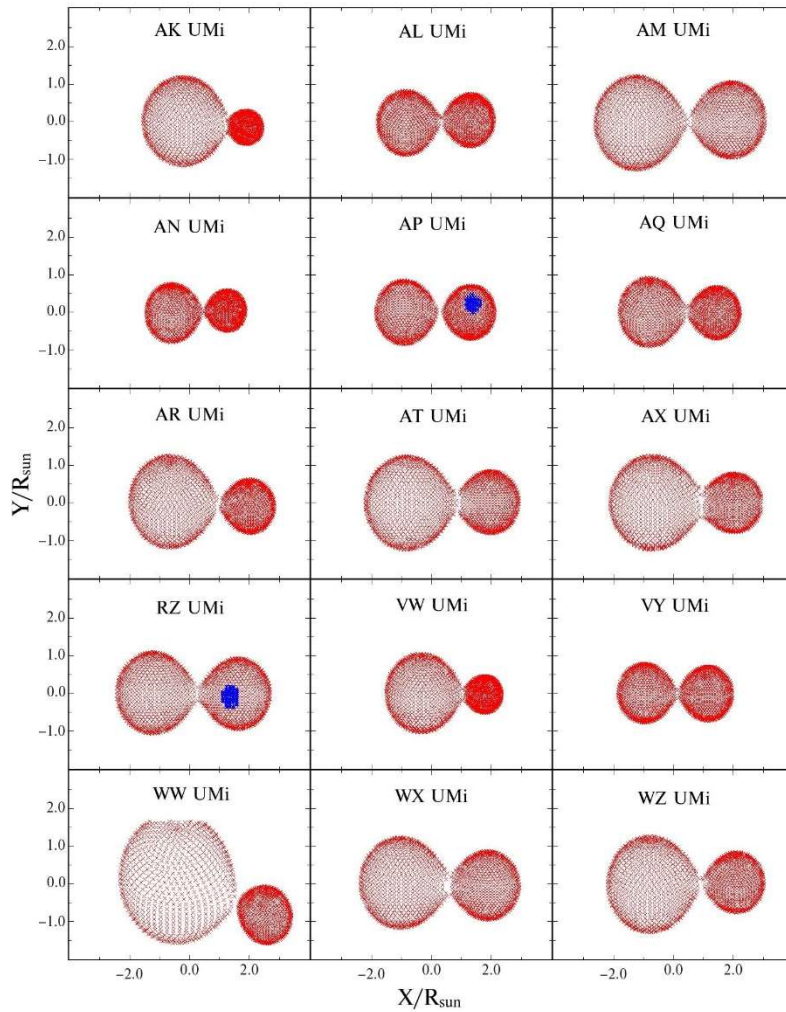


รูปที่ 1 กราฟแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ตามองเห็นของระบบดาวคู่อุปราคาในกลุ่มดาวหมีเล็ก 15 ระบบ

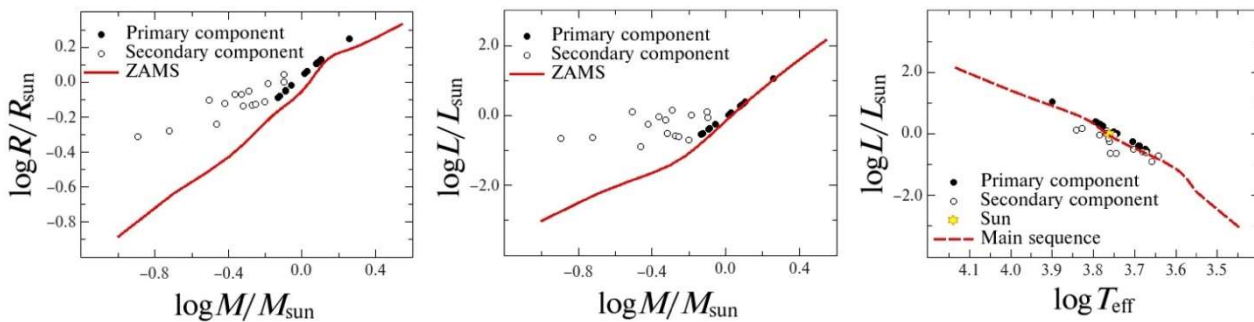
**วิจารณ์ผลการวิจัย**

เมื่อพิจารณาตามนิยามการแบ่งชนิดย่อยของระบบดาวคู่โดย Binnendijk (1970) ออกเป็น 2 กลุ่ม คือชนิด A (A-subtype) และชนิด W (W-subtype) จากผลการวิเคราะห์กราฟแสงของระบบดาวคู่อุปราคาประเภท EW ในกลุ่มดาวหมีเล็กทั้ง 15 ระบบ พบว่าทุกระบบเป็นดาวคู่อุปราคาประเภท EW ชนิด A เนื่องจากผลเฉลยในตารางที่ 2 สดมภ์ที่ 6 ซึ่งให้ให้อัตราส่วนมวล ( $q = M_2/M_1$ ) มีค่าต่ำ (น้อยกว่า 1) มวลและขนาดของดาวสมาชิกสังเกตได้จากค่าพารามิเตอร์สัมบูรณ์ในตารางที่ 3 สดมภ์ที่ 3 ถึง 6 ทั้งนี้รูปที่ 2 แสดงแบบจำลองโครงสร้างทางกายภาพที่

เฟส 0.25 ซึ่งให้ความแตกต่างของดาวสมาชิกได้ชัดเจน กราฟแสงในรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าที่อุปราคาปฐมภูมิ (เฟส 0.0) เกิดจากดาวทุติยภูมิที่มีขนาดเล็กกว่าและมีมวลน้อยกว่าเคลื่อนที่ผ่าน (transit) ดาวปฐมภูมิ แต่ยังคงพบทุกระบบ AT UMi มีอุปราคาปฐมภูมิต้นกว่าอุปราคาทุติยภูมิเนื่องจากความแตกต่างอุณหภูมิยังผลของดาวทุติยภูมิจึงมีค่ามากกว่าดาวปฐมภูมิ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาขนาดของดาวสมาชิกทั้งสองที่ใหญ่กว่าดาวฤกษ์ในขณะจุดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันโดยไฮโดรเจน (Zero Age Main Sequence; ZAMS) ในกรณีที่มีมวลเท่ากัน นั่นคือ A-subtype อยู่ห่างจาก ZAMS มากกว่า W-subtype แสดงการเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2 แบบจำลองโครงสร้างทางกายภาพที่เฟส 0.25 ของระบบดาวคู่อุปราคาในกลุ่มดาวหมีเล็ก 15 ระบบ



รูปที่ 3 กราฟความสัมพันธ์มวล-รัศมีของดาวฤกษ์ (ซ้าย) ความสัมพันธ์มวล-กำลังส่องสว่างของดาวฤกษ์ (กลาง) และแผนภาพแฮร์ตสปรุง-รัสเซลล์ (ขวา) เปรียบเทียบกับดวงอาทิตย์สำหรับระบบดาวคู่อุปราคาในกลุ่มดาวหมีเล็กทั้ง 15 ระบบ

จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์มวล-รัศมี (mass-radius relation) ดังรูปที่ 3 (ซ้าย) มวล-กำลังส่องสว่าง (mass-luminosity relation) ดังรูปที่ 3 (กลาง) ทั้งสองความสัมพันธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าดาวทุติยภูมิมีขนาดและกำลังส่องสว่างมากกว่าดาว

ฤกษ์ที่อยู่ในช่วงวิวัฒนาการ ZAMS ได้ชัดเจนกว่าดาวปฐมภูมิซึ่งกระจายตัวอยู่ในแนวเดียวกันกับ ZAMS โดยใช้การคำนวณ ZAMS เมื่อสมมติค่าความเป็นโลหะ (metallicity; Z) เท่ากับ 0.02 จากอัลกอริทึมของ Tout et al. (1996) นอกจากนี้การ

ยืนยันว่าดาวสมาชิกทั้งสองของทุกระบบดาวคู่เป็นดาวฤกษ์ที่มีวิวัฒนาการอยู่ในแถบลำดับหลักด้วยการพล็อตแผนภาพแฮร์ตสชปรุง-รัสเซลล์ เปรียบเทียบกับดวงอาทิตย์ดังรูปที่ 3 (ขวา)

กราฟแสงของระบบดาวคู่ AP UMi และ RZ UMi มีความไม่สมมาตรที่ตำแหน่งเฟส 0.25 และ 0.75 (หรือ -0.25) ดังรูปที่ 1 ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากดาวสมาชิกอาจมีจุดร้อน (hot spot) หรือจุดเย็น (cool spot) เกิดขึ้นที่ผิวของดาวฤกษ์ซึ่งถูกอธิบายไว้โดย O'Connell (1951) เรียกว่า O'Connell

effect จากผลการวิจัยครั้งนี้ระบบดาวคู่ AP UMi และ RZ UMi แสดงให้เห็นจุดเย็นบนดาวฤกษ์เมื่อพล็อตแบบจำลองโครงสร้างทางกายภาพที่เฟส 0.25 ดังรูปที่ 2 และมีรายละเอียดตำแหน่ง (Co-latitude of the spot center, longitude of the spot center) ขนาดของจุด (angular radius of spot) รวมทั้งค่าพารามิเตอร์ที่ระบุให้ทราบว่าเป็นจุดเย็นหรือจุดร้อน นั่นคือดัชนีอุณหภูมิที่ผิวของดาวฤกษ์ (temperature factors) ตามตารางที่ 4

**ตารางที่ 4** ค่าพารามิเตอร์ของจุดบนดาวฤกษ์สำหรับระบบดาวคู่ AP UMi และ RZ UMi

Sport parameter	AP UMi	RZ UMi
Co-latitude ( $q$ )	86°	90°
Longitude ( $\phi$ )	95°	80°
Angular Radius ( $r_s$ )	21°	18°
Temperature Factors ( $T_s/T_*$ )	0.7	0.9

ร้อยละของการแตะกันที่คำนวณได้ในตารางที่ 2 สอดคล้องกับแบบจำลองโครงสร้างของระบบดาวคู่ในรูปที่ 2 พบว่าร้อยละของการแตะกันมากที่สุดคือระบบ AX UMi น้อยที่สุดคือระบบ WW UMi ระบบดาวคู่ที่มีขนาดแตกต่างกันมากที่สุดคือระบบ WW UMi ส่วนระบบดาวคู่ที่มีขนาดแตกต่างกันน้อยที่สุดคือระบบ VY UMi ระบบดาวคู่ที่มีค่ามุมเอียงของระนาบวงโคจรมากที่สุดคือระบบ AT UMi ส่วนระบบดาวคู่ที่มีมุมเอียงของระนาบวงโคจรน้อยที่สุดคือระบบดาวคู่ WW UMi การตรวจสอบลักษณะอุปราคาที่เฟส 0.0 และเฟส 0.50 พบว่า ระบบ AK UMi, AM UMi, AT UMi, RZ UMi และ WW UMi เป็นปรากฏการณ์อุปราคาเต็มดวง (total eclipse) ส่วนอีก 10 ระบบแสดงเป็นปรากฏการณ์อุปราคาบางส่วน (partial eclipse)

สมบัติทางกายภาพของระบบดาวคู่ที่มีการศึกษาก่อนหน้าแล้ว 2 ระบบที่ตรงกับงานวิจัยนี้ คือ ระบบ AK UMi และ AP UMi โดย Dale and Sgro (2015) และ Awadalla et al. (2016) ตามลำดับ แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ 5 ระบบ AK UMi ถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Binary Maker (Bradstreet and Steelman, 2004) ผ่านแผ่นกรองแสงย่านสี

แดง (R filter) ส่วน AP UMi ถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม PHOEBE ผ่านแผ่นกรองแสงย่านที่ตามองเห็น ย่านสีแดง และย่านรังสีอินฟราเรด (VRI filters) ในโหมด Overcontact binary not in thermal contact จากรายงานดังกล่าวทั้งสองระบบเป็นดาวคู่อุปราคาประเภท EW ชนิด A ผลการเปรียบเทียบพบว่าความแตกต่างของค่าพารามิเตอร์ที่แสดงดังตารางเกิดจากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณคาบการโคจรของระบบดาวคู่ที่ต่างกันอีกทั้งการกำหนดค่าอุณหภูมิยังผลของดาวปฐมภูมิก็มีที่มาจากต่างกันด้วย Dale and Sgro (2015) ได้นำเสนอการค้นพบวัตถุที่ 3 ในระบบ AK UMi ซึ่งโคจรร่วมจุดศูนย์กลางมวลเดียวกันด้วยซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณา Awadalla et al. (2016) รายงานว่าระบบ AP UMi มีจุดเย็นที่ดาวปฐมภูมิและมีจุดร้อนที่ดาวฤกษ์ทุติยภูมิ แต่ในงานวิจัยนี้พบจุดเย็นที่ดาวฤกษ์ทุติยภูมิเพียงจุดเดียว ทั้งนี้ยังพบว่าการคำนวณของระบบ AP UMi ในงานวิจัยนี้เปลี่ยนแปลงจากการคำนวณของ Awadalla et al. (2016) จนถึงช่วงเวลาของการคำนวณในงานวิจัยนี้มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งบ่งชี้ว่าระบบดาวคู่นี้อยู่ในช่วงวิวัฒนาการที่กำลังแยกออกจากกัน



ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของระบบดาวคู่ AK UMi และ AP UMi กับข้อมูลการศึกษาที่ผ่านมา

Parameter	AK UMi		AP UMi		
	This paper	Dale and Sgro (2015)	This paper	Awadalla et al. (2016)	
Filter	V	R	V	V	R and I
Period (days)	0.5365076	0.536608	0.2587683	0.2582867	0.2582867
Mass Ratio	0.107±0.004	0.21	0.689±0.026	0.386 ±0.012	0.373 ±0.010
Third Light	-	0.36	-	-	-
Gravity darkening coefficient 1, 2	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
Albedo coefficient 1, 2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Inclination (°)	74.50±0.04	~90	75.53±0.70	81.3 ±1.2	77.50 ±0.88
Temperature 1 (K)	6010	6750	4894	4500	4500
Temperature 2 (K)	5744±8	6650	4723±40	3865 ±157	3706 ±92
Degree of contact (%)	40.58	0.6	0.19	0.285	0.293
Co-latitude (°)	-	-	Sec: 86	Prim: 80	Sec: 90
Longitude (°)	-	-	Sec: 95	Prim: 110	Sec: 110
Angular Radius (°)	-	-	Sec: 21	Prim: 9	Sec: 5
Temperature Factors	-	-	Sec: 0.7	Prim: 0.2	Sec: 1.55

### สรุปผลการวิจัย

การศึกษาระบบดาวคู่อุปราคาประเภทดับเบิลยูเอชอาร์เมเจอร์ิส ในกลุ่มดาวหมีเล็ก ทั้งหมด 15 ระบบด้วยตัวอย่างข้อมูลจาก The ASAS-SN Catalog of Variable Stars ใช้การวิเคราะห์กราฟแสงบนพื้นฐานการคำนวณจาก Wilson–Devinney algorithm ด้วยโปรแกรม PHOEBE พบว่า ตัวอย่างดาวคู่ทั้ง 15 ระบบเป็นดาวคู่อุปราคาประเภทประเภทดับเบิลยูเอชอาร์เมเจอร์ิส ชนิด A มีอัตราส่วนมวลน้อยกว่า 1 ทุกระบบ ขนาดของดาวปฐมภูมิใหญ่กว่าดาวทุติยภูมิทุกระบบ ระบบดาวคู่ AT UMi มีอุณหภูมิยังผลของดาวทุติยภูมิมีค่ามากกว่าดาวปฐมภูมิ ขนาดของดาวทุติยภูมิใหญ่กว่าดาวฤกษ์ในช่วงวิวัฒนาการ ZAMS เมื่อมีมวลเท่ากัน ดาวสมาชิกทั้งสองของทุกระบบดาวคู่มีวิวัฒนาการอยู่ในแถบลำดับหลัก ระบบดาวคู่ AP UMi และ RZ UMi มีจุดเย็นบนดาวทุติยภูมิ ร้อยละของสสารแตกต่างกัน ค่าการขยับไปของเฟส และค่ามุมเอียงของระนาบวงโคจรสอดคล้องกับแบบจำลองโครงสร้างของระบบดาวคู่ และพบว่ามี 5 ระบบที่เป็นปรากฏการณ์อุปราคาเต็มดวงและอีก 10 ระบบเป็นปรากฏการณ์อุปราคาบางส่วน

### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทีมงานโครงการสำรวจอัตโนมัติบนท้องฟ้าทั้งหมดสำหรับซูเปอร์โนวา (ASAS-SN) สำหรับข้อมูลโฟโตเมตรี (photometry) ของระบบดาวคู่อุปราคา และขอขอบคุณ Andrej Prša และคณะ สำหรับโปรแกรม PHOEBE ซึ่งใช้วิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้

### เอกสารอ้างอิง

- Adams, W. S. and Joy, A. H. (1919). The motions in space of some stars of high radial velocity. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 5(7): 239-241.
- Awadalla, N. S., Hanna, M. A., Ismail, M. N., Hassan, I. A. and Elkhamisy, M. A. (2016). New CCD observations and the first photometric study of the contact binary AP UMi. *Journal of The Korean Astronomical Society* 49(3): 65-71.
- Binnendijk, L. (1970). The orbital elements of W Ursae Majoris systems. *Vistas in Astronomy* 12(1):217-256.
- Bradstreet, D. H., and Steelman, D. P. (2004). BINARY MAKER 3, Contact Software (<http://www.binarymaker.com>).
- Dale, H. A. and Sgro L. A. (2015). A photometric study of the misclassified variable AK Ursae Minoris. *Journal of the*

- American Association of Variable Star Observers 43(2): 115-117.
- Flower, P. J. (1996). Transformations from theoretical Hertzsprung-Russell diagrams to color-magnitude diagrams: effective temperatures, B-V colors, and bolometric corrections. *Astrophysical Journal* 469(1): 355-365.
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne J. H. J., Babusiaux, C. A. L. and Bailer-Jones, C. (2018). Gaia data release 2. Summary of the contents and survey properties. *Astronomy and Astrophysics* 616(A1): 1-21.
- Harmanec, P. (1988). Stellar masses and radii based on modern binary data. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia* 39(6): 329-345.
- Jayasinghe, T., Stanek, K. Z., Kochanek, C. S., Shappee, B. J., Holoiën, T. W. S., Thompson, T. A., Prieto J. L., et al. (2018). The ASAS-SN catalog of variable stars II: uniform classification of 412,000 known variables. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 489(2): 1907-1943.
- Jayasinghe, T., Stanek, K. Z., Kochanek, C. S., Valley, P. J., Shappee, B. J., Holoiën, T. W. S., Thompson T. A., et al. (2020). The ASAS-SN catalog of variable stars VI: an all-sky sample of  $\delta$  Scuti stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 493(3): 4186-4208.
- Lucy, L. B. (1967). Gravity-darkening for stars with convective envelopes. *Zeitschrift für Astrophysik* 65(1): 89-92.
- Malatesta, K. (2021). W Ursae Majoris. The American Association of Variable Star Observers (AAVSO), แหล่งข้อมูล: [https://www.aavso.org/vsots\\_wuma](https://www.aavso.org/vsots_wuma). ค้นเมื่อวันที่ 25 มีนาคม 2564.
- Müller, G. and Kempf, P. (1903). A new variable star of unusually short period. *Astrophysical Journal* 17(1): 201-211.
- O'Connell, D. J. K. (1951). The so-called periastron effect in close eclipsing binaries. *Riverview College Observatory Publications* 2(6): 85-99.
- Prša, A. and Zwitter, T. (2005). A computational guide to physics of eclipsing binaries. I. Demonstrations and perspectives. *Astrophysical Journal* 628(1), 426-438.
- Ruciński, S. M. (1969). The proximity effects in close binary systems. II. The bolometric reflection effect for stars with deep convective envelopes. *Acta Astronomica* 19(4): 245-255.
- Tout, C. A., Pols, O. R., Eggleton, P. P. and Han, Z. (1996). Zero-age main-sequence radii and luminosities as analytic functions of mass and metallicity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 281: 257-262.
- Van Hamme, W. (1993). New Limb-darkening coefficients for modeling binary star light curves. *Astronomical Journal* 106(5): 2096-2117.
- Wilson, R. E. and Devinney, E. J. (1971). Realization of accurate close-binary light curves: application to MR Cygni. *Astrophysical Journal* 166(3), 605-619.

