

**KATALOG *DIFFUSE INTERSTELLAR BANDS*
BERDASARKAN SPEKTRUM BINTANG PANAS
BERESOLUSI TINGGI**

TUGAS AKHIR

Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Sarjana dari
Institut Teknologi Bandung

Oleh

**MUHAMMAD IHSAN ABDUL HAKIM
NIM 10320011**



**PROGRAM STUDI SARJANA ASTRONOMI
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2024**

PENGESAHAN

Katalog *Diffuse Interstellar Bands* Berdasarkan
Spektrum Bintang Panas Beresolusi Tinggi

Oleh
Muhammad Ihsan Abdul Hakim
NIM 10320011

Program Studi Sarjana Astronomi
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung

Bandung, 14 Juni 2024
Menyetujui Dosen Pembimbing,

Dr. Lucky Puspitarini, S.Si., M.Sc.
NIP 117110015

Tim Pengaji:

1. Dr. Aprilia, M.Si.
2. Dr. rer. nat. Mochamad Ikbal Arifyanto, S.Si., M.Sc.

PEDOMAN PENGGUNAAN

BUKU TUGAS AKHIR

Buku Tugas Akhir Sarjana ini tidak dipublikasikan, namun terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Institut Teknologi Bandung. Buku ini dapat diakses umum, dengan ketentuan bahwa penulis memiliki hak cipta dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Institut Teknologi Bandung. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis, dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh buku Tugas Akhir harus atas izin Program Studi Sarjana Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung.

Untuk Tuhan, Bangsa, dan Semesta!

In Harmonia Progressio

Vivat Himastron

Simba

Look at the stars

The great kings of the past look down on us from those stars

So whenever you feel alone,

*just remember that those kings will always be there to guide you
and so, will I*

#Mufasa – The Lion King

A true hero

Isn't measured by the size of his strength

but by the strength of his heart

#Zeus – Hercules

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas berkah dan rahmat-Nya penulis mampu menyelesaikan penulisan Buku Tugas Akhir dengan judul ”Katalog *Diffuse Interstellar Bands* Berdasarkan Spektrum Bintang Panas Beresolusi Tinggi” ini dengan baik. Selawat serta salam penulis sampaikan kepada junjungan Nabi Besar Rasullullah SAW beserta keluarganya, para sahabatnya, serta umatnya hingga akhir zaman, *Aamin ya Rabbal' Alamin*.

Spektroskopi menjadi salah satu ruang lingkup keilmuan yang memberi kontribusi besar dalam pengetahuan dalam astronomi. Penulis memperoleh kesempatan mendalami spektroskopi pasca berlangsungnya kegiatan Kuliah Kerja Astronomi di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) serta saat pelaksanaan *summer school* pada program *International Virtual Course* (IVC). Penulis memiliki ketertarikan besar untuk melibatkan diri dalam riset di ranah spektroskopi ini dengan cakupan ranah materi antarbintang (MAB), spesifiknya ialah *Diffuse Interstellar Bands* (DIB). Semakin penulis mendalami topik DIB, semakin paham pula penulis pada urgensi diadakannya penelitian ini yang nyatanya masih jarang menjadi riset khususnya di Asia Tenggara.

Penulisan Buku Tugas Akhir ini memiliki tujuan sebagai syarat pemenuhan tugas akademik penulis untuk meraih gelar sarjana sains Program Studi Astronomi ITB. Penulis menyadari banyak pihak yang telah membantu penulis dalam upaya menyelesaikan penelitian ini. Alhasil, penulis mengucapkan banyak terima kasih secara khusus kepada:

1. Dr. Lucky Puspitarini, S.Si., M.Sc., selaku dosen wali dan dosen pembimbing atas segala kesabaran dan dedikasinya selama bimbingan, pengajaran, serta penguatan motivasi penulis untuk terus bersemangat baik dalam menyelesaikan tugas akhir ini maupun motivasi untuk terus melanjutkan keilmuan astronomi hingga masa mendatang

2. Dr. Aprilia, M.Si., selaku kepala prodi sarjana dan dosen penguji satu atas saran dan masukkan dalam penggerjaan tugas akhir serta umpan balik dalam memenuhi kebutuhan penulis terkait fasilitas administrasi hingga penyelesaian buku tugas akhir
3. Dr. rer. nat. Mochamad Ikbal Arifyanto, S.Si., M.Sc., selaku dosen penguji dua dan telah menjadi dosen wali selama penulis menjadi mahasiswa astronomi hingga semester 6. Terima kasih atas dukungan dalam saran dan masukkan dalam penggerjaan tugas akhir, dukungan dan motivasi penulis untuk mengembangkan diri, dan penuntun akademik selama penulis berkuliahan di astronomi
4. Dr. Yayan Sugianto, S.Si., M.Si., selaku dosen pengampu mata kuliah Kuliah Kerja Astronomi yang telah bersedia mendampingi penulis untuk melaksanakan kegiatan permagangan riset BRIN sebagai landasan awal penulis memahami riset spektroskopi
5. Prof. Dr. Thomas Djamaruddin, M.Sc., dan Dr. Stevanus Kristianto Nugroho, selaku dosen pembimbing kegiatan magang penulis di BRIN atas pengajaran dan pengalaman bermanfaat sehingga penulis memiliki pengetahuan dalam riset spektroskopi
6. Seluruh dosen dan civitas akademika program studi Astronomi ITB yang telah menginspirasi penulis untuk mengembangkan keilmuan astronomi di Indonesia
7. Seluruh staf tata usaha program studi Astronomi ITB yang telah berdedikasi tinggi dalam membantu penulis menyelesaikan kebutuhan administrasi
8. Keluarga Himastron ITB, khususnya teman-teman angkatan Astronomi ITB 2020 (Kugelblitz) yang telah memberi kesempatan penulis untuk mengembangkan potensi dalam mewawaskan keilmuan astronomi secara internal maupun eksternal serta kemampuan berorganisasi baik suka maupun duka
9. Teman-teman KKN-T ITB 2022 khususnya Kelompok 12 (Geyong Emas) atas pengalaman serta keterikatan kuat sehingga penulis mampu bertahan dalam kehidupan berkuliahan serta interaksi sosial masyarakat
10. Keluarga besar Aku Masuk ITB 2023 atas kesempatan yang pernah diberikan kepada penulis sehingga penulis memiliki pengalaman berharga dalam berkepanitiaan pusat dan berkemahasiswaan di ITB
11. Segala bentuk dukungan dari Mamah, Papah, dan Kakak baik dalam memotivasi serta penguat moral sehingga penulis mampu menyelesaikan

penggerjaan buku tugas akhir ini

12. Orang-orang yang mengisi *playlist* lagu menemani penggerjaan Tugas Akhir (Rose, Aziz Hendra, Kenny G., Stephen Sanchez, Bruno Mars, dll.)
13. Para pembuat sumber referensi yang penulis cantumkan nama atau institusinya pada Daftar Pustaka

Semoga seluruh amal baik diberi balasan lipat ganda oleh Allah SWT. Ti-dak ada gading yang tidak retak, begitu pula pada penulisan buku ini. Penulis menyadari atas kekurangan serta keterbatasan penulis sehingga buku ini masih jauh dari kesempurnaan. Penulis berharap buku ini dapat bermanfaat serta dimanfaatkan untuk kebutuhan orang banyak.

Bandung, 14 Juni 2024

Muhammad Ihsan Abdul Hakim
NIM 10320011

ABSTRAK

Sebanyak lebih dari 500 profil *Diffuse Interstellar Bands* (DIB) terekam dan disusun pada katalog sebagai upaya memecahkan permasalahan materi antarbintang (MAB) yang telah ditemukan sejak satu abad silam. Katalog tersebut di antaranya ialah Katalog Hobbs berdasarkan spektrum HD 204827, Katalog Hobbs berdasarkan spektrum HD 183143, dan Katalog *Apache Point Observatory* (APO). Ketiga katalog ini memanfaatkan spektrum bintang beresolusi tinggi ($R \approx 38000$). Berkat perkembangan teknologi, spektograf terkini mampu menghasilkan resolusi spektral yang lebih tinggi lagi ($R \geq 100000$). Peningkatan resolusi ini berpeluang menghasilkan deteksi profil DIB lebih baik untuk katalog DIB baru yang memanfaatkan spektrum beresolusi tinggi.

Dalam deteksi DIB, diperlukan bintang panas latar belakang. Bintang yang dipilih sebagai bintang target dengan spektrum resolusi tinggi pada penelitian ini adalah HD 167971 (kelas O9III, $E(B - V) = 1.01$ mag, dan $R \approx 190000$) dan HD 186745 (kelas B8Ia, $E(B - V) = 0.88$ mag, dan $R \approx 107200$) dengan rentang panjang gelombang $4000 \leq \lambda \leq 7800 \text{ \AA}$. Kedua bintang ini termasuk target misi ESO *Diffuse Interstellar Bands Large Explorer Survey* (EDIBLES), suatu proyek yang didedikasikan khusus untuk penelusuran DIB. Analisis DIB mencakup beberapa proses antara lain; koreksi kontaminasi *telluric*, koreksi kecepatan radial barisentris, koreksi kecepatan radial MAB, serta membandingkan spektrum data dengan spektrum bintang yang minim pemerahan. Berikutnya, dilakukan pengukuran parameter profil DIB meliputi lebar ekivalen W_λ , FWHM, *central wavelength* λ_c , dan *central depth* τ . Selanjutnya, profil DIB yang terdeteksi dibandingkan dengan *central wavelength* referensi $\lambda_{c,\text{ref}}$ dari Katalog APO untuk mengonfirmasi keberadaan DIB yang sudah ada atau diusulkan sebagai DIB baru. Hasil analisis profil disusun dalam bentuk tabel dilengkapi dengan jenis profilnya.

Terdeteksi sebanyak 263 profil serapan antarbintang terdiri atas: 212 profil DIB terkonfirmasi referensi, 46 profil DIB baru, dan 5 profil garis atom atau molekul MAB pada katalog HD 167971. Sementara itu, dari 207 profil serapan antarbintang pada katalog HD 186745 diperoleh 164 profil DIB terkonfirmasi referensi, 42 profil DIB baru, dan 1 profil garis atom MAB. Profil DIB yang sangat kuat dan/atau kuat, serta garis MAB menjadi profil serapan yang paling mudah dideteksi, namun DIB lemah mendominasi katalog DIB ini.

Kata kunci: *Diffuse Interstellar Bands*, Materi Antarbintang, Katalog

ABSTRACT

More than 500 Diffuse Interstellar Bands (DIB) profiles are recorded in catalogs aimed to solving interstellar medium (ISM) problem for over century. Catalogs among them are Hobbs Catalog for HD 204827 spectra, Hobbs Catalog for HD 183143 spectra, and Apache Point Observatory (APO) Catalog. These three catalog used high resolution stellar spectra ($R \approx 38000$). Due to the technology advancement, currently spectograph has surpass even higher resolution ($R \geq 100000$). The upgrading of resolution value holds great potential to achieving more better DIB detection for new DIB catalog that using high resolution spectral data.

Regarding the detection of DIB, early-type stars is needed as background research. Stars selected as high-resolution spectra star target in this research are HD 167971 (O9III class, $E(B-V) = 1.01$ mag, and $R \approx 190000$) and HD 186745 (B8Ia class, $E(B-V) = 0.88$ mag, and $R \approx 107200$) across wavelength range of $4000 \leq \lambda \leq 7800$ Å. Both stars are target of ESO Diffuse Interstellar Bands Large Explorer Survey (EDIBLES) mission, a project that dedicated to the exploration of DIB. Analysis of DIB includes multiple process such as; correcting of telluric contamination, correcting of barycentric radial velocity, correcting of ISM radial velocity, and comparing profiles with less-reddened stars spectra. Afterwards, the profile parameters will be calculated such as equivalent width W_λ , FWHM, central wavelength λ_c , and central depth τ . Moreover, the DIB profiles are compared with reference wavelengths $\lambda_{c_{\text{ref}}}$ from APO Catalog in order to confirm the presence of existing DIB or propose as new DIB. This profiles analysis results are constructed to be in table format that accompanied by profile types.

It was detected amount of 263 interstellar profiles consisting of: 212 confirmed reference DIB profiles, 46 new DIB profiles, and 5 ISM atomic or molecules lines in the HD 167971 catalog. Meanwhile, 207 interstellar profiles in the HD 186745 catalog were found consisting of: 164 confirmed reference DIB profiles, 42 new DIB profiles, and 1 ISM atomic line. The DIB that are very strong and/or strong, and also interstellar lines become the easiest profiles to detect, but weak DIB dominating this catalog.

Key words: Diffuse Interstellar Bands, Interstellar Medium, Catalog

DAFTAR ISI

PENGESAHAN	i
PEDOMAN PENGGUNAAN BUKU TUGAS AKHIR	ii
DEDIKASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR NOTASI	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xv
I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan dan Batasan Masalah	1
I.3 Tujuan	2
I.4 Metodologi	2
I.5 Sistematika Penulisan	3
II TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 Spektroskopi	4
II.1.1 Profil Garis	4
II.1.2 Fluks	5
II.1.3 Panjang Gelombang dan <i>Central Wavelength</i>	6
II.1.4 <i>Central Depth</i>	8
II.1.5 Lebar Ekivalen dan <i>Full Width Half Maximum</i> (FWHM)	10
II.1.6 Resolusi Spektograf	11
II.2 Bintang Panas	13
II.3 Materi Antarbintang (MAB)	16
II.3.1 Pengenalan MAB	16
II.3.2 Bukti Keberadaan MAB	17
II.3.3 Ekstensi dan Pemerahan MAB	17

II.4	<i>Diffuse Interstellar Bands</i> (DIB)	19
II.4.1	Sejarah DIB	19
II.4.2	Katalog Hobbs: HD 204827	21
II.4.3	Katalog Hobbs: HD 183143	23
II.4.4	Katalog <i>Apache Point Observatory</i> (APO)	25
II.4.5	ESO <i>Diffuse Interstellar Bands Large Exploration Survey</i> (EDIBLES)	28
III	DATA DAN METODOLOGI PENELITIAN	31
III.1	Data Penelitian	31
III.1.1	Bintang Target dan Bintang Pembanding	32
III.1.1.1	Bintang Target Pertama: HD 167971	32
III.1.1.2	Bintang Target Kedua: HD 186745	34
III.1.2	Spektrum <i>Telluric</i>	35
III.2	Metodologi Penelitian	36
III.2.1	Penyiapan Data dan <i>Smoothing</i>	36
III.2.2	Normalisasi	38
III.2.3	Koreksi Garis-garis <i>Telluric</i>	40
III.2.4	Identifikasi Parameter DIB	42
III.2.5	Koreksi Kecepatan Radial	45
IV	HASIL DAN ANALISIS	48
IV.1	Sensus DIB	48
IV.2	Analisis Profil DIB	58
IV.3	Temuan Atom dan Molekul Antarbintang	61
V	PENUTUP	63
V.1	Simpulan	63
V.2	Saran	63
DAFTAR PUSTAKA		64
LAMPIRAN		69
A TABEL KATALOG		70
B PLOT KATALOG		82

DAFTAR TABEL

II.1	Tabel Spektrum Elektromagnetik	7
II.2	Klasifikasi Harvard	14
II.3	Klasifikasi Morgan-Keenan	15
II.4	Beberapa Data Profil DIB	23
II.5	Statistika DIB HD 204827	23
II.6	Statistika DIB HD 183143	24
II.7	Beberapa Data Profil DIB	24
II.8	Katalog DIB <i>Apache Point Observatory</i>	26
II.9	Data Katalog DIB APO	26
II.10	Beberapa Bintang Target EDIBLES	29
III.1	Properti HD 167971	33
III.2	Properti HD 186745	34
III.3	Tabel Koreksi <i>Smoothing</i> Lebar Ekivalen	44
III.4	Hasil Koreksi Kecepatan Radial MAB	47
IV.1	Tabel DIB Sangat Kuat	58
IV.2	Tabel Temuan Garis Atom atau Molekul MAB	62
A.1	Katalog DIB HD 167971	71
A.2	Katalog DIB HD 186745	77

DAFTAR GAMBAR

II.1	Ilustrasi Hukum Kirchoff	4
II.2	Transisi Energi Penghasil Garis Emisi dan Absorpsi	5
II.3	Profil Emisi dan Absorpsi	6
II.4	Ilustrasi Sumber Radiasi	6
II.5	Ilustrasi Ketebalan Optis	9
II.6	Simulasi Variasi Ketebalan Optis	9
II.7	Lebar Ekivalen dan FWHM	10
II.8	Pengukuran FWHM Pada Profil Gaussian	11
II.9	Prinsip Kerja Spektograf	12
II.10	Pemisahan Profil	12
II.11	Plot Garis Li I dengan Resolusi Berbeda	13
II.12	Serapan Garis Bintang	14
II.13	Diagram Hertzsprung-Russel	15
II.14	Peta Distribusi MAB	16
II.15	Korelasi Statistik Trumpler	17
II.16	Citra Barnard 68	18
II.17	Plot Ekstensi	19
II.18	<i>Tracing</i> Profil DIB Pertama	20
II.19	Korelasi DIB dengan MAB	20
II.20	Korelasi DIB Inframerah dengan C ₆₀ ⁺	21
II.21	Spektrum HD 204827 dan 10 Lac	22
II.22	Spektrum HD 183143 dan β Orionis	25
II.23	Spektrum Sintetik Bintang Target Katalog APO	27
II.24	<i>Family of DIB</i>	28
II.25	Distribusi Bintang Target EDIBLES	28
II.26	Proyek EDIBLES VII	30
II.27	Proyek EDIBLES VIII	30
III.1	Koordinat Galaktik Data Bintang	31
III.2	Citra Bintang Target	32
III.3	Citra Bintang Pembanding	32
III.4	Spektrum Mentah HD 167971	33

III.5 Spektrum Mentah HD 186745	35
III.6 Profil <i>Telluric</i>	36
III.7 Diagram Alur Berpikir Penelitian	37
III.8 Proses <i>Smoothing</i> Segmen Spektrum	38
III.9 Pemisahan Profil	39
III.10 Spektrum <i>Telluric ESO ESO Sky Profile</i>	40
III.11 <i>Masking</i> Spektrum Bintang dengan <i>Telluric</i>	41
III.12 Pembuatan <i>Baseline</i> Menggunakan ALS	41
III.13 Koreksi Profil <i>Telluric</i>	42
III.14 Contoh Perbandingan Bintang Target dan Bintang Pembanding Minim Pemerahan	43
III.15 Tampilan <i>Integrate Peaks OriginPro</i>	43
III.16 Perhitungan Koreksi Lebar Ekivalen Faktor <i>Smoothing</i>	45
III.17 Komputasi Koreksi Kecepatan Radial Barisentrис	46
IV.1 Contoh Penelusuran DIB	48
IV.2 Contoh Penelusuran DIB di Area Kuat <i>Telluric</i>	49
IV.3 Distribusi Katalog DIB Bintang Target	50
IV.4 Distribusi <i>Central Wavelength</i> Katalog	51
IV.5 Distribusi <i>Central Wavelength</i> DIB Terkonfirmasi dan DIB Baru	52
IV.6 Diagram Venn Dua DIB Bintang Target	53
IV.7 Diagram Klasifikasi Tingkat Kekuatan Profil Katalog DIB	54
IV.8 Histogram Distribusi Lebar Ekivalen Katalog DIB	55
IV.9 Histogram Distribusi FWHM Katalog DIB	55
IV.10 Histogram Distribusi <i>Central Depth</i> Katalog DIB	56
IV.11 Korelasi DIB Bintang Target Terhadap Katalog Referensi	57
IV.12 Enam Profil DIB Sangat Kuat	59
IV.13 Profil <i>Triplets</i> DIB Kuat	60
IV.14 Profil DIB Lemah Temuan Baru	61
IV.15 Profil Garis Atom K I	61
B.1 Spektrum DIB HD 167971	83
B.2 Spektrum DIB HD 186745	102

DAFTAR NOTASI

Notasi	Arti
α	asensiorekta
δ	deklinasi
l	bujur galaktik
b	lintang galaktik
$E(B - V)$	pemerahan
B	magnitudo visual di filter B
V	magnitudo visual di filter V
\odot	unit dalam besaran Matahari
F_λ	fluks
F_c	fluks kontinu
L	luminositas
R	daya pisah atau resolusi spektograf
S/N	ratio <i>signal-to-noise</i>
v_r	kecepatan radial
$v_{r\text{corr}}$	kecepatan radial koreksi
c	kecepatan cahaya
z	<i>redshift</i>
ν	frekuensi gelombang
T_e	temperatur efektif
ω	sudut ruang
A_λ	ekstensi
λ_c	<i>central wavelength</i>
λ_{rest}	panjang gelombang diam
λ_{obs}	panjang gelombang yang teramati
λ_{init}	panjang gelombang awal
λ_{corr}	panjang gelombang koreksi
$\Delta\lambda$	selisih panjang gelombang yang teramati dengan panjang gelombang diam
σ	standar deviasi
W_λ	lebar ekivalen
ΔW_λ	galat lebar ekivalen
τ	<i>central depth</i> atau ketebalan optis
C_2	Dikarbon
C_{60}	<i>Buckminsterfullerene</i>
N_2	Nitrogen
O_2	Oksigen
O_3	Ozon
H_2O	uap air
CH^+	<i>Methylidyne</i> ion positif
K I	Kalium terionisasi
Li I	Litium terionisasi
Ca I	Kalsium terionisasi
$H\alpha$	Hidrogen alfa

DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	Arti
2MASS	<i>The Two Micron All-Sky Survey</i>
ALS	<i>Asymmetric Least Square</i>
APO	<i>Apache Point Observatory</i>
ARCES	<i>Apache Research Consortium Echelle Spectrograph</i>
BD	Katalog Bintang Bonner Durchmusterung
DIB	<i>Diffuse Interstellar Bands</i>
EDIBLES	<i>ESO Diffuse Interstellar Bands for Large Explorer Survey</i>
ESO	<i>European Southern Observatory</i>
ESPRESSO	<i>Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations</i>
FEROS	<i>The Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph</i>
FITS	<i>Flexible Image Transport System</i>
FWHM	<i>Full Width Half Maximum</i>
HARPS	<i>High Accuracy Radial Velocity for Planet Searcher</i>
HD	Katalog Bintang Henry Draper
HR	Diagram Hertzsprung-Russel
MAB	Materi Antarbintang
MKK	Klasifikasi Morgan-Keenan
TYC	<i>Tycho Two Catalog</i>
UT2	Teleskop Unit 2 meter
UVES	<i>Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph</i>
VLT	<i>Very Large Telescope</i>
WDS	<i>Washington Double Star Catalog</i>
WHAMP	<i>Wisconsin H-Alpha Mapper</i>

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Studi *Diffuse Interstellar Bands* (DIB) merupakan topik spektroskopi yang masih menjadi misteri sejak keberadaannya ditemukan sekitar satu abad silam (Heger, 1922). DIB merupakan fitur materi antarbintang (MAB), namun spektrumnya tidak bersesuaian dengan garis atom dan molekul yang telah diketahui hingga saat ini (Geballe, 2016). Lebih dari 500 profil serapan DIB tersebar pada spektrum bintang yang termerahkan MAB dan keberadaannya dapat menjadi pelacak distribusi MAB pemetaan Galaksi (Puspitarini, 2019) sehingga beragam katalog dan sensus profil DIB sudah dibangun dalam beberapa penelitian, misalnya profil DIB pada bintang panas HD 204827 (Hobbs, 2008) dan HD 183143 (Hobbs, 2009) yang diamati menggunakan daya pisah atau resolusi spektral tinggi ($R = 38000$). Katalog DIB diperluas juga melalui Katalog *Apache Point Observatory* (APO) yang melibatkan 25 bintang target dalam jangkauan panjang gelombang optik dan inframerah dekat (Fan, 2019).

Keberadaan DIB yang merupakan fitur absorpsi lemah menjadi perhatian dalam pengetahuan astrofisika, terlebih lagi dengan hadirnya instrumen modern dengan resolusi spektral yang lebih tinggi daripada resolusi sebelumnya. Peningkatan resolusi spektograf ini mampu menunjukkan adanya substruktur pada profil DIB yang tidak diketahui sebelumnya sebagai pemahaman indikasi pencetus profil tersebut (Galazutdinov dkk., 2008). Diharapkan, melalui analisis DIB menggunakan spektograf modern dapat menambah pemahaman pada deteksi maupun profil DIB yang dibangun dalam katalog sebagai perluasan katalog-katalog DIB sebelumnya dan menjadi acuan dalam penelitian DIB di masa mendatang.

I.2 Rumusan dan Batasan Masalah

Berdasarkan pemaparan latar belakang pada subbab sebelumnya, Penelitian ini mencakup pada pokok rumusan masalah sebagai berikut:

1. Pada panjang gelombang berapa saja DIB di spektrum bintang panas ditemukan?

2. Bagaimana profil DIB pada spektrum resolusi tinggi?
3. Apakah terdapat DIB baru yang sebelumnya tidak tercantum pada katalog referensi?

Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, batasan masalah yang diajukan penulis antara lain:

1. Bintang target yang digunakan sebagai bahan penelitian berjumlah dua yang diamati dengan spektograf beresolusi tinggi ($R > 100000$)
2. Dua bintang target ialah HD 167971 dan HD 186745
3. Dua bintang pembanding ialah ι Orionis dan β Orionis yang merupakan bintang dengan ekstensi rendah
4. Rentang panjang gelombang bintang pertama ialah $4000 \leq \lambda \leq 7800 \text{ \AA}$
5. Rentang panjang gelombang bintang kedua dibagi menjadi dua, yakni $4620 \leq \lambda \leq 6650 \text{ \AA}$ dan $6710 \leq \lambda \leq 7800 \text{ \AA}$. Secara garis besar, panjang gelombang ini meliputi wilayah panjang gelombang visual dan inframerah dekat
6. Pencarian DIB dilakukan secara inspeksi visual dengan algoritma deteksi puncak (*find peaks*) dan hasilnya dibandingkan dengan katalog referensi
7. Penyusunan katalog DIB meliputi perhitungan parameter profil seperti lebar ekivalen, *central depth*, dan *Full Width Half Maximum* (FWHM) dengan pertimbangan profil yang dapat diukur (hal ini dijelaskan lebih lanjut pada Bab III)

I.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan dan batasan masalah yang telah dipaparkan pada subbab sebelumnya, dihasilkanlah tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi profil DIB yang terekam pada spektrum bintang panas beresolusi tinggi
2. Membangun katalog DIB dengan data resolusi tinggi

I.4 Metodologi

Metodologi pada penelitian ini ialah analisis spektral dibantu perangkat lunak sesuai paparan pada Bab III. Hasil penelitian akan disusun dalam bentuk tabel dan dipresentasikan pada Lampiran.

I.5 Sistematika Penulisan

Setelah Pendahuluan tertera pada Bab I. Bab II mengulas terkait tinjauan pustaka berkaitan erat dengan konsep dasar spektroskopi, MAB, dan katalog DIB. Bab III mengulas terkait data dan metode yang dilakukan dalam penelitian meliputi proses penyiapan data, normalisasi, koreksi, serta persamaan yang menunjang perhitungan parameter fisis katalog DIB. Hasil rancangan DIB dijelaskan pada Bab IV. Bab V mengulas kesimpulan dan saran penelitian. Plot keseluruhan profil DIB yang teridentifikasi disematkan dalam bentuk tabel di Lampiran A beserta gambar penelusurannya di Lampiran B.

Terdapat aturan khusus pada penulisan profil garis, yakni menggunakan format yakni " λ + **nilai panjang gelombang**", sebagai contoh ialah $\lambda 6562.80$ yakni profil garis H α yang memiliki panjang gelombang diam pada 6562.80 Å. Adapun penulisan tanda titik “.” pada nominal atau angka ialah pernyataan menunjukkan desimal.

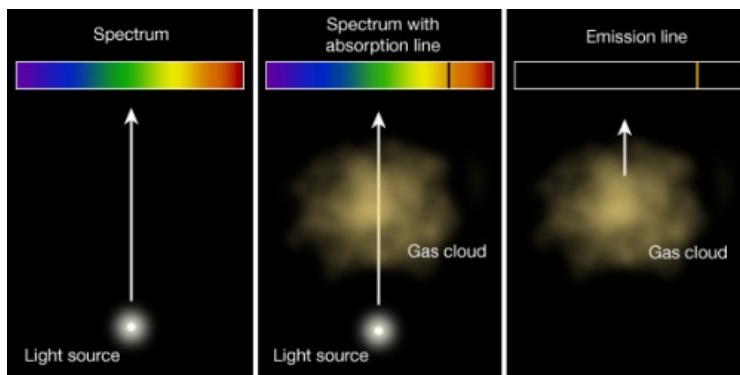
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Spektroskopi

Istilah spektroskopi mulai diperkenalkan oleh Gustav Kirchoff sebagai interaksi cahaya dan materi melalui teori fundamental Hukum Kirchoff (ditunjukkan pada Gambar II.1) yang berbunyi:

1. Suatu gas berkerapatan tinggi (benda panas) yang berpijar akan menghasilkan spektrum kontinu
2. Suatu gas berkerapatan rendah yang berpijar akan menghasilkan garis terang (emisi)
3. Suatu benda panas berpijar penghasil spektrum kontinu ketika dihalangi gas berkerapatan rendah akan menghasilkan garis gelap (absorpsi)



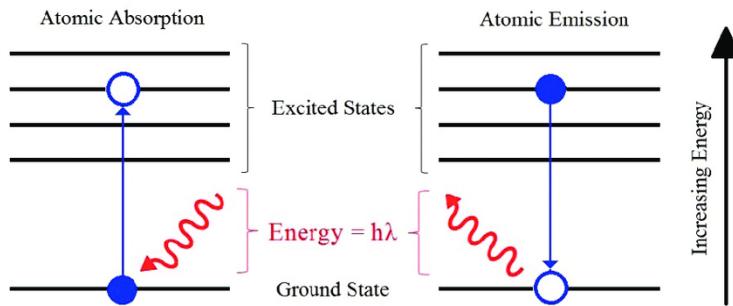
Gambar II.1: Tiga Kondisi Pembentukan Spektrum Berdasarkan Hukum Kirchoff. (Sumber gambar: Palma)

Spektroskopi bermanfaat dalam pengembangan studi partikel dan elemen baik di Bumi maupun luar angkasa (Carrol dan Ostlie, 2017).

II.1.1 Profil Garis

Profil serapan suatu garis atau dikenal dengan sebutan absorpsi timbul akibat penyerapan radiasi elektromagnetik atau foton pada benda panas oleh gas berkerapatan rendah. Penyerapan energi ini disebabkan oleh transisi elektron dari tingkatan dasar (*ground state*) atau yang lebih rendah menuju tingkatan

dengan energi lebih tinggi atau keadaan tereksitasi (*excitation state*). Eksitasi merupakan istilah yang digunakan dalam mendefinisikan transisi energi dari tingkatan rendah hingga tingkatan tinggi. Adapun keadaan berkebalikan dari absorpsi disebut emisi. Garis spektral yang dihasilkan pada pengamatan spektroskopi dua dimensi (2D) dapat ditampilkan dalam spektrum satu dimensi (1D), yaitu plot intensitas atau fluks terhadap panjang gelombang yang ditunjukkan pada Gambar II.3.



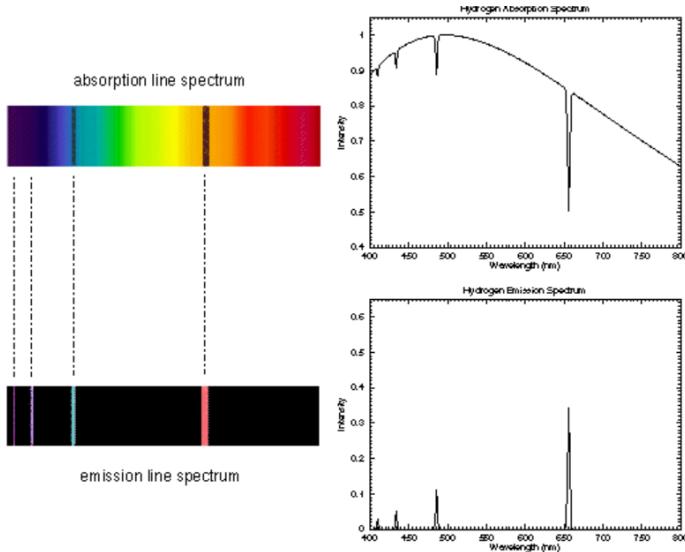
Gambar II.2: Diagram Transisi Tingkatan Energi Saat Absorpsi dan Emisi. (Sumber gambar: Cajaiba dkk., 2017)

II.1.2 Fluks

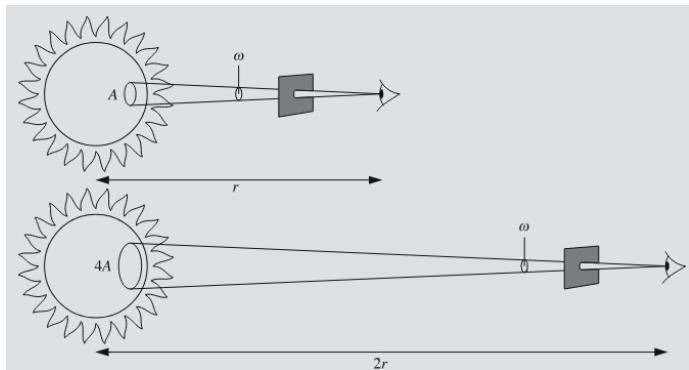
Fluks merupakan besaran intensitas yang terkonsentrasi sebagai pengukur kecerlangan dan tegak lurus terhadap luas jangkauan radiasinya sesuai persamaan (II.1):

$$F = \frac{L}{4\pi r^2} \quad (\text{II.1})$$

Pada persamaan tersebut, terdapat besaran yang dinamakan dengan luminositas L , sebagai pernyataan sejumlah fluks yang diradiasikan sumber pada suatu wilayah serta radius r sebagai ukuran jarak radiasi yang diterima pengamat sesuai ilustrasi yang ditunjukkan pada Gambar II.4. Fluks yang dipancarkan bernilai sama dengan sumber pancarannya dinamakan dengan fluks kontinu F_c , sementara fluks pada suatu panjang gelombang yang telah mengalami perubahan nilai karena emisi ataupun absorpsi dinamakan dengan fluks spesifik F_λ .



Gambar II.3: Profil garis emisi dan absorpsi pada garis H α .
(Sumber gambar: Larsen, 2020)



Gambar II.4: Ilustrasi datangnya radiasi pada pengamat dari sumber dengan luas A diterima suatu lingkup sudut ruang ω memberikan hubungan peningkatan radius r sebanding dengan luas permukaan medium penerimanya ($A \propto r^2$). (Sumber gambar: Karttunen dkk., 2007)

II.1.3 Panjang Gelombang dan *Central Wavelength*

Sesuai penjelasan pada Subbab II.1.1, profil emisi dan absorpsi dihasilkan oleh transisi energi. Hubungan antara energi dengan panjang gelombang sesuai persamaan (II.2).

$$E = h\nu \quad (\text{II.2})$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (\text{II.3})$$

Tabel II.1: Spektrum Elektromagnetik

Wilayah	Rentang Panjang Gelombang
Sinar Gama (γ)	$\lambda < 1 \text{ nm}$
Sinar X	$1 \text{ nm} < \lambda < 10 \text{ nm}$
Sinar Ultraviolet	$10 \text{ nm} < \lambda < 400 \text{ nm}$
Optik	$400 \text{ nm} < \lambda < 700 \text{ nm}$
Inframerah	$700 \text{ nm} < \lambda < 1 \text{ mm}$
Gelombang Mikro	$1 \text{ mm} < \lambda < 10 \text{ cm}$
Radio	$10 \text{ cm} < \lambda$

Sumber tabel: Carroll dan Ostlie, 2017.

Energi E dihasilkan oleh perkalian antara konstanta Planck h dengan frekuensi ν . Frekuensi dapat dikonversikan pada besaran panjang gelombang λ dengan bantuan korelasi dengan kecepatan cahaya c (sesuai persamaan (II.3)). Persamaan ini mengungkapkan hubungan antara peningkatan suatu energi dengan pemendekan suatu panjang gelombang ataupun sebaliknya. Panjang gelombang sebagai penunjuk lokasi suatu profil garis terdistribusi dalam beragam jangkauan wilayah gelombang elektromagnetik (ditunjukkan pada Tabel II.1).

Persamaan (II.3) hanya berlaku apabila sumber bergerak dalam keadaan stasioner. Akan tetapi, jika sumber bergerak dengan suatu kecepatan radial v_r , maka frekuensi akan dipengaruhi atas adanya besaran kecepatan dalam gerak sumber tersebut dengan mempertimbangkan kecepatan pergerakan sumber jauh lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan cahaya $v_r \ll c$. Hal ini ditunjukkan pada persamaan (II.4).

$$\nu_{\text{move}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{c - v_r} \nu \quad (\text{II.4})$$

Akibat adanya pergerakan dari pengamat, terjadilah fenomena pergeseran garis.

$$\nu' = \frac{\nu_{\text{move}}}{\sqrt{1 - \frac{v_r^2}{c^2}}} = \sqrt{\frac{1 - \frac{v_r}{c}}{1 + \frac{v_r}{c}}} \nu \quad (\text{II.5})$$

Perubahan frekuensi akibat gerak seperti ini dinamakan dengan Efek Doppler (Schwartz, 2016). Efek ini memberi perubahan posisi panjang gelombang yang teramati pengamat λ_{obs} dari panjang gelombang yang diukur saat keadaan stasioner (*rest*) atau disebut dengan panjang gelombang diam λ_{rest} . Kecepatan termasuk besaran vektor, alhasil terdapat arah yang memberi pengaruh terhadap frekuensi yang dihasilkannya. Pada kasus kecepatan positif ($v_r > 0$) memberi arti sumber bergerak menjauhi pengamat memengaruhi panjang ge-

lombang yang teramati menjadi lebih panjang ($\lambda_{\text{obs}} > \lambda_{\text{rest}}$) sehingga diberi istilah pergeseran merah atau *redshift* z . Sementara untuk kasus kecepatan negatif ($v_r < 0$) memberi arti sumber bergerak mendekati pengamat memengaruhi panjang gelombang yang teramati menjadi lebih pendek ($\lambda_{\text{obs}} < \lambda_{\text{rest}}$), istilah ini dinamakan pergeseran biru atau *blueshift*. Hubungan Efek Doppler ditunjukkan pada persamaan (II.6).

$$z \equiv \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{rest}}}{\lambda_{\text{rest}}} = \frac{\nu' - \nu}{\nu} \quad (\text{II.6})$$

Persamaan (II.6) dapat dinotasikan dalam bentuk aproksimasi sederhana antara *redshift* z terhadap kecepatan radial v_r selama kecepatan jauh lebih kecil dibandingkan kecepatan cahaya c sesuai persamaan (II.7).

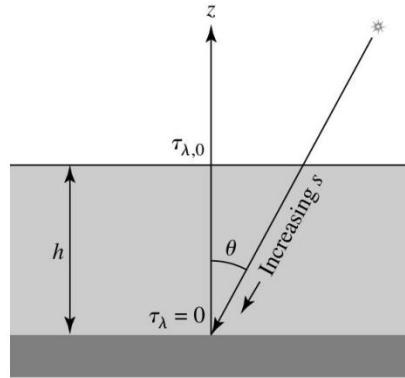
$$z \approx \frac{v_r}{c} \quad (\text{II.7})$$

Istilah panjang gelombang diam digunakan atas posisi garis atom atau molekul yang telah teridentifikasi pada laboratorium, sementara pada penelitian ini objek yang akan dianalisis ialah suatu profil kompleks yang pencetusnya belum pasti diketahui. Hal ini mengakibatkan penggunaan istilah panjang gelombang diam sebagai panjang gelombang referensi kurang tepat sehingga digunakanlah istilah *central wavelength* λ_c sebagai keterangan profil dipengaruhi atas serapan molekul dengan lingkungan sekitarnya (Geballe, 2016).

II.1.4 *Central Depth*

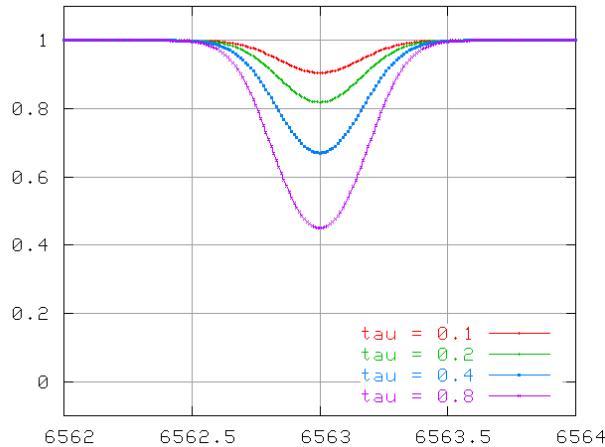
Fluks kontinu F_c akan mengalami penurunan nilai akibat pengurangan foton dari berkas cahaya melalui proses absorpsi sehingga menghasilkan fluks spesifik F_λ . Degradasi fluks ini terjadi secara eksponensial sepanjang arah datangnya berkas cahaya s seperti ditunjukkan pada Gambar II.5. Besaran yang menyatakan penurunan nilai fluks ini dinamakan dengan ketebalan optis τ , suatu besaran yang dihasilkan dari perkalian antara koefisien absorpsi κ dengan kerapatan gas ρ sepanjang arah datangnya berkas cahaya (lihat Persamaan (II.8)).

$$\frac{F_\lambda}{F_c} = e^{-\tau} = e^{-\kappa\rho s} \quad (\text{II.8})$$



Gambar II.5: Pengukuran ketebalan optis τ sepanjang jalur berkas cahaya s . (Sumber gambar: Carroll dan Ostlie, 2017)

Ketebalan optis dipengaruhi oleh koefisien absorpsi, hal ini mengindikasikan terjadinya pelebaran Doppler (*Doppler broadening*), yakni perubahan bentuk dari profil natural akibat dari gerak partikel pada efek doppler (Karttunen dkk., 2007). Alhasil, ketebalan optis menjadi penentu kedalaman profil garis absorpsi (ditunjukkan pada Gambar II.6).



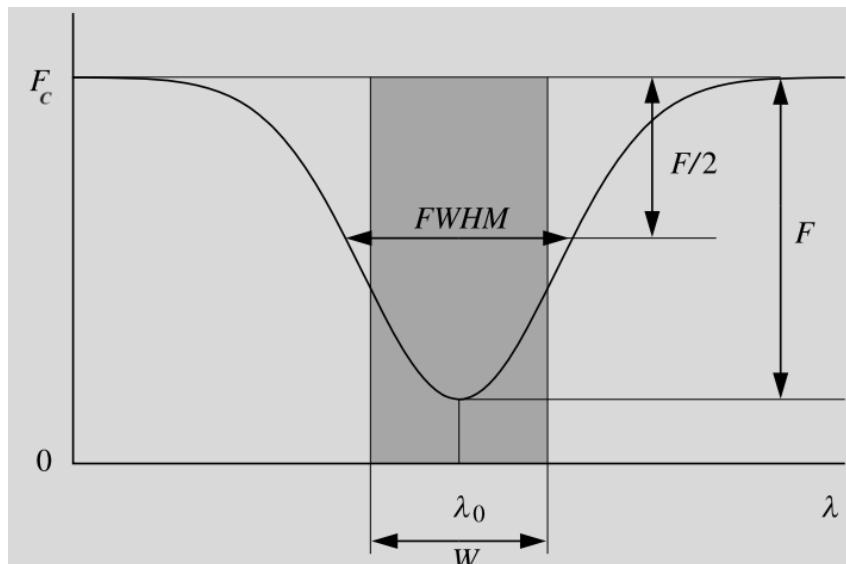
Gambar II.6: Simulasi variasi ketebalan optis τ dalam pembuatan profil absorpsi. (Sumber gambar: Richmond, 2020)

Istilah ketebalan optis juga dapat disebut dengan *central depth* merujuk pada kedalaman penurunan intensitas profil berdasarkan puncak minima (*dip*) atau lubang profil. Orientasi puncak minima sebagai pengukur nilai *central depth* dipengaruhi faktor bentuk profil DIB yang tidak menentu sesuai dengan profil klasik seperti gaussian atau *voigt*.

II.1.5 Lebar Ekivalen dan *Full Width Half Maximum* (FWHM)

Fluks kontinu F_c mengalami pengurangan nilai menjadi fluks spesifik F_λ dengan besar *central depth* τ akibat adanya fenomena absorpsi. Istilah yang tepat dalam menyatakan parameter ukuran kuat atau lemahnya suatu profil absorpsi dinamakan dengan lebar ekivalen W_λ . Lebar ekivalen diperoleh dengan mengasumsikan luas dari profil diasumsikan setara dengan suatu persegi panjang sebagai wilayah yang tidak memancarkan spektrum kontinu sama sekali (dalam hal ini lebih terfokus pada fluks spesifik dibandingkan fluks kontinu). Besar lebar ekivalen ditentukan melalui integrasi pada persamaan (II.9).

$$W_\lambda = \int \frac{F_c - F_\lambda}{F_c} d\lambda \quad (\text{II.9})$$

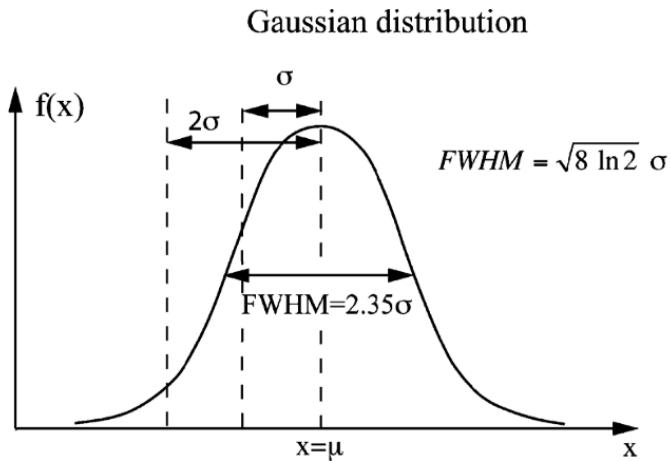


Gambar II.7: Plot profil absorpsi dengan fluks spesifik F_λ yang bernilai lebih kecil dari fluks kontinu bernilai 1 ($F_c = 1$), dilengkapi lebar ekivalen W dan FWHM. (Sumber gambar: Karttunen dkk., 2007).

Pengukur lebar profil garis dapat diperoleh menggunakan besaran parameter *Full Width Half Maximum* (FWHM) yang bernilai setara dengan setengah intensitas atau fluks dari nilai puncaknya. Pendekatan kalkulasi FWHM dapat dilakukan dengan membagi profil garis menjadi beberapa segmen sesuai titik mulai dan titik akhir fluks pada fluks kontinu sebagai *baseline*. Panjang gelombang dihitung besaran standar deviasinya (σ) mendekati nilai *central wavelength* sebagai lokasi tengah akibat korelasinya dengan puncak profil (intensitas

maksimum) sehingga dihasilkan besar FWHM sesuai persamaan (II.10)

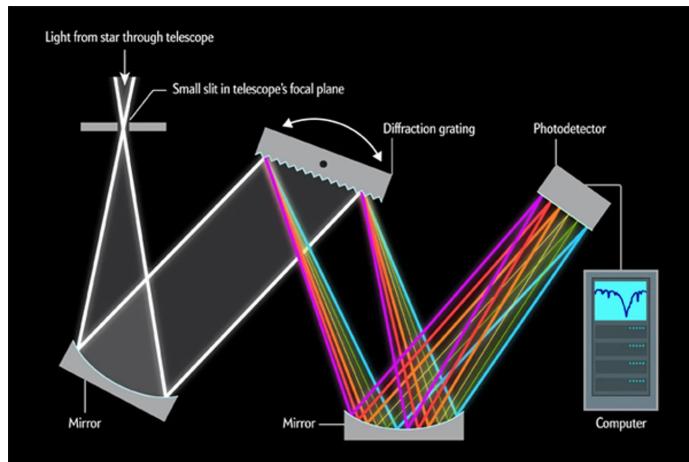
$$\text{FWHM} = \sigma\sqrt{8 \ln 2} \equiv 2.355\sigma \quad (\text{II.10})$$



Gambar II.8: Pengukuran FWHM pada suatu profil Gaussian dengan segmen panjang gelombang dinotasikan x . (Sumber gambar: Tavernier, 2022)

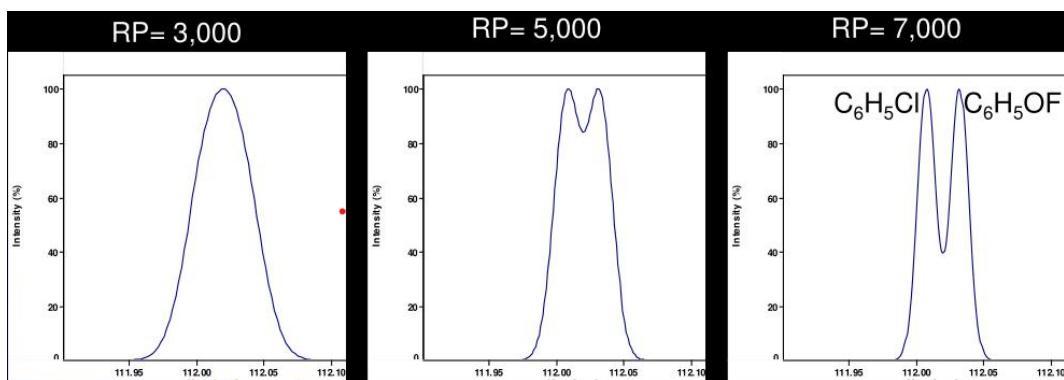
II.1.6 Resolusi Spektograf

Profil garis dalam pengamatan spektroskopi diperoleh menggunakan instrumen yang dinamakan dengan spektograf dan dipasang pada teleskop. Prinsip kerja spektograf tampak pada Gambar II.9. Mula-mula, cahaya objek pengamatan yang merambat dikumpulkan pada teleskop dan diteruskan suatu cermin kolimator yang sejajar. Cermin ini akan menyejajarkan sinar cahaya satu sama lain secara merata dan dipantulkan pada pelat kisi difraksi. Pemantulan berkas cahaya pada kisi difraksi akan saling menyesuaikan letak panjang gelombang sesuai karakteristik profil masing-masing dan hasilnya tersebar menjadi variasi spektrum warna-warni dan akhirnya dibelokkan pada cermin sekunder. Cermin ini akan memfokuskan cahaya yang diterimanya untuk diteruskan pada fotodetektor. Detektor akan mengonversi foton ke dalam bentuk listrik sehingga hasilnya dapat terbaca pada perangkat keras seperti komputer untuk dilakukan analisis data lebih lanjut.



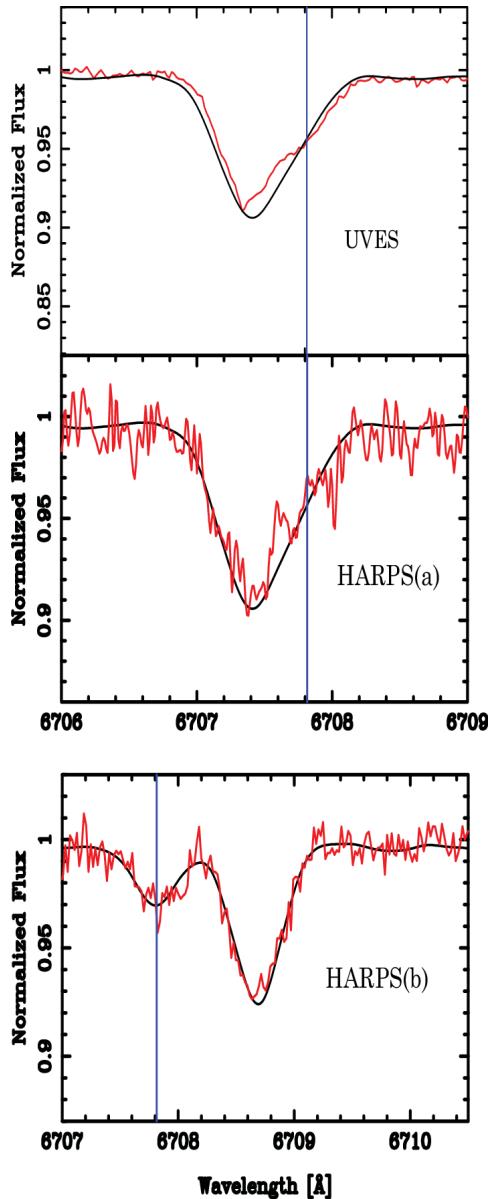
Gambar II.9: Prinsip kerja spektograf. (Sumber gambar: Jabr, 2012)

Daya kemampuan spektograf dalam memisahkan profil garis dinamakan dengan daya pisah (*resolving power*) atau sering disebut dengan resolusi R yang diperoleh melalui perhitungan pada persamaan (II.11). Resolusi merupakan unit *dimensionless* membuat profil garis yang awalnya hanya terlihat sebagai satu kesatuan ternyata terdiri dari dua profil yang *blending* melalui standardisasi jarak yang dapat dipisahkan dinamakan dengan kriteria rayleigh (lihat Gambar II.10). Peningkatan resolusi spektograf juga memungkinkan dalam pemerolehan informasi profi garis yang lebih detail terkait bentukan profil yang mengandung substruktur atau bentuk yang berbeda dari bentuk profil klasik (lihat Gambar II.11).



Gambar II.10: (a) Peningkatan resolusi spektrum memberikan pemisahan profil molekul antara tidak terpisah (*unresolved*), kriteria dapat dipisahkan (kriteria rayleigh), dan terpisah (*resolved*). (Sumber gambar: Karty, 2008)

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (\text{II.11})$$



Gambar II.11: Plot garis Li I pada pengamatan spektograf UVES ($R = 80000$) dan HARPS ($R = 120000$) memperlihatkan peningkatan resolusi mampu memberi informasi lebih detail terkait profil garis, garis biru menunjukkan lokasi *rest wavelength* profil garis atomnya. (Sumber gambar: Cowley dkk., 2013)

II.2 Bintang Panas

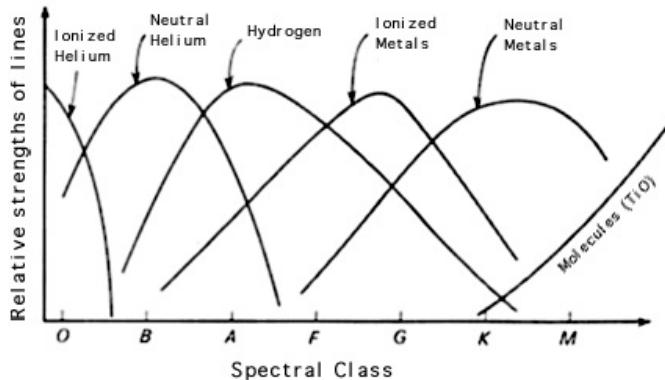
Pengamatan spektroskopi menghasilkan pengetahuan terkait klasifikasi bintang. Mulanya taksonomi bintang berdasarkan parameter kekuatan absorpsi hidrogen dengan nama Klasifikasi Harvard (Carrol dan Ostlie, 2017). Klasifikasi ini dikembangkan mulanya oleh Edward C. Pickering dibantu Williamina

P. Fleming yang kemudian mengalami perbaikan oleh Antonia Maury hingga Annie Jump Cannon. Dihasilkanlah klasifikasi Harvard sebagai urutan tipe spektral bintang dengan sistem pelabelan "O B A F G K M" yang dipengaruhi kemampuan temperatur masing-masing tipe (lihat Tabel II.2). Label di urutan awal ialah bintang panas (bintang biru) sementara label di urutan akhir ialah bintang dingin (bintang merah). Pelabelan ini juga dilengkapi oleh subdivisi spektral dengan penomoran 0 hingga 9 yang mengurutkan panasnya bintang berdasarkan tipe spektral yang sama (misalnya A0 hingga A9).

Tabel II.2: Klasifikasi Harvard: sistem pelabelan bintang berdasarkan tipe spektral

Tipe Spektral	Warna	Temperatur Permukaan (K)	Karakteristik
O	Biru	> 25000	Absorpsi He II kuat
B	Biru-Putih	11000 - 25000	Absorpsi He I kuat
A	Putih	7500 - 11000	Garis Hidrogen (Balmer) kuat di A0
F	Kuning-Putih	6000 - 7500	Garis logam muncul, absorpsi Ca II kuat
G	Kuning	5000 - 6000	Bintang tipe Matahari, absorpsi Ca II menguat dan muncul Fe I
K	Jingga	3500 - 5000	Dominasi garis logam
M	Merah	< 3500	Dominasi absorpsi molekul

Sumber tabel: Allen.



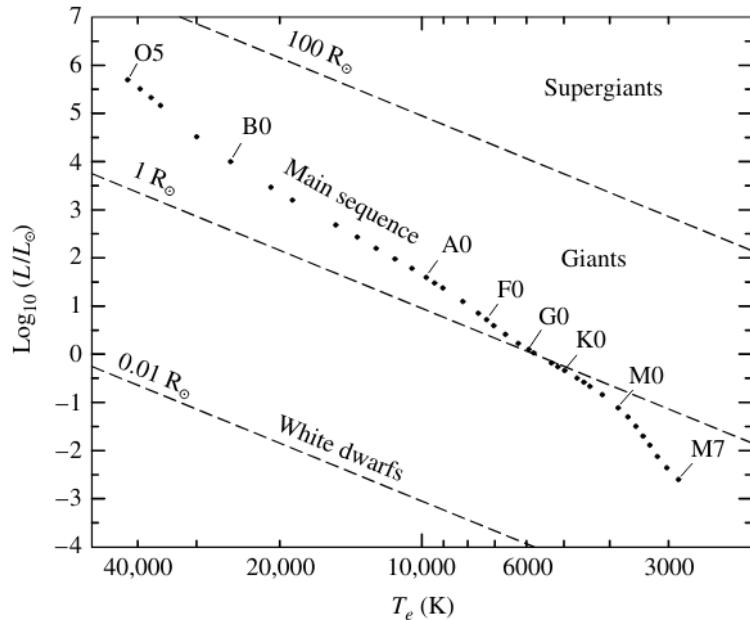
Gambar II.12: Keterkaitan kekuatan garis spektral pada temperatur.
(Sumber gambar: Allen)

Katalog Bintang pun mulai dikembangkan serta ditentukan korelasinya terhadap parameter fisis seperti temperatur efektif T_e terhadap luminositas bintang L yang dipenuhi berdasarkan persamaan (II.12) yang dikenal dengan nama persamaan bintang.

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_e^4, \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4} \quad (\text{II.12})$$

Tampaknya, radius memegang peranan pada bentuk fisis bintang. Hal ini sejua dengan pengkatalogan bintang dalam sebuah hubungan dalam Diagram

Hertzsprung-Russel (HR) (lihat Gambar II.13). Alhasil dibuatlah sistem klasifikasi yang menerapkan konsistensi besaran luminositas oleh William W. Morgan dan Phillip C. Keenan, sehingga dinamakan dengan Klasifikasi Morgan-Keenan (MKK) menggunakan pelabelan angka romawi (lihat tabel II.3). Kombinasi antara Klasifikasi Harvard dengan Klasifikasi MKK menjadi kode penomoran kelas spektrum bintang.



Gambar II.13: Korelasi temperatur T_e terhadap luminositas L dengan *constraint* variasi nilai radius R . Garis putus mengindikasikan nilai radius konstan. (Sumber gambar: Carrol dan Ostlie, 2017)

Tabel II.3: Klasifikasi Morgan-Keenan: sistem pelabelan bintang berdasarkan luminositas

Kelas	Tipe Bintang
Ia-O	Maharaksasa sangat terang
Ia	Maharaksasa terang
Ib	Maharaksasa kurang terang
II	Raksasa terang
III	Raksasa
IV	Sub-raksasa
V	Deret utama atau katai
VI	Sub-katai
VII	Katai putih

Sumber tabel: Carrol dan Ostlie, 2017.

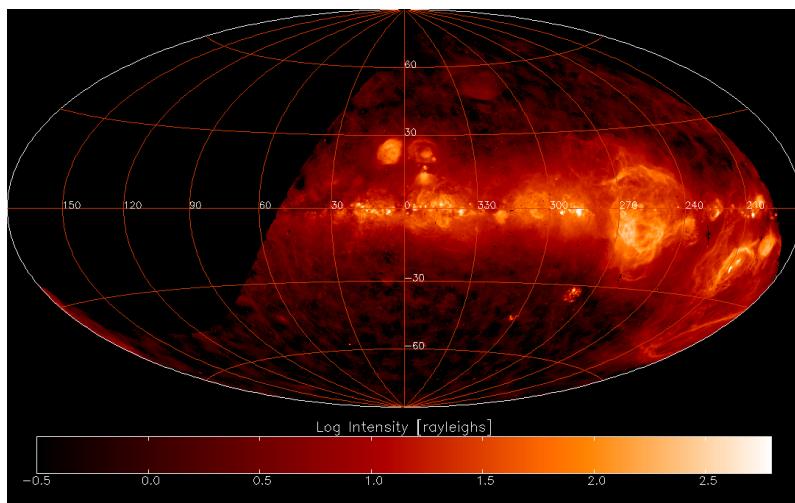
Bintang panas atau dikenal juga dengan istilah *early-type star* ialah kelompok bintang yang dikategorikan sebagai bintang terang dan masif dengan

rentang temperatur $10000 \text{ K} \leq T_e \leq 40000 \text{ K}$ (Morton dan Adams, 1968). Merujuk pada sistem Klasifikasi Harvard, kelompok bintang panas memiliki tipe spektral pada kelas O dan B. Bintang panas tidak banyak mengalami serapan molekul karena umumnya ditonjolkan pada separan garis helium saja (sesuai Gambar II.12). Hal ini akan mempermudah identifikasi profil garis terlebih profil DIB yang dibahas secara rincinya pada Subbab II.4.

II.3 Materi Antarbintang (MAB)

II.3.1 Pengenalan MAB

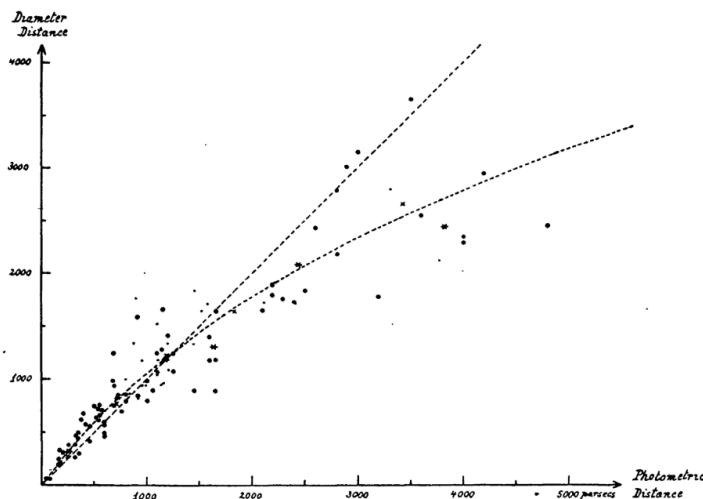
Materi antarbintang (MAB) atau *interstellar medium* merupakan sekumpulan gas dan debu yang mengisi galaksi dan menjadi cikal-bakal pembentukan bintang (Draine, 2011). MAB tersusun atas beragam komponen dalam bentuk gas dan debu. Pada kasus Galaksi Bima Sakti, massa total keseluruhannya mampu mencapai $\sim 10^{11} M_\odot$. Estimasi nilai ini meliputi komponen pengisi meliputi; $\sim 5 \times 10^{10} M_\odot$ bintang, $\sim 5 \times 10^{10} M_\odot$ materi gelap, dan $\sim 7 \times 10^9 M_\odot$ MAB. Gas dan debu MAB banyak ditemukan pada piringan galaksi sesuai dengan peta distribusi pada Gambar II.14. Pengkayaan material ini terjadi sehubungan dengan proses evolusi bintang merujuk pada peran dari awan MAB sebagai pembentuk bintang serta MAB dihasilkan dari sisa-sisa evolusi bintang tahap akhir.



Gambar II.14: Peta Distribusi Emisi Gas H II Ionisasi menunjukkan ketersebaran MAB di sepanjang Galaksi Bima Sakti pada misi *Wisconsin H-Alpha Mapper* (WHAM). (Sumber gambar: Haffner dkk., 2003)

II.3.2 Bukti Keberadaan MAB

Penemuan MAB dimulai sejak ditemukannya garis serapan lemah pada bintang panas δ Orionis relatif terhadap pergerakan Matahari (Hartmann, 1904). Garis serapan lemah ini timbul mengindikasi adanya suatu awan yang berada di garis pandang (*line of sight*) bintang δ Orionis terhadap Matahari. (Trumpler, 1930).

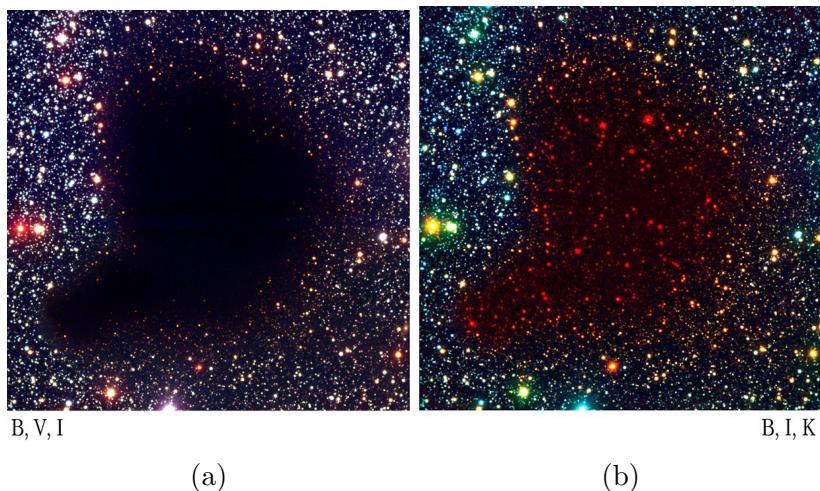


Gambar II.15: Korelasi 100 gugus terbuka antara diameter sudut (ordinat) terhadap sifat fotometri magnitudo semu dan tipe spektral (absis). (Sumber gambar: Trumpler, 1930)

Penemuan lain yang mengindikasi keberadaan MAB ialah studi statistik dari pengukuran 100 gugus terbuka dengan korelasi antara jarak objek terhadap sifat fotometrinya sesuai Gambar II.15. Garis putus-putus lurus mengindikasikan korelasi linear tanpa adanya suatu serapan antarbintang. Nyatanya, data dalam bentuk diagram sebaran tersebut justru memberi hasil yang cukup menyimpang dari hubungan linear sebab data cenderung mengalami kemiringan yang ditunjukkan melalui garis putus-putus miring tersebut. Hal ini menguatkan teori adanya gas dan debu antarbintang

II.3.3 Ekstensi dan Pemerahan MAB

Secara visual, bukti keberadaan MAB tampak pada anomali citra Barnard 68 (lihat Gambar II.16). Objek yang teramati pada panjang gelombang optik tersebut tampak sebagai suatu lubang gelap. Akan tetapi, setelah dilakukan visualisasi gambar pada panjang gelombang yang lebih panjang yakni inframerah, memperjelas keberadaan awan hitam yang menghalangi bintang latar



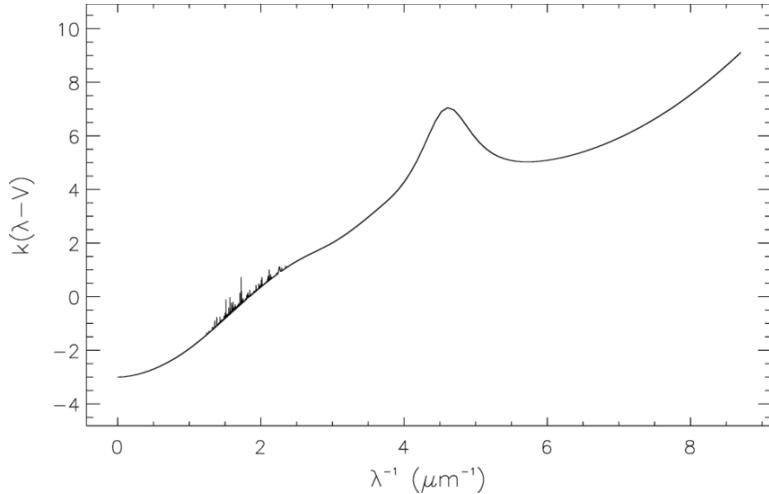
Gambar II.16: Perbandingan citra Barnard 68 melalui; (a) komposisi warna pada panjang gelombang optik sebagai warna sejati dan (b) komposisi warna antara panjang gelombang visual dengan inframerah menggunakan warna semu (*false color*) dominasi filter merah dan hijau. (Sumber gambar: ESO)

belakang dan menurunkan intensitas bintang semula, fenomena ini dinamakan dengan ekstensi MAB A_λ dengan satuan magnitudo (mag). Formulasi ekstensi MAB berdasarkan penurunan intensitas atau fluks ditunjukkan melalui persamaan (II.13). Sehubungan dengan ketebalan optis pada persamaan (II.8), maka bentuk lain dari ekstensi ditunjukkan pada persamaan (II.14).

$$A_\lambda = 2.5 \log_{10} \left(\frac{F_c}{F_\lambda} \right) \quad (\text{II.13})$$

$$A_\lambda = 2.5 \log_{10} e^\tau = 1.086\tau \quad (\text{II.14})$$

Besar ekstingsi bergantung panjang gelombang. Pada kasus daerah lebih panjang, besar ekstingsi akan menuju nilai 0 (melalui asumsi panjang gelombang $\lambda \rightarrow \infty$ sementara kecerlangan bintang di panjang gelombang biru (panjang) lebih mudah mengalami ekstingsi dibandingkan panjang gelombang merah (pendek). Kurva ekstingsi dapat dilihat pada Gambar II.17 yang dapat menjelaskan konsep efek pemerahan MAB.



Gambar II.17: Kurva ekstensi MAB bidang galaksi. (Sumber gambar: Joblin dkk., 2011)

Penamaan konsep ini terjadi berdasarkan penglihatan visual cahaya bintang yang mengalami ekstensi di panjang gelombang biru akan tampak berwarna kemerahan. Pengukuran besaran pemerahan MAB mengadaptasi konsep indeks warna dengan menerapkan standardisasi penomoran warna pada bintang menggunakan sistem filter UBV , digunakanlah indeks warna B sebagai nilai kecerlangan bintang di filter biru dan V sebagai nilai kecerlangan bintang di visual atau pendek. Pemerahan MAB dinotasikan sebagai $E(B-V)$ sesuai persamaan (II.15) dengan A_B sebagai ekstensi di filter biru dan A_V sebagai ekstensi di filter merah.

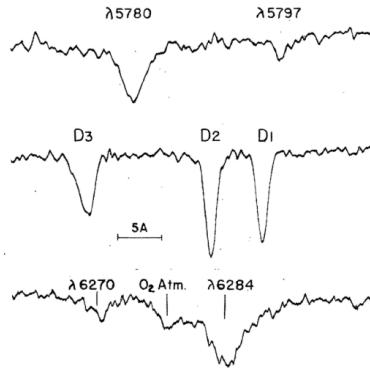
$$E(B-V) = A_B - A_V = (B-V) - (B-V)_0 \quad (\text{II.15})$$

II.4 *Diffuse Interstellar Bands* (DIB)

II.4.1 Sejarah DIB

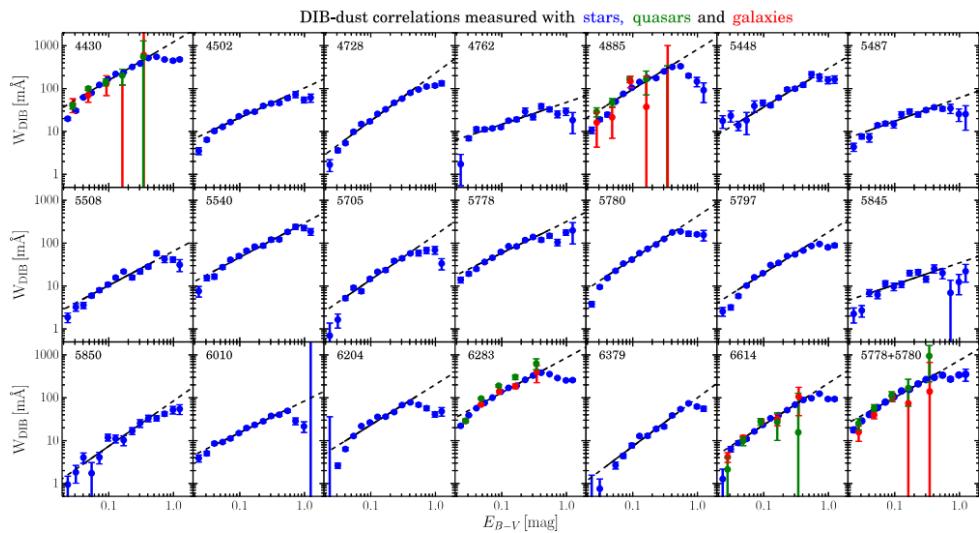
Diffuse Interstellar Bands (DIB) merupakan profil absorpsi lemah yang cukup lebar dan muncul pada spektrum bintang termerahkan oleh MAB dan tidak bersesuaian dengan garis atom ataupun molekul yang diketahui di laboratorium. Penamaan "diffuse" pada fitur garis seperti ini bermula pada penelitian penelitian spektrum bintang kelas B sejak satu abad silam (Heger, 1922). Saat itu ditemukan profil garis pada $\lambda 5780.01$ dan $\lambda 5797.20$ yang tidak diketahui pencetus yang menyebabkannya. Kemudian dilakukan penelitian garis antar-bintang di HD 183143 (Merril dan Wilson, 1938) dan ditemukan profil $\lambda 5780$

dan $\lambda 5797$ memiliki karakteristik profil serapan yang "menyebar (*diffuse*)" dan tidak begitu tajam.

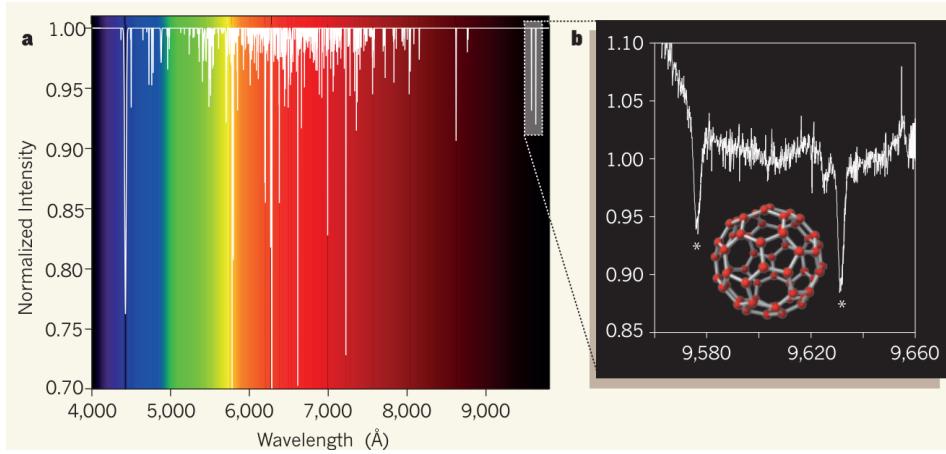


Gambar II.18: Penelusuran Jejak Garis MAB HD 183143 menunjukkan adanya DIB $\lambda 5780$ dan $\lambda 5797$. (Sumber gambar: Merril dan Wilson, 1938)

Bukti munculkan DIB diakibatkan oleh MAB diperoleh melalui studi statistik korelasi antara lebar ekivalen DIB sebagai parameter kekuatan profil terhadap pemerahan oleh debu antarbintang yang ditunjukkan pada Gambar (II.20). Terlihat ada tiga sebaran plot dengan tiap warna menyatakan objek pengukur DIB yakni biru untuk bintang, hijau untuk kuasar, dan merah untuk galaksi. Terlihat bahwasanya semakin besar nilai pemerahan maka kekuatan profil DIB akan meningkat pula.



Gambar II.19: Korelasi 20 profil DIB dengan properti antara lebar ekivalen dengan pemerahan MAB. (Sumber gambar: Lan dkk., 2015)



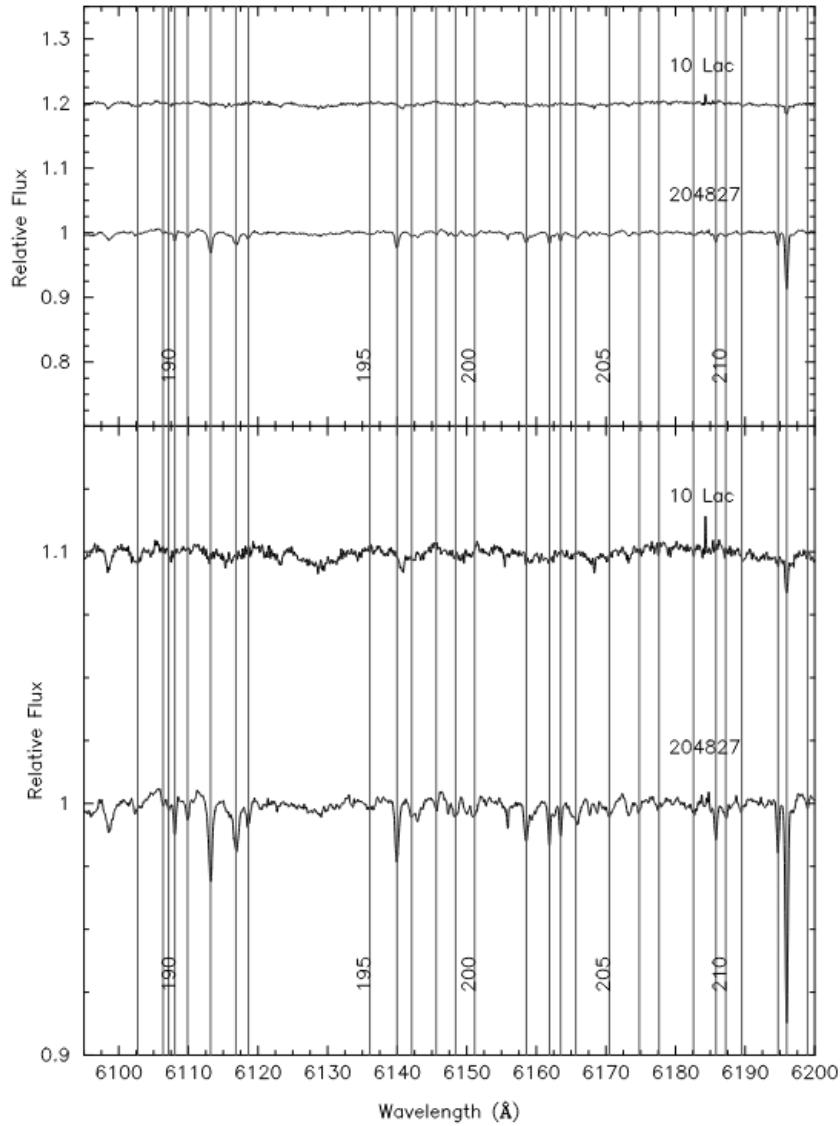
Gambar II.20: Visualisasi DIB di Panjang Gelombang Visual dan Inframerah serta korelasi dengan molekul C_{60}^+ . (Sumber gambar: Foing dan Ehrenfreund, 2015 berdasarkan Cami, 2024)

Studi karakteristik DIB secara perlahan mulai berhasil mengungkap pertanyaan perihal pencetus serapan tersebut. Misalnya saat ditemukannya dua profil DIB pada daerah inframerah $\lambda 9577$ dan $\lambda 9632$ (Foing dan Ehrenfreund, 1994) yang berkorelasi kuat dengan profil laboratorium sintetik molekul C_{60}^+ dengan panjang gelombang diam $\lambda 9577.5$ dan $\lambda 9632.7$ (Campbell dkk., 2015). Penemuan lain menunjukkan beberapa profil DIB, salah satunya DIB $\lambda 4963$ yang berkorelasi kuat dengan molekul C_2 (Thorburn, 2003). Hal ini memberi indikasi DIB mungkin berasosiasi dengan molekul kompleks organik di awan antarbintang. Di sisi lain, DIB juga berpotensi menjadi pelacak (*tracer*) struktur dan kinematika MAB di bidang galaksi (Puspitarini, 2019). Serangkaian alasan inilah yang mengarahkan beragam pencarian dan pembangunan katalog DIB oleh berbagai misi dan penelitian.

II.4.2 Katalog Hobbs: HD 204827

Salah satu penelitian yang telah memberi kontribusi besar dalam pemahaman DIB ialah katalog Hobbs yang menggunakan bintang HD 204827 (Hobbs, 2008). Bintang kelas spektrum O9.5V ini memiliki nilai pemerahan $E(B - V) = 1.11$ serta magnitudo visual $V = 7.94$. Spektrum bintang ini diperoleh menggunakan pengamatan pada teleskop 3.5 meter dan ARC *Echelle Spectograph* (ARCES) di Observatorium *Apache Point* dengan kemampuan daya pisah spektograf $R = 38000$ sehingga dihasilkan kualitas rerata spektrum $S/N = 750$. Upaya penelusuran jejak DIB pada spektrum dilakukan dengan membandingkan spektrum HD 204827 dengan Bintang 10 Lac, bintang dengan kelas spektrum O9V yang tidak begitu termerahkan $E(B - V) = 0.11$. Dari

rentang panjang gelombang $3900 \leq \lambda \leq 8100 \text{ \AA}$, diperoleh katalog yang terdiri dari 380 profil DIB disertai informasi *central wavelength* λ_c , FWHM, dan lebar ekivalen W_λ (lihat Tabel II.4). Merujuk pada populasi profil, 113 di antaranya merupakan profil DIB baru (detail tiap rentang panjang gelombang dapat dilihat pada Tabel II.5). DIB baru yang banyak ditemukan pada jangkauan $\lambda \leq 5300 \text{ \AA}$ ini terkategori sebagai DIB sempit dan lemah.



Gambar II.21: Profil DIB pada Spektrum HD 204827 dengan bintang pembanding 10 Lac pada $6100 \leq \lambda < 6200 \text{ \AA}$. (Sumber gambar: Hobbs, 2008)

Tabel II.4: Beberapa Profil DIB Katalog Hobbs HD 204827

# ^a	λ_c ^b (Å)	W_λ ^c (mÅ)	FWHM (Å)
187	6102.72	6.1	1.22
188	6106.36	2.5	0.48
189	6107.16	1.5	0.45
190	6108.05	5.6	0.37
191	6109.88	4.2	0.50
192	6113.18	24.3	0.68

^a Nomor katalog

^b Central wavelength.

^c Lebar ekivalen.

Sumber tabel: Hobbs, 2008.

Tabel II.5: Tabel Statistik Katalog DIB HD 204827

DIB #	λ (Å)	$\Delta\lambda$ (Å)	Sp ^a	Baru	Lama	Fraksi ^b
1-50	$3900 < \lambda < 5300$	1400	28	35	15	0.70
51-100	$5300 < \lambda < 5707$	407	8.1	21	29	0.49
101-150	$5707 < \lambda < 5928$	221	4.4	14	36	0.28
151-200	$5928 < \lambda < 6155$	227	4.5	12	38	0.24
201-250	$6155 < \lambda < 6417$	262	5.2	10	40	0.20
251-300	$6417 < \lambda < 6694$	277	5.5	7	43	0.14
301-350	$6694 < \lambda < 7074$	380	7.6	8	42	0.16
350-380	$7074 < \lambda < 8100$	1026	34.2	6	24	0.20

^a Nilai rata-rata spasi DIB di daerah jangkauan λ .

^b Pembagian antara jumlah DIB baru dengan total DIB (DIB baru ditambah DIB lama) di daerah jangkauan λ .

Sumber tabel: Hobbs, 2008.

II.4.3 Katalog Hobbs: HD 183143

Katalog DIB dibangun kembali dengan menggunakan spektrum bintang HD 183143 (Hobbs, 2009) yang telah diamati pada publikasi sebelumnya (Merril dan Wilson, 1938). Bintang dengan kelas spektrum B7Iae ini memiliki nilai pemerahan $E(B - V) = 1.27$ serta rerata kecerlangan $V = 6.86$. Instrumen yang digunakan dalam memperoleh spektrum ini sama dengan instrumen yang digunakan pada Katalog Hobbs sebelumnya (lihat Subbab II.4.3). Spektrum yang digunakan memiliki $S/N = 1000$. Selanjutnya, spektrum HD 183143 dibandingkan dengan bintang HD 34805 atau β Orionis, bintang minim pemerahan $E(B - V) \approx 0.00$ (lihat pada Tabel II.8). Penelusuran jejak DIB diperoleh pada rentang $3900 \leq \lambda \leq 8100$ Å dengan menghitung parameter yang sama pada HD 204827 yakni FWHM, lebar ekivalen W_λ , dan *central*

wavelength λ_c (lihat Tabel II.7. Total DIB yang ditemukan ialah 414 profil dengan 135 di antaranya merupakan profil yang baru teramati dan tidak ditemukan pada katalog DIB HD 204827. Profil DIB baru banyak ditemukan di jangkauan $\lambda \leq 5620 \text{ \AA}$.

Tabel II.6: Tabel Statistik Katalog DIB HD 183143

DIB #	$\lambda (\text{\AA})$	$\Delta\lambda (\text{\AA})$	Sp ^a	Baru	Lama	Fraksi ^b
1-50	$3900 < \lambda < 5620$	1720	34.4	20	30	0.40
51-100	$5620 < \lambda < 5980$	360	7.2	14	36	0.28
101-150	$5980 < \lambda < 6190$	210	4.2	13	37	0.26
151-200	$6190 < \lambda < 6450$	260	5.2	8	42	0.16
201-250	$6450 < \lambda < 6700$	250	5.0	13	37	0.26
251-300	$6700 < \lambda < 6842$	142	2.8	23	27	0.46
301-350	$6842 < \lambda < 7230$	388	7.8	17	33	0.34
350-400	$7230 < \lambda < 7715$	485	9.7	6	24	0.20
401-414	$7715 < \lambda < 8100$	385	7.7	8	6	0.57

^a Nilai rata-rata spasi DIB di daerah jangkauan λ .

^b Pembagian antara jumlah DIB baru dengan total DIB (DIB baru ditambah DIB lama) di daerah jangkauan λ .

Sumber tabel: Hobbs, 2009.

Tabel II.7: Beberapa Profil DIB Katalog Hobbs HD 183143

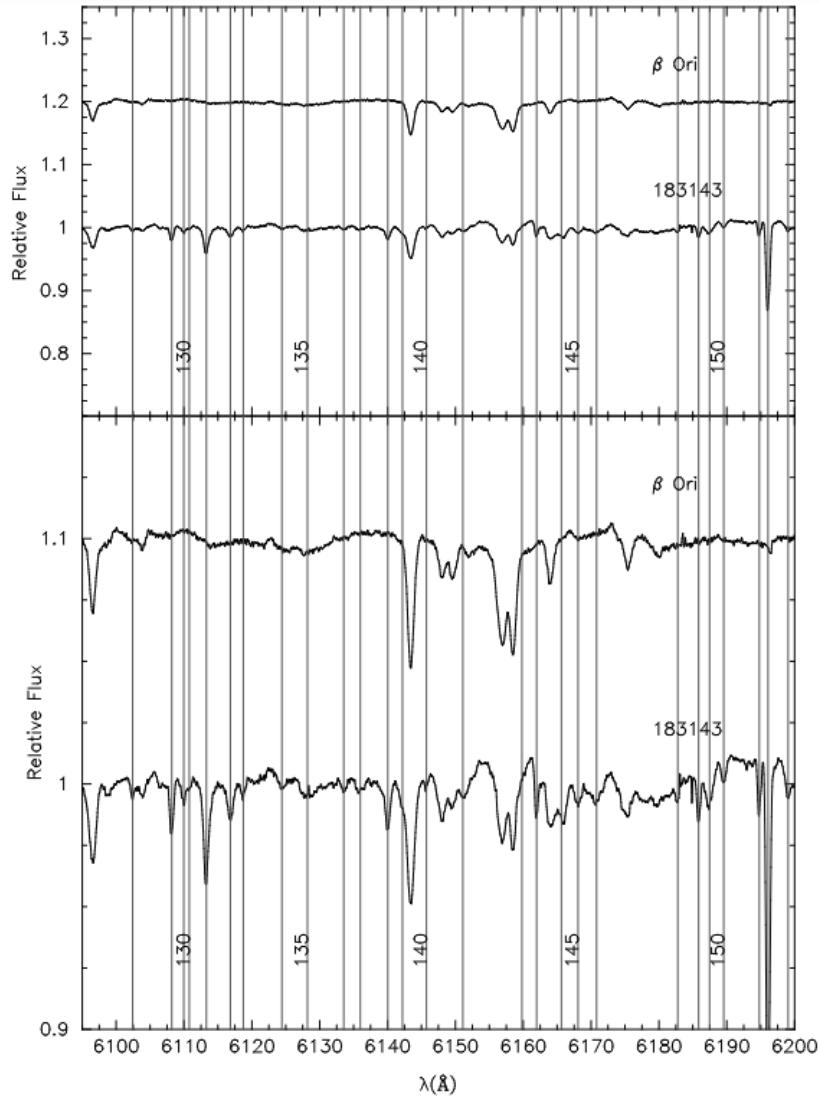
# ^a	λ_c ^b (\AA)	W_λ ^c (m\AA)	FWHM (\AA)
127	6102.43	3.5	0.64
128	6108.19	12.7	0.60
129	6109.95	7.5	0.72
130	6110.79	2.6	0.57
131	6113.29	41.5	0.92
132	6116.29	13.8	0.91

^a Nomor katalog

^b Central wavelength

^c Lebar ekivalen

Sumber tabel: Hobbs, 2009



Gambar II.22: Profil DIB pada Spektrum HD 183143 dengan bintang pembanding β Orionis rentang $6100 \leq \lambda < 6200$ Å. (Sumber gambar: Hobbs, 2009)

II.4.4 Katalog *Apache Point Observatory* (APO)

Pengembangan katalog DIB dilakukan pada 25 bintang target (Fan, 2019) memanfaatkan instrumentasi yang sama dengan katalog HD 204827 (Subbab II.4.3) dan HD 186745 (Subbab II.4.2) pada Observatorium *Apache Point*. Katalog DIB ini dinamakan dengan Katalog *Apache Point Observatory* (APO) dengan perluasan spektrum mencakup rentang $4000 \leq \lambda \leq 9000$ Å. Katalog APO berhasil menemukan 559 profil DIB dan mengonfirmasi seluruh keberadaan DIB dari katalog Hobbs sebelumnya. Parameter dalam katalog APO diambil dari nilai rata-rata parameter profil garis meliputi rerata *central wave-*

Tabel II.8: 25 Bintang Target dan Bintang Pembanding untuk penelusuran DIB pada katalog DIB Observatorium *Apache Point*

Bintang Target			Bintang Pembanding		
Nama Bintang (HD/BD)	Kelas Spektral	E(B - V) (mag)	Nama Bintang (HD/BD)	Kelas Spektral	E(B - V) (mag)
20041	A0Ia	0.72	46300	A0Ib	0.01
43384	B3Ib	0.58	52089	B2II	0.01
147084	A5II	0.73	186377	A5III	0.04
168625	B8Ia	1.48	34085	B8Iae	0.00
BD +40deg4220	O7f	1.99	47839	O7Ve	0.07
183143	B7Iae	1.27	63975	B8II	0.00
204827	O9.5V + B0.5III	1.11	36959	BIV	0.03

Sumber tabel: Fan, 2019

velength λ_c , FWHM, dan lebar ekivalen dengan rujukan katalog sebelumnya (lihat Tabel II.9). Katalog lengkap tersedia pada tautan basis data¹. Salah satu permasalahan dari katalog ini ialah memastikan DIB yang berada di sekitar serapan atmosfer Bumi atau dinamakan spektrum *telluric* (Adelman dkk., 1996). Serapan ini berdampak pada sulitnya pengukuran parameter DIB yang sesuai. Alhasil, profil DIB yang diragukan tersebut ditandai dengan panah berwarna merah (ditunjukkan pada Gambar II.24).

Tabel II.9: Parameter DIB Katalog APO dibandingkan dengan Katalog Hobbs

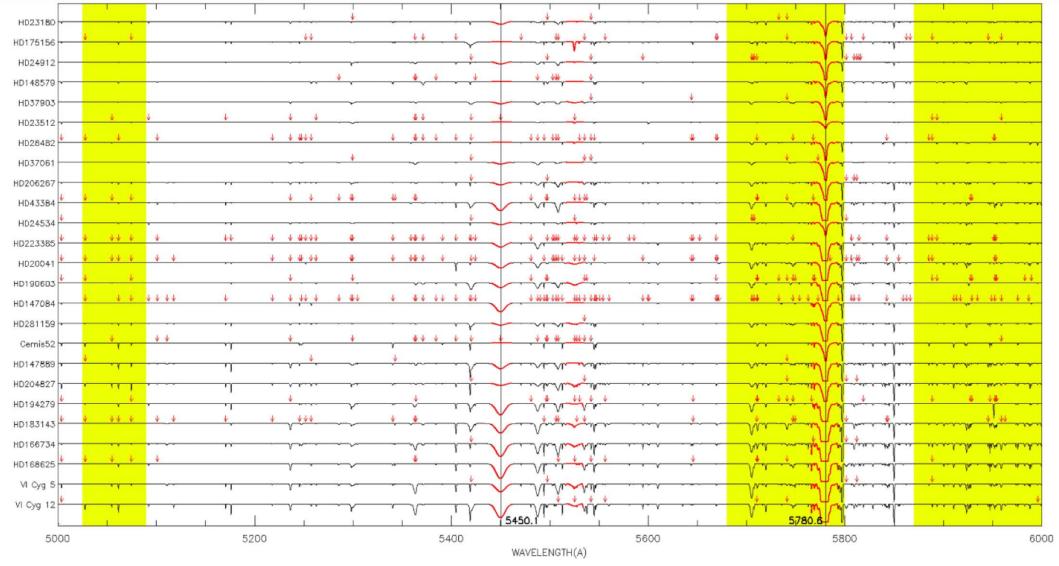
No	Avg. λ_c (Å)	Avg. $[\frac{W_\lambda}{E(B-V)}]^a$ (mÅ mag ⁻¹)	Avg. FWHM (km s ⁻¹)	Atlas λ_c^b (Å)	Atlas FWHM ^b (km s ⁻¹)
1	4259.00	9.72	83.74	*/4259.01	*/74.0
2	4363.83	7.64	41.19	*/4363.86	*/31.6
3	4494.53	13.89	142.17	4494.55/*	139.5/*
4	4501.51	73.84	168.92	4501.66/4501.79	200.6/136.6
5	4504.45	11.64	54.95

^a Pembagian lebar ekivalen dengan pemerahan berdasarkan pengukuran karakteristik DIB pada MAB (Fan, 2017)

^b Berdasarkan data katalog (Hobbs, 2008) dan (Hobbs, 2009)

Sumber tabel: Fan, 2019

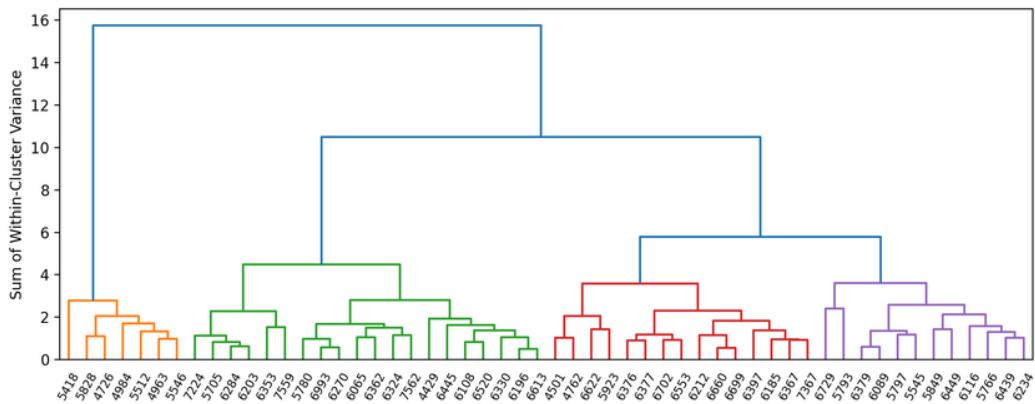
¹<https://dib.uchicago.edu/>



Gambar II.23: 25 spektrum sintetik bintang target Katalog APO pada panjang gelombang $5000 \leq \lambda \leq 6000 \text{ \AA}$ menunjukkan keberadaan profil DIB yang terukur parameter profil (garis berwarna merah), letak profil DIB yang tidak terukur parameter profil (garis panah berwarna merah), serta keterlibatan *Telluric* ditunjukkan pada area dengan kotak berwarna kuning Fan, 2019

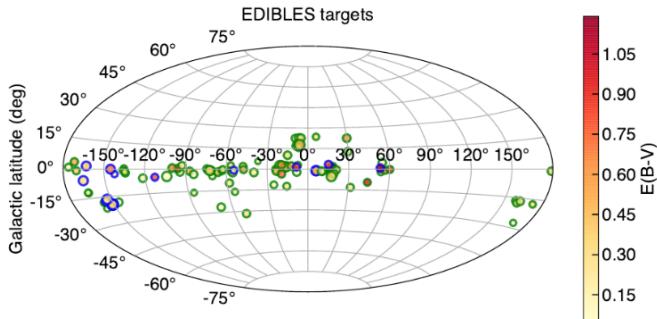
Katalog APO juga digunakan dalam pengelompokkan profil DIB sebagai *family of DIB* (konsep kekerabatan kelompok berdasarkan kesamaan karakteristik profil) melalui metode hierarki aglomeratif dan *K-means clustering* (Fan, 2022). Pengelompokan ini didasari atas pemilihan 54 profil DIB kuat berdasarkan katalog APO meliputi; kelompok DIB yang berasosiasi dengan molekul C_2 (Thorburn, 2003), kelompok DIB yang berasosiasi dengan $\lambda 5780$ (diberi simbol σ), kelompok DIB yang berasosiasi dengan $\lambda 5797$ (diberi simbol ζ), serta kelompok DIB yang belum teridentifikasi. Gugusan empat kelompok tersebut diklasifikasikan menjadi:

- (i) Grup DIB σ ; $\lambda 4429, \lambda 5705, \lambda 5780, \lambda 6065, \lambda 6108, \lambda 6196, \lambda 6203, \lambda 6270, \lambda 6284, \lambda 6324, \lambda 6330, \lambda 6353, \lambda 6353, \lambda 6362, \lambda 6445, \lambda 6520, \lambda 6613, \lambda 6993, \lambda 7224, \lambda 7559$, dan $\lambda 7562$
- (ii) Grup DIB ζ ; $\lambda 5545, \lambda 5766, \lambda 5793, \lambda 5797, \lambda 5849, \lambda 6089, \lambda 6116, \lambda 6234, \lambda 6379, \lambda 6439, \lambda 6449$, dan $\lambda 6729$
- (iii) Grup DIB C_2 ; $\lambda 4726, \lambda 4963, \lambda 4984, \lambda 5418, \lambda 5512, \lambda 5546$, dan $\lambda 5828$
- (iv) Belum terkelompokkan; $\lambda 4501, \lambda 4762, \lambda 5923, \lambda 6185, \lambda 6212, \lambda 6367, \lambda 6376, \lambda 6397, \lambda 6553, \lambda 6622, \lambda 6660, \lambda 6699, \lambda 6702$, dan $\lambda 7367$



Gambar II.24: Dendrogram klaster hierarkikal aglomeratif menunjukkan 54 kerabatan DIB berdasarkan kelompok DIB σ (warna hijau), kelompok DIB ζ (warna ungu), kelompok DIB C₂ (warna jingga), dan DIB yang belum terkelompokkan (warna merah). (Sumber gambar: Fan, 2022)

II.4.5 ESO *Diffuse Interstellar Bands Large Exploration Survey* (EDIBLES)



Gambar II.25: Distribusi bintang target EDIBLES di koordinat galaktik dengan representasi besar pemerahan. (Sumber gambar: Cox dkk., 2017)

Pencarian profil DIB semakin intensif dalam penelitian astrofisika sehingga dibentuk suatu proyek yang didedikasikan untuk penelusuran DIB dengan nama ESO *Diffuse Interstellar Bands Large Exploration Survey* (EDIBLES) (Cox dkk., 2017). EDIBLES dirancang dengan berbagai misi dengan tujuan untuk; (a) menemukan korelasi kuat lemahnya DIB terhadap agen pencetusnya, (b) menemukan korelasi profil DIB terhadap kondisi lingkungan MAB, (c) mempelajari parameter fisis profil, dan (d) mengkaji kelimpahan MAB pada perilaku DIB yang muncul. Terdapat 114 bintang target dengan 96 bintang di antaranya ialah sampel yang sudah dianalisis parameter pada penelitian-penelitian

Europe Southern Observatory (ESO) sebelumnya. Distribusi bintang target pada koordinat galaktik ditunjukkan pada Gambar II.25 dan beberapa sampel bintang target dapat dilihat pada Tabel II.10. Instrumen yang digunakan pada bintang target EDIBLES ialah *Ultraviolet Visual Echelle Spectograph* (UVES) pada teleskop unit 2 (UT2) 8 meter. UVES merupakan salah satu spektograf multiobjek dengan daya pisah lengan biru ($R \sim 70000$) untuk pengamatan di panjang gelombang visual dan daya pisah lengan merah ($R \sim 100000$) untuk panjang gelombang inframerah. Kemampuan spektograf ini menghasilkan nilai S/N tinggi yaitu ($S/N \sim 500 - 1000$).

Tabel II.10: Beberapa bintang target pada proyek EDIBLES

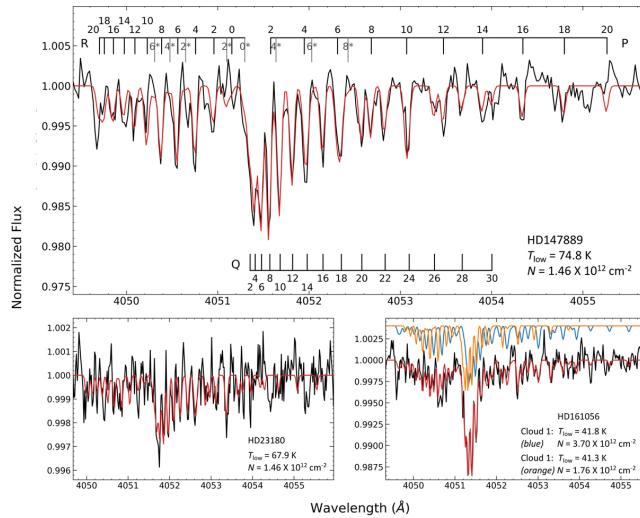
No	Nama Bintang (HD)	Kelas Spektral	$E(B - V)$ (mag)	A_V^a (mag)	Komentar ^b
1	147933	B2IV	0.43	2.58	Diamati
2	157246	B1Ib	0.06	0.17	Diamati
3	165319	O9.7Ib	0.78	2.70	Diusulkan
4	167971	O8Iaf + O4/5	1.01	3.54	Diamati
5	168076	O4III	0.76	2.64	Diusulkan
6	186745	B8Ia	0.88	2.98	Diamati
7	303308	O4.5V	0.43	1.36	Diamati

^a Ekstingsi visual bintang.

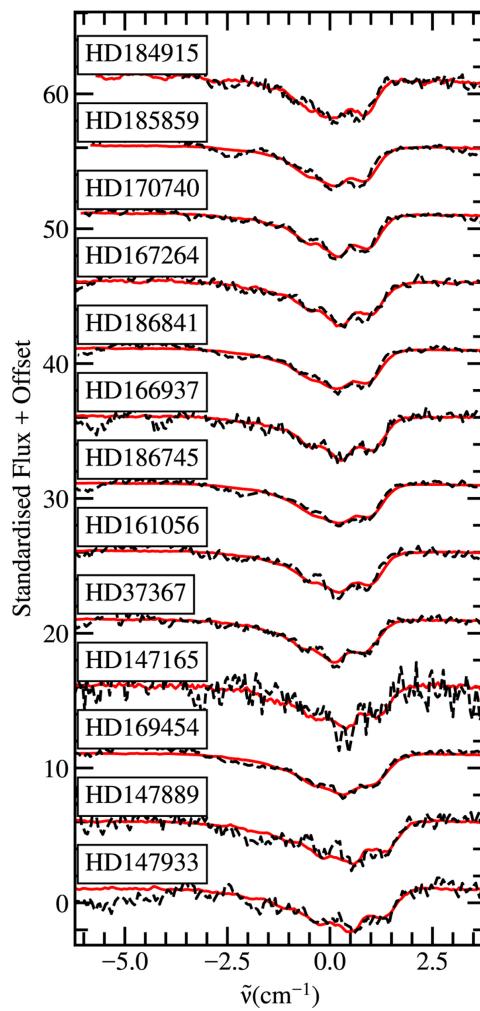
^b Jenis bintang target dari kelompok 96 bintang yang diamati (*observed*) atau kelompok 18 bintang yang diusulkan (*proposed*).

Sumber tabel: Cox dkk., 2017.

EDIBLES didedikasikan untuk memecahkan misteri DIB, terlebih dengan kemajuan teknologi dan komputasi saat ini. Salah satu misi terbaru ialah upaya pencocokan beberapa profil DIB dengan kolom kepadatan massa C₃ (lihat Gambar II.26 dan studi korelasi *family of DIB* (Fan, 2022) yang membuat hasil keterkaitan erat antara DIB $\lambda 6521$ dengan $\lambda 6641$ (lihat Gambar II.27).



Gambar II.26: Salah satu misi EDIBLES: mencari korelasi C_3 pada DIB $\lambda 4051$. (Sumber gambar: Fan, 2024)



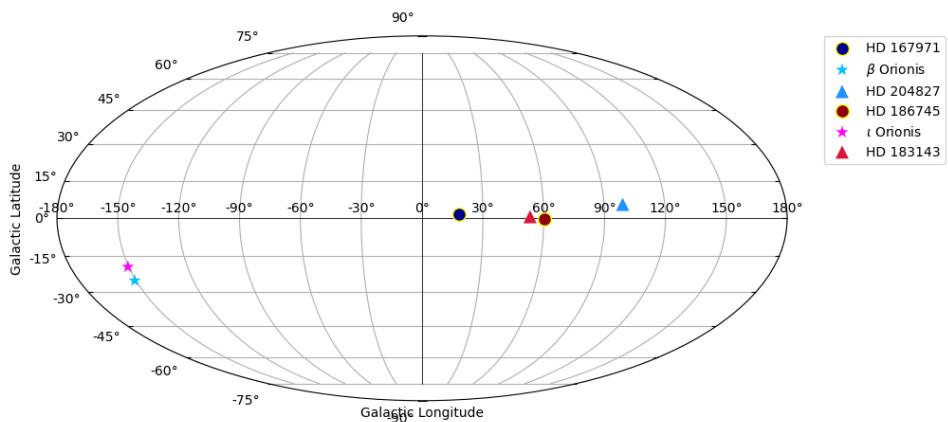
Gambar II.27: Salah satu misi EDIBLES: membandingkan DIB $\lambda 6614$ (merah) dengan DIB $\lambda 6521$ (hitam). (Sumber gambar: Ebenbichler, 2024)

BAB III

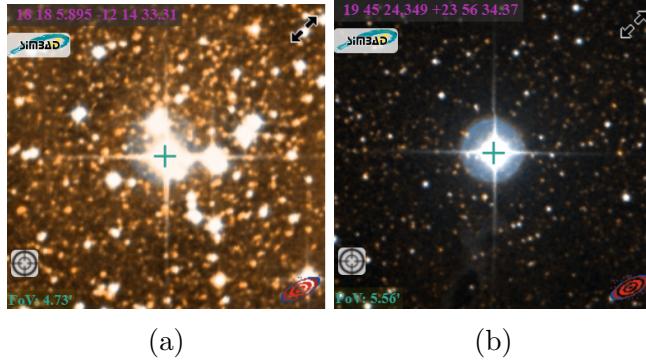
DATA DAN METODOLOGI PENELITIAN

III.1 Data Penelitian

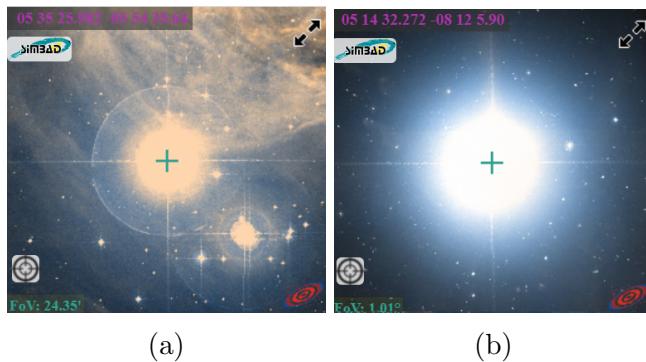
Terdapat 2 (dua) buah bintang panas yang digunakan sebagai target bintang deteksi DIB yakni bintang HD 167971 dan 186745. Pemilihan kedua bintang ini didasari oleh status kedua bintang sebagai target dalam proyek EDIBLES (lihat kembali Subbab II.4.5) dan memiliki ekstensi MAB yang signifikan. Kedua bintang disandingkan pada bintang pembanding minim pemerahan yakni Bintang ι Orionis dan β Orionis. Berdasarkan lokasi pada koordinat galaktik (lihat Gambar III.1), bintang target berada pada bidang galaksi yang kaya akan debu (lihat peta distribusi MAB pada Gambar II.14). Lokasi bintang target kedua yakni HD 186745 juga berada di arah pandang bintang pada Katalog Hobbs: HD 183143 sehingga memungkinkan profil temuan DIB dihasilkan oleh awan molekuler yang sama. Selain spektrum bintang, model spektrum *telluric* juga digunakan untuk mengoreksi spektrum dari serapan atmosfer Bumi.



Gambar III.1: Koordinat galaktik bintang target (simbol lingkaran), bintang pembanding (simbol bintang), serta bintang Katalog Hobbs (simbol segitiga)



Gambar III.2: Citra bintang target: (a) HD 167971 dan (b) HD 186745. (Sumber gambar: SIMBAD)



Gambar III.3: Citra bintang pembanding minim pemerahan: (a) ι Orionis dan (b) β Orionis. (Sumber gambar: SIMBAD)

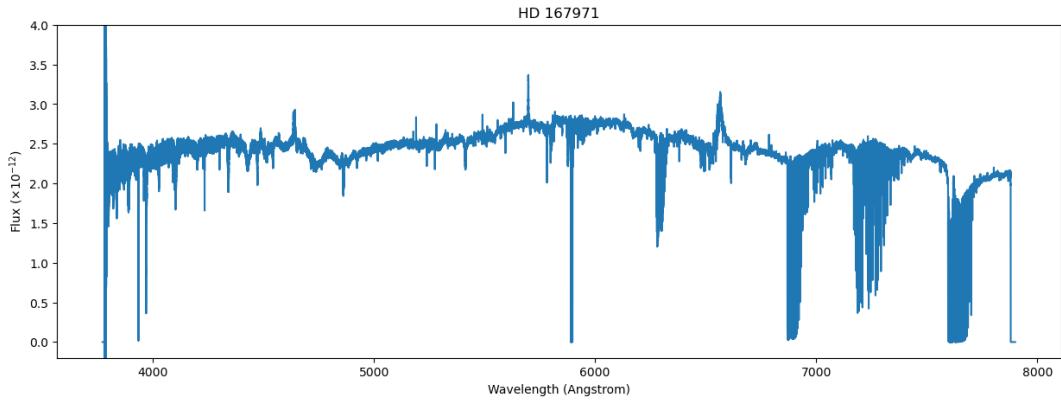
III.1.1 Bintang Target dan Bintang Pembanding

III.1.1.1 Bintang Target Pertama: HD 167971

HD 167971, bintang yang berada pada rasi Serpens, merupakan bintang panas dengan kelas spektral O8Iaf (Demircan, 1987). Properti parameter Bintang HD 167971 dicantumkan pada Tabel III.1. Data spektrum bintang HD 167971 diperoleh melalui layanan portal ESO *Archive Science Portal*¹. Data mentah spektrum diperoleh melalui pengamatan *Echelle SPectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations* (ESPRESSO) bersolusi tinggi ($R \approx 190000$) yang terpasang pada *Very Large Telescope* (VLT) di Observatorium Paranal dengan tanggal pengamatan pada 16 Maret 2019. Spektrum ini memiliki rentang panjang gelombang $3772 \leq \lambda \leq 7900 \text{ \AA}$ dengan kualitas spektrum $\mathbf{S/N} = 230.8$. Fluks spektrum memiliki satuan ($\times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$) (spektrum ditunjukkan pada Gambar III.4). Bintang HD 167971 disandingkan dengan bintang bertipe kelas O yakni Bintang

¹<https://archive.eso.org/scienceportal/home>

ι Orionis (HD 37043) dengan pemerahan rendah $E(B - V) = 0.05$ (Lee, 1967) yang diperoleh pada ESO *Archive Science Portal* menggunakan spektograf ESPRESSO ($R \approx 190000$) dengan kualitas $S/N = 253.9$ dalam rentang dalam rentang $3772 \leq \lambda \leq 7900 \text{ \AA}$.



Gambar III.4: Profil spektrum mentah HD 167971 rentang $3772 \leq \lambda \leq 7900 \text{ \AA}$

Tabel III.1: Properti HD 167971

ID Lain	2MASS J18180589-1214333 TYC 5685-4419-1 WDS J18181-1215A	
Parameter	Deskripsi	Nilai
α_{J2000}	Asensiorekta (RA)	$18^{\text{h}}18^{\text{m}}5.89^{\text{s}}$
δ_{J2000}	Deklinasi (Dec)	$-12^{\circ}14'33.31''$
l_{J2000}	Bujur galaktik	18.25°
b_{J2000}	Lintang galaktik	$+1.68^{\circ}$
v_r	Kecepatan radial (km s^{-1})	14.20 ± 2
π	Paralaks (mili <i>arcsec</i>)	0.7273
μ_{α}	Gerak sejati di RA (mili <i>arcsec</i> tahun $^{-1}$)	0.206
μ_{δ}	Gerak sejati di Dec (mili <i>arcsec</i> tahun $^{-1}$)	-1.979
Spec.	Tipe spektral	O8Iaf + O4/5
$E(B - V)$	Pemerahan (mag)	1.01
B	Magnitudo filter B (mag)	8.27
V	Magnitudo filter V (mag)	7.50
T_e	Temperatur efektif (K)	33000 - 35000
P	Periode (hari)	3.32
Model comp.	Model pembanding	ι Orionis (HD 37043)
$\alpha_{\text{J2000 comp}}$	RA pembanding	$5^{\text{h}}35^{\text{m}}25.98^{\text{s}}$
$\delta_{\text{J2000 comp}}$	Dec pembanding	$-5^{\circ}54'35.64''$
l_{J2000}	Bujur galaktik	209.52°

Parameter	Deskripsi	Nilai
$b_{\text{J}2000}$	Lintang galaktik	-19.58°
π	Paralaks (mili $arcsec$)	1.40
Spec. comp	Tipe spektral	O9III
$E(B - V)_{\text{comp}}$	Pemerahan pembanding (mag)	0.05

Sumber tabel: SIMBAD²

III.1.1.2 Bintang Target Kedua: HD 186745

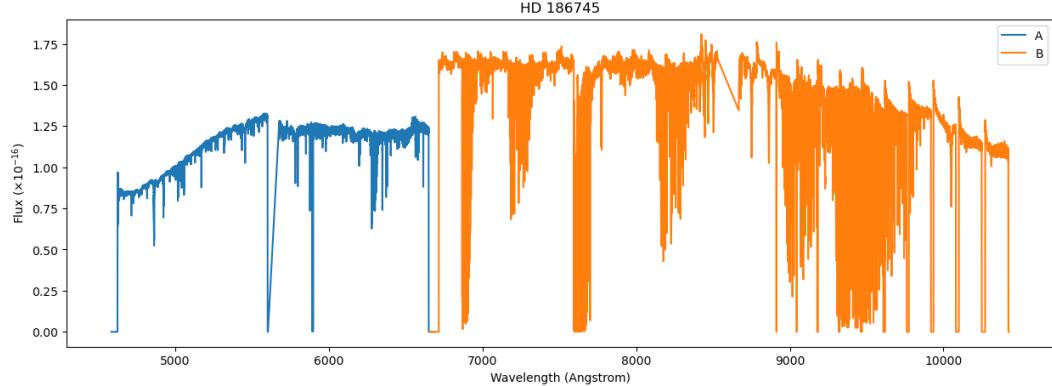
Bintang HD 186745 merupakan bintang panas bertipe spektral B8Ia, berlokasi di rasi bintang Vulpecula dan termasuk kelas Bintang Maharaksasa Berevolusi. Data spektrum diperoleh dari ESO *Archive Science Portal* data instrumen UVES di Observatorium Paranal yang dilatarbelakangi sebagai bintang target misi EDIBLES. Terdapat 2 spektrum mentah dengan rentang panjang gelombang berbeda pada pengamatan pada 9 September 2016 menggunakan resolusi tinggi di lengan merah ($R \approx 107200$). Kualitas rerata spektrum pertama ialah $S/N = 354.3$ dengan rentang panjang gelombang $4583 \leq \lambda \leq 6686 \text{ \AA}$. Kualitas rerata spektrum kedua ialah $S/N = 361$. dengan rentang panjang gelombang $6900 \leq \lambda \leq 10430 \text{ \AA}$. Fluks spektrum memiliki satuan ($\times 10^{-16} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$) (spektrum ditunjukkan pada Gambar III.5). Bintang HD 186745 disandingkan dengan bintang bertipe kelas O yakni Bintang β Orionis (HD 34085) sebagai bintang tanpa pemerahan $E(B - V) = 0.00$ (Hobbs, 2009) yang diperoleh pada ESO *Archive Science Portal* menggunakan *the Fiber-fed Extended Range Optical Spectrograph* (FEROS) beresolusi tidak begitu tinggi ($R \approx 48000$) dengan $S/N = 398.9$ dalam rentang $3527 \leq \lambda \leq 9216 \text{ \AA}$.

Tabel III.2: Properti HD 186745

ID Lain	2MASS J19452433+2356346 BD+23 3760 TYC 2139-588-1	
Parameter	Deskripsi	Nilai
$\alpha_{\text{J}2000}$	Asensiorekta (RA)	19 ^j 45 ^m 24.35 ^s
$\delta_{\text{J}2000}$	Deklinasi (Dec)	+23°56'34.37"
$l_{\text{J}2000}$	Bujur galaktik	60.22°
$b_{\text{J}2000}$	Lintang galaktik	-0.27°
v_r	Kecepatan radial (km s ⁻¹)	1.00±3.7
π	Paralaks (mili $arcsec$)	0.4799
μ_α	Gerak sejati di RA (mili $arcsec$ tahun ⁻¹)	-2.035
μ_δ	Gerak sejati di Dec (mili $arcsec$ tahun ⁻¹)	-5.276
Spec.	Tipe spektral	B8Ia

Parameter	Deskripsi	Nilai
$E(B - V)$	Pemerahan (mag)	0.88
B	Magnitudo filter B (mag)	7.96
V	Magnitudo filter V (mag)	7.03
Model comp.	Model pembanding	β Orionis (HD 34085)
α_{J2000} comp	RA pembanding	5 ^j 14 ^m 32.27 ^s
δ_{J2000} comp	Dec pembanding	-8°12'5.89"
l_{J2000}	Bujur galaktik	209.24°
b_{J2000}	Lintang galaktik	-25.24°
π	Paralaks (mili <i>arcsec</i>)	3.78
Spec. comp	Tipe spektral	B8Iae
$E(B - V)_{\text{comp}}$	Pemerahan pembanding (mag)	0.00

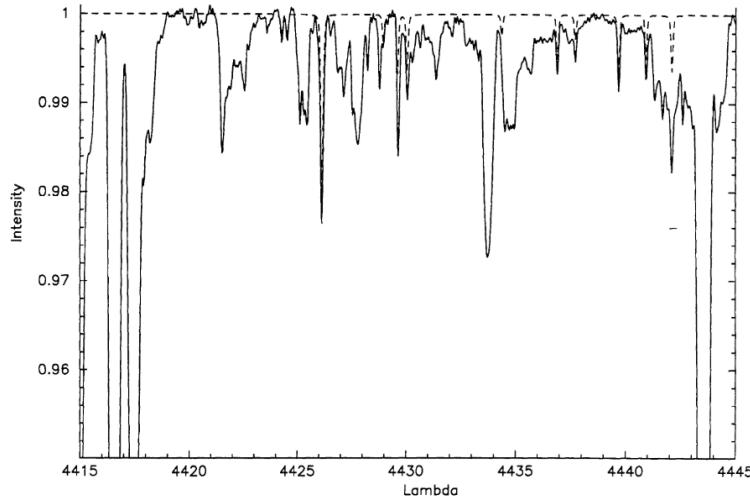
Sumber tabel: SIMBAD



Gambar III.5: Dua profil spektrum mentah HD 186745. Spektrum pertama (warna biru) pada rentang $4583 \leq \lambda \leq 6686 \text{ \AA}$ dan spektrum kedua (warna jingga) pada rentang $6900 \leq \lambda \leq 10430 \text{ \AA}$

III.1.2 Spektrum *Telluric*

Spektrum *telluric* merupakan sekumpulan fitur serapan atau absorpsi yang disebabkan pengurangan intensitas sumber cahaya oleh molekul di atmosfer Bumi (Adelman dkk., 1996). Cahaya dapat dihamburkan oleh berbagai molekul seperti oksigen (O_2), nitrogen (N_2), ozon (O_3), uap air (H_2O), serta aerosol seperti debu silikat atau asam sulfur. Keberadaan kontaminasi *telluric* dapat mengganggu pengamatan bintang. Alhasil, koreksi *telluric* diperlukan dalam pengerjaan analisis dalam penelitian ini.



Gambar III.6: Kontaminasi garis *telluric* pada Bintang Vega pada rentang $4400 < \lambda < 4445$ Å. Garis putus-putus mengindikasikan spektrum sintetik bintang yang bersih dari serapan atmosfer Bumi. (Sumber gambar: Adelman dkk., 1996)

Spektrum *telluric* sintetik yang diperoleh menggunakan ESO *SKYCALC Sky Model*³. Basis data pengolahan model atmosfer Bumi berdasarkan komputasi hasil pengamatan VLT di Cerro Paranal. Selain transmisi *telluric*, ESO *SKYCALC Sky Model* juga dilengkapi fitur lain seperti pemunculan profil sintetik cahaya bulan, cahaya matahari, cahaya jalur zodiak, serta emisi *airglow* (Noll dkk., 2012). Pembahasan terkait metode koreksi *telluric* disajikan pada Subbab III.2.3.

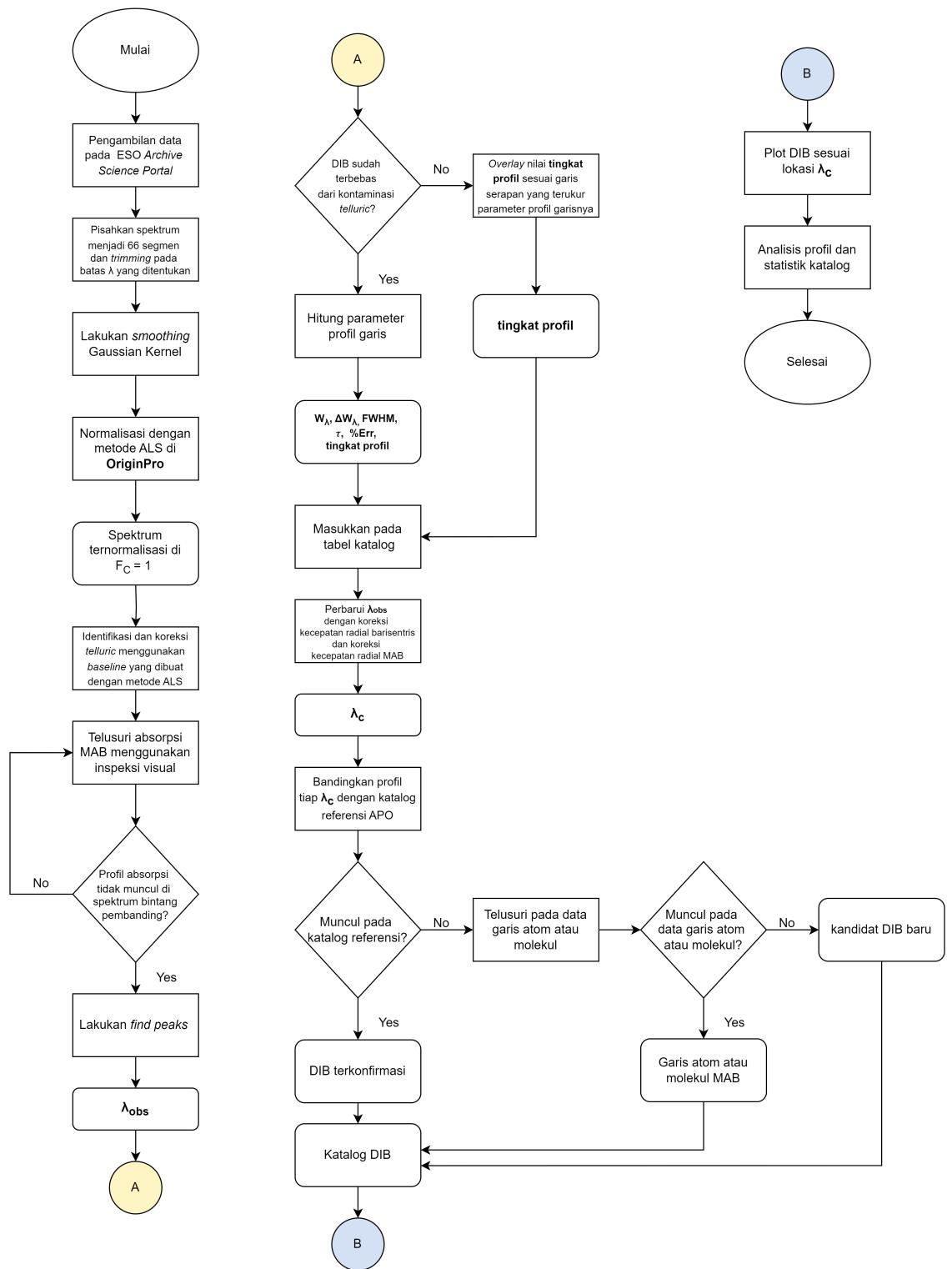
III.2 Metodologi Penelitian

Metode pada penelitian ini ialah analisis spektral. Alur penelitian disusun sesuai alur berpikir pada Gambar III.7 meliputi berbagai langkah yakni penyiapan data, *trimming*, *smoothing*, normalisasi spektrum, koreksi *telluric*, koreksi kecepatan radial, identifikasi DIB, dan kalkulasi parameter profil garis DIB.

III.2.1 Penyiapan Data dan *Smoothing*

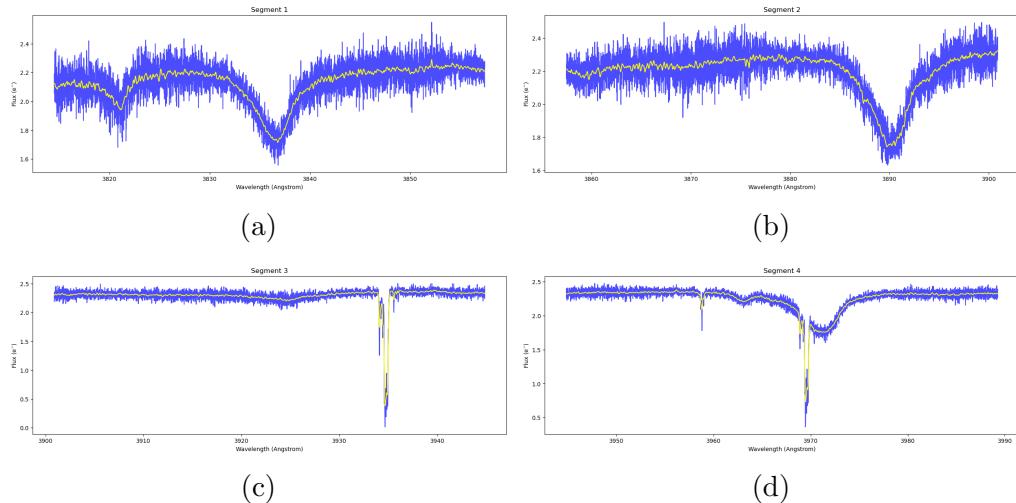
Spektrum mentah bintang target dalam format *Flexible Image Transport System* (FITS) di-*input* pada program komputasi paket *Python Jupyter*. Sehubungan dengan batasan masalah yang telah diajukan, spektrum dibatasi pada

³<https://www.eso.org/observing/etc/skycalc/>



Gambar III.7: Diagram alur berpikir metode penelitian

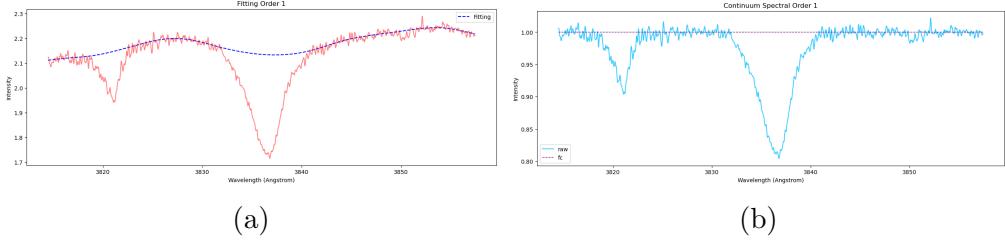
rentang panjang gelombang $4000 \leq \lambda \leq 7800 \text{ \AA}$. Langkah awal dalam menganalisis garis spektrum ialah melakukan normalisasi. Spektrum HD 167971 dan HD 186745 pengamatan pertama terlebih dahulu dipisahkan menjadi 66 segmen sementara spektrum HD 186745 pengamatan kedua dipisahkan menjadi 27 segmen. Guna memudahkan pencarian profil absorpsi spektrum, penulis melakukan *smoothing* melalui modul `scipy.ndimage.gaussian_filter1d`, sebuah teknik melakukan penghalusan data memanfaatkan kernel Gaussian (lihat Gambar III.8). *Smoothing* ini menghaluskan profil sehingga untuk memudahkan analisis akhir. Adapun dalam membandingkan detail profil, beberapa fitur DIB tanpa *smoothing* akan tetap dipertahankan (sebagai bahan analisis untuk Subbab IV.2).



Gambar III.8: Proses *trimming* dan *smoothing* spektrum HD 167971. Garis biru menyatakan spektrum mentah dan garis kuning menyatakan spektrum yang sudah mereduksi derau

III.2.2 Normalisasi

Spektrum yang diperoleh dari arsip menunjukkan karakteristik data yang belum ternormalisasi. Hal ini akan berdampak pada pengukuran parameter DIB lebar ekivalen W_λ dan *central depth* τ sebagai identitas kekuatan profil garis. Dalam penelitian ini, digunakan metode *Asymmetric Least Square* (ALS) dalam perangkat lunak **OriginPro 2024**. Konsep pendekatan ALS ialah dengan menciptakan *baseline* berdasarkan *smooth function* data sesuai persamaan (III.1) (Gallagher). Koefisien \mathbf{y} ialah data ukuran asli spektrum, \mathbf{z} ialah kurva fit *smooth*, \mathbf{W} menyatakan bobot titik data, \mathbf{D} merupakan operator



Gambar III.9: (a) Contoh spektrum HD 167971 (garis merah) dengan *baseline* metode ALS (garis putus-putus biru) dan (b) Spektrum ternormalisasi kontinum

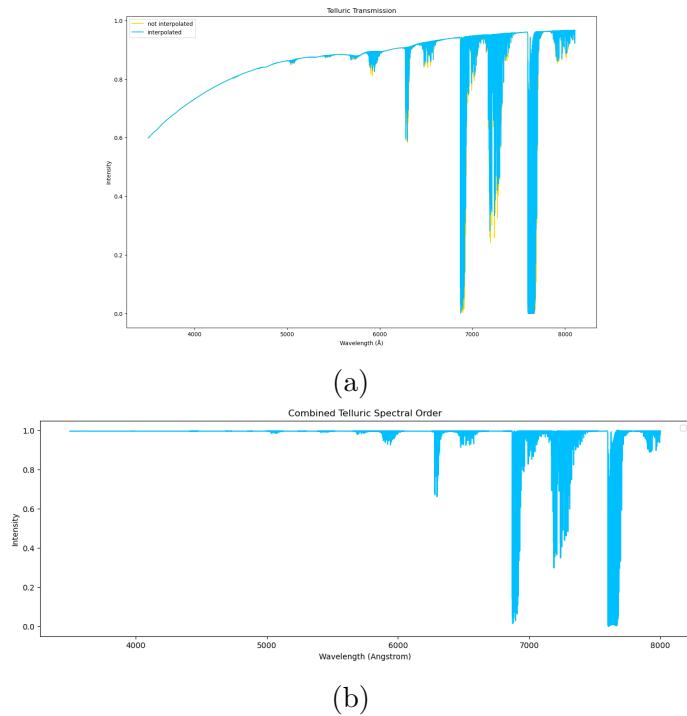
turunan (contoh $D_s z$ merupakan turunan kedua dari z , dan γ merupakan *smoothing factor*. Variabel \mathbf{P} dan \mathbf{a} adalah vektor parameter model yang dapat diabaikan dengan mengasumsikan faktor tersebut berada pada $\mathbf{z} = \mathbf{P}\mathbf{a}$. Fungsi objektif \mathbf{O} pada ALS yang hanya memfokuskan parameter *smoothing s* sehingga faktor lain (\mathbf{e} dan \mathbf{b}) diabaikan dan menghasilkan persamaan (III.2).

$$\begin{aligned} \mathbf{O}(z, a) = & (\mathbf{y} - \mathbf{z})^T \mathbf{W}_0 (\mathbf{y} - \mathbf{z}) + \gamma_s \mathbf{z}^T \mathbf{D}_s^T \mathbf{W}_s \mathbf{D}_s \mathbf{z} \\ & + \gamma_e (\mathbf{z}_e - \mathbf{z}) + \gamma_b (\mathbf{P}\mathbf{a} - \mathbf{z})^T \mathbf{W}_b (\mathbf{P}\mathbf{a} - \mathbf{z}) \end{aligned} \quad (\text{III.1})$$

$$\mathbf{O}(z) = \sum_{i=1}^n (\mathbf{y}_i - \mathbf{z}_i)^2 \mathbf{W}_i + \gamma \sum_{i=1}^n (\mathbf{D}_s \mathbf{z})_i^2 \quad (\text{III.2})$$

Parameter entri yang dimaksud meliputi faktor asimetris (berkaitan dengan bobot nilai \mathbf{W} , nilai faktor menuju nilai 0 untuk kurva positif dan menuju nilai 1 untuk kurva negatif, dipilih nilai 1 sebab absorpsi ialah kurva negatif), *threshold* (jarak kritis z mendekati nilai y dalam mengabaikan *baseline* yang dalam hal ini ialah kurva negatif), *smoothing factor* γ untuk mengatur tingkat kehalusan *baseline* baru, dan iterasi n . Metode ALS akan menghasilkan *baseline* dengan nilai mendekati kontinum spektrum mentah. Normalisasi spektrum dapat dilakukan dengan membagi intensitas spektrum mentah terhadap titik spektrum ALS atau *baseline*. Hasil normalisasi dapat dilihat pada Gambar III.9.

$$F_{norm} = \frac{F_{raw}}{F_{baseline}} \quad (\text{III.3})$$



Gambar III.10: Profil *telluric* sintetik; (a) sebelum normalisasi dan (b) sesudah normalisasi

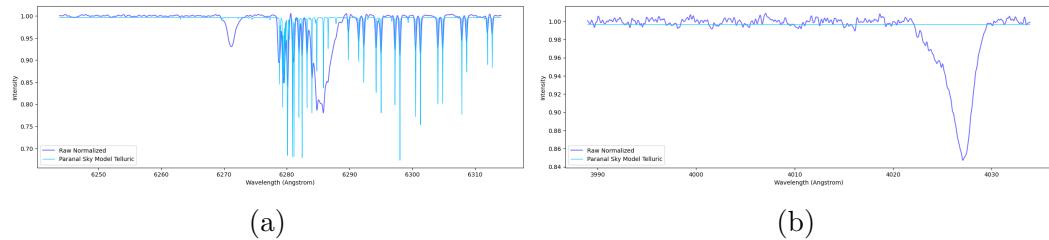
III.2.3 Koreksi Garis-garis *Telluric*

Spektrum *telluric* sintetik yang dihasilkan oleh arsip ESO *SKYCalc* berada dalam kondisi panjang gelombang vakum sementara untuk analisis diperlukan kondisi pada *air wavelength* sebagai indikator efek dispersi atmosfer Bumi. Konversi panjang gelombang vakum menjadi *air wavelength* ditunjukkan melalui persamaan (III.4) (Morton, 2003).

$$\lambda_{\text{air}} = \frac{\lambda_{\text{vac}}}{n} \quad (\text{III.4})$$

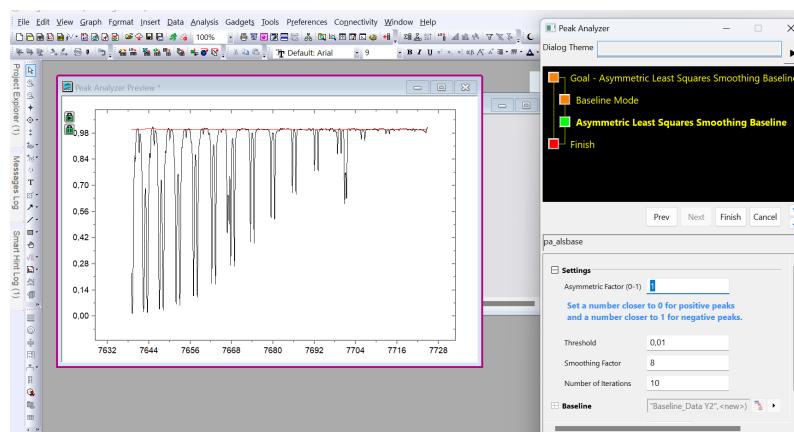
$$n = 1 + 8.06051 \times 10^{-5} + \frac{2.480990 \times 10^{-2}}{132.274 - \sigma^2} + \frac{1.74577 \times 10^{-4}}{39.32957 - \sigma^2} \quad (\text{III.5})$$

Tampak spektrum *telluric* belum ternormalisasi kontinum, alhasil dilakukan normalisasi *telluric* sesuai metode ALS yang dijelaskan pada Subbab III.2.2.

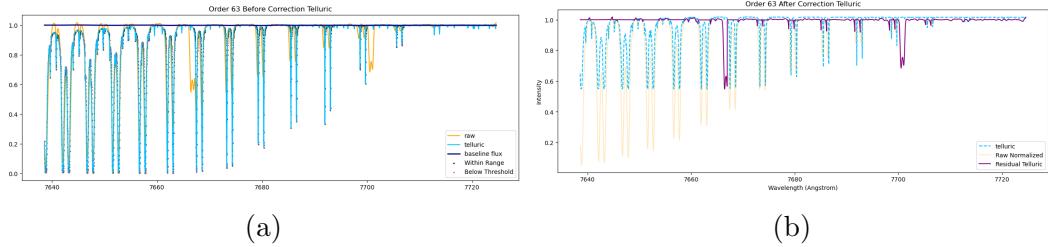


Gambar III.11: Penggabungan spektrum bintang dengan *telluric* pada; (a) daerah kaya akan kontaminasi serapan atmosfer Bumi dan (b) terbebas dari *telluric*

Langkah berikutnya, spektrum *telluric* dihilangkan dengan proses *masking* secara kasar, yakni menggeser panjang gelombang di tiap *trim* menyesuaikan keberadaan *telluric* pada spektrum bintang target yang sudah dinormalisasi. Gambar III.11 menunjukkan perbandingan spektrum bintang yang terkontaminasi dan tidak terkontaminasi *telluric*. Proses penghilangan *telluric* pada spektrum bintang ialah *masking* pada daerah yang penurunan nilai garis *telluric* berdasarkan *threshold* yang dipilih pada fluks kontinu. Mula-mula, dibuat suatu *baseline* dengan metode ALS di OriginPro dengan profil spektrum cenderung mengikuti pola garis bintang yang sudah dinormalisasi (lihat Gambar III.12), kemudian spektrum *baseline* ini di-*import* pada komputasi *Python*. Berhubung spektrum *telluric* telah meletakkan posisi yang pas pada spektrum bintang, komputasi akan mencari profil garis *telluric* yang mengalami pengurangan nilai fluks (direpresentasikan titik *scatter* pada Gambar III.13.(a)). Spektrum bintang yang terdeteksi memiliki profil-profil ini akan diubah nilai intensitasnya menjadi intensitas pada spektrum *baseline* yang baru dibuat sebelumnya, sedangkan profil yang tidak terdeteksi menyimpan absorpsi *telluric* tetap memiliki intensitas semula (lihat Gambar III.13.(b)).



Gambar III.12: Proses pembuatan *baseline* (garis merah) untuk *telluric* berdasarkan spektrum bintang ternormalisasi (garis hitam) menggunakan *software* OriginPro



Gambar III.13: Plot spektrum sebelum dan sesudah koreksi *telluric*. Garis biru pada gambar (a) merupakan *baseline* yang dibuat pada *software* OriginPro dilengkapi deteksi penurunan intensitas *telluric* pada titik *scatter* merah. Garis ungu pada gambar (b) merupakan penggabungan antara spektrum bintang dengan *baseline* setelah deteksi keberadaan absorpsi *telluric*. Garis kuning merupakan spektrum bintang target dan garis biru muda merupakan spektrum model *telluric*

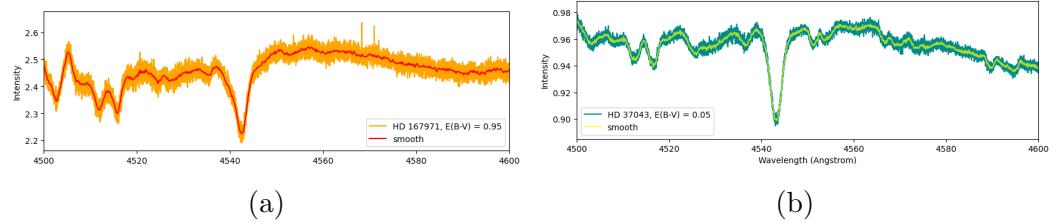
III.2.4 Identifikasi Parameter DIB

Upaya penelusuran DIB dilakukan berdasarkan DIB yang terlihat secara langsung (visual). Guna penelusuran data yang tepat, plot spektrum yang saling dibandingkan ialah plot spektrum mentah belum ternormalisasi antara spektrum bintang target dan spektrum bintang pembanding (lihat Gambar III.14). Terdapat skema penelusuran DIB; penelusuran DIB pada area kuat *telluric* dan penelusuran DIB pada area lemah *telluric* (pembahasan disuguhkan pada Bab IV). DIB yang terdeteksi pada daerah minim *telluric* dilakukan analisis profil berdasarkan parameter-parameter spektroskopik meliputi lebar ekivalen W_λ , FWHM, *central depth* τ , dan *central wavelength* λ_c . Perhitungan lebar ekivalen pada persamaan (II.9) dimanfaatkan dengan pendekatan integrasi sebagai penjumlahan luas di bawah kurva. Bentuk lain persamaan lebar ekivalen ditunjukkan pada persamaan (III.6).

$$W_\lambda = \sum_{i=\lambda_{begin}}^{\lambda_{end}} \left(1 - \frac{F_{\lambda_i}}{F_c}\right) (\lambda_{i+1} - \lambda_i) \quad (\text{III.6})$$

Nilai panjang gelombang awal λ_{begin} , dan panjang gelombang akhir λ_{end} area profil diperoleh menggunakan fitur *Integrate Peaks* dalam OriginPro (lihat Gambar III.15). Fitur ini juga menghasilkan nilai *central wavelength* menggunakan proses pencarian puncak minima (*Find Peaks*) serta menghasilkan nilai FWHM.

Kekuatan profil DIB akan dikategorikan berdasarkan nilai lebar ekivalen profil dalam tiga klasifikasi; DIB lemah ($W_\lambda < 10 \text{ m}\text{\AA}$), DIB kuat ($10 \text{ m}\text{\AA} \leq \lambda < 100 \text{ m}\text{\AA}$), dan DIB sangat kuat ($W_\lambda \geq 100 \text{ m}\text{\AA}$). Estimasi galat pada lebar

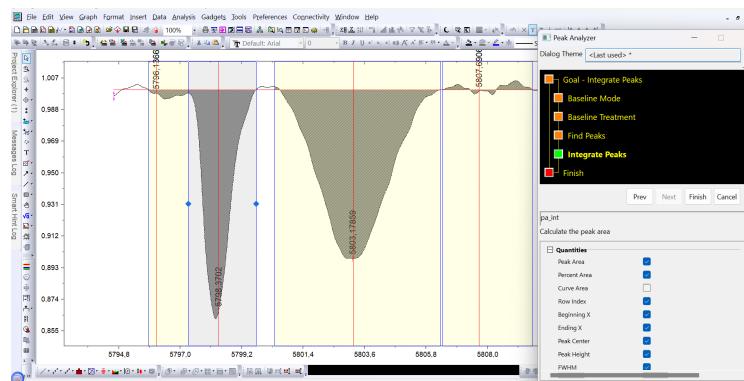


Gambar III.14: Perbandingan antara bintang target HD 167971 (jingga) dan bintang pembanding HD 37043 (hijau). Gambar selengkapnya terdapat pada Lampiran B.1

ekivalen diadaptasi dari sumber (Vollmann dan Eversberg, 2006) ditunjukkan pada persamaan (III.7).

$$\Delta W_\lambda \approx \sqrt{1 + \frac{F_c}{F_{\lambda_{min}}}} \cdot \frac{(\lambda_{end} - \lambda_{begin}) - W_\lambda}{S/N} \quad (\text{III.7})$$

Akan tetapi, meninjau spektrum profil garis diperoleh menggunakan *smoothing* maka galat lebar ekivalen juga harus mencakup koreksi tersebut dengan kalkulasi perbedaan lebar ekivalen sebelum dan sesudah *smoothing*. Dipilih 6 profil garis bintang yang diukur lebar ekivalen spektrum ternormalisasi (lihat Tabel III.3 dan Gambar III.16). Diperolehlah nilai 0.24 sebagai estimasi rata-rata selisih perbedaan lebar ekivalen pasca *smoothing*, nilai ini menjadi parameter koreksi *smoothing* ditunjukkan pada persamaan (III.8) yang diimplementasikan dalam estimasi galat lebar ekivalen pada persamaan (III.9)



Gambar III.15: Tangkapan layar fitur *Integrate Peaks* dalam *software* OriginPro

Tabel III.3: Tabel koreksi *smoothing* lebar ekivalen pada 6 profil garis bintang

No	λ_c (Å)	W_{original} (mÅ)	W_λ (mÅ)	Estimasi selisih ^a	%Estimasi selisih
1	3820.57	350.13	176.28	0.50	50
2	3836.57	927.08	769.80	0.17	17
3	4027.24	515.42	457.63	0.11	11
4	4089.91	464.15	360.06	0.29	29
5	4110.19	2218.27	2041.53	0.08	8
6	4117.23	209.71	151.16	0.28	28
Rata – rata selisih^b				0.24	24

^a Estimasi selisih = $\left| \frac{W_{\text{original}} - W_\lambda}{W_{\text{original}}} \right|$

^b Rata-rata dari keenam estimasi selisih

$$\begin{aligned}
 0.24 &= \frac{W_{\text{original}} - W_\lambda}{W_{\text{original}}} = 1 - \frac{W_\lambda}{W_{\text{original}}} \\
 \frac{W_\lambda}{W_{\text{original}}} &= 1 - 0.24 = 0.76 \\
 W_{\text{original}} &= \frac{W_\lambda}{0.76}
 \end{aligned} \tag{III.8}$$

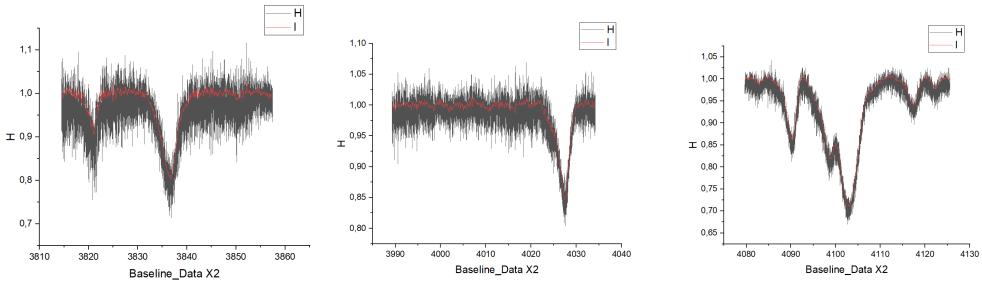
$$\Delta W_\lambda \approx W_{\text{original}} - W_\lambda$$

$$\begin{aligned}
 \Delta W_\lambda &\approx \frac{W_\lambda}{0.76} - W_\lambda \\
 \Delta W_\lambda &\approx \frac{W_\lambda - 0.76W_\lambda}{0.76} = \frac{0.24 W_\lambda}{0.76}
 \end{aligned} \tag{III.9}$$

Alhasil, diperoleh persamaan estimasi lebar ekivalen profil DIB sesuai persamaan (III.10).

$$\Delta W_\lambda \approx \sqrt{\left(\sqrt{1 + \frac{F_c}{F_{\lambda_{\min}}}} \cdot \frac{(\lambda_{\text{end}} - \lambda_{\text{begin}}) - W_\lambda}{\text{S/N}} \right)^2 + \left(\frac{0.24 W_\lambda}{0.76} \right)^2} \tag{III.10}$$

Besar *central depth* τ diperoleh dengan mengasumsikan profil DIB sebagai profil DIB Gaussian sehingga fluks minimum $F_{\lambda_{\min}}$ disubstitukan sebagai F_λ dalam persamaan (II.8) dengan besar fluks kontinu F_c bernilai 1.



Gambar III.16: Plot profil garis spektrum HD 167971 sesuai data pada Tabel III.3. Lebar ekivalen dihitung pada profil garis sebelum *smoothing* (garis hitam) dan sesudah *smoothing* (garis merah) menggunakan *platform* OriginPro

III.2.5 Koreksi Kecepatan Radial

Salah satu aspek penting pada pengamatan astrofisika ialah koreksi panjang gelombang melalui pengoreksian kecepatan radial untuk mewujudkan katalog yang tersusun mendekati panjang gelombang laboratorium. Data HD 167971 yang diperoleh menggunakan ESPRESSO telah terkoreksi kecepatan radial barisentris (Wolff, 2022), sedangkan data HD 186745 dengan spektograf UVES belum terkoreksi terhadap kecepatan radial barisentris ataupun heliosentris (Percheron, 2023). Oleh karena itu, bintang ini perlu untuk dilakukan koreksi kecepatan radialnya terlebih dahulu. Memanfaatkan modul `astropy.coordinates.SkyCoord.radial_velocity_correction`, lokasi geografis pengamatan (*Paranal Observatory*) serta koordinat ekuatorial bintang menjadi entri dalam pemerolehan kecepatan radial barisentris v_{barry} sehingga dihasilkan nilai koreksi kecepatan radial sebesar $v_{r_{\text{corr}}} \approx -13.29 \text{ km s}^{-1}$ sesuai algoritma komputasi pada Gambar III.17.

```

#barycentric radial velocity correction HD 186745
from astropy.time import Time
from astropy.coordinates import SkyCoord, EarthLocation
from astropy.constants import c # speed of light

c_kms = (c/1000).value
rv = 1.00 # radial velocity in km/s
sc = SkyCoord(ra=296.3514583*u.deg, dec=+23.942888333*u.deg)
paranal = EarthLocation.from_geodetic(lat=-24.6274*u.deg, lon=-70.4039*u.deg, height=2640*u.m)
barrycorr = sc.radial_velocity_correction('barycentric', obstime=Time('2016-09-09'), location=paranal)
rvbarry = barrycorr.to(u.km/u.s).value
print(rvbarry)

rv_corrected = rv + rvbarry + rv * rvbarry / c_kms
print(rv_corrected)

```

-14.292893726442056
-13.292941402403692

Gambar III.17: Tangkapan layar kode komputasi *Python* untuk koreksi kecepatan radial bintang HD 167971 pada sistem barisentris

Koreksi kecepatan radial tersebut digunakan untuk menghasilkan panjang gelombang koreksi barisentris λ_{corr} menggunakan rumus efek doppler pada persamaan (II.6) dan (II.7) sehingga menghasilkan persamaan (III.11).

$$\begin{aligned}
 \frac{v_{r_{\text{corr}}}}{c} &= \frac{\lambda_{\text{init}} - \lambda_{\text{corr}}}{\lambda_{\text{corr}}} = \frac{\lambda_{\text{init}}}{\lambda_{\text{corr}}} - 1 \\
 \frac{\lambda_{\text{init}}}{\lambda_{\text{corr}}} &= \frac{v_{r_{\text{corr}}}}{c} + 1 \\
 \lambda_{\text{corr}} &= \frac{\lambda_{\text{init}}}{\left(\frac{v_{r_{\text{corr}}}}{c} + 1\right)}
 \end{aligned} \tag{III.11}$$

Langkah selanjutnya, dilakukan proses koreksi kecepatan radial efek MAB yang membutuhkan garis atom teridentifikasi muncul pada spektrum bintang target. Pada penelitian ini, garis atom K I dipilih menimbang profil yang cenderung tajam dan dalam (pembahasan seputar temuan atom MAB dijelaskan pada Subbab IV.3). Nilai panjang gelombang diam λ_{rest} pada K I yang dipilih ialah 7698.96 Å diperoleh dari basis data NIST⁴. Koreksi kecepatan radial MAB $v_{r_{\text{MAB}}}$ diperoleh dengan memanipulasi rumus efek doppler menjadi (III.12)

$$v_{r_{\text{MAB}}} = \frac{\lambda_{\text{corr}} - \lambda_{\text{rest-lab}}}{\lambda_{\text{rest-lab}}} c \tag{III.12}$$

Hasil koreksi kecepatan radial MAB berdasarkan garis atom K I λ 7698.96 ditunjukkan pada Tabel III.4

⁴https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

Tabel III.4: Hasil koreksi kecepatan radial berdasarkan panjang gelombang diam atom K I 7696.98 Å

Bintang	λ_{corr} (Å)	$\lambda_{\text{rest-lab}}^a$ (Å)	$v_{r_{\text{MAB}}}^b$ (km s ⁻¹)
HD 167971	7700.82	7698.96	72.43
HD 186745	7699.77	7698.96	31.58

^a Berdasarkan NIST

^b Berdasarkan perhitungan pada persamaan (III.12)

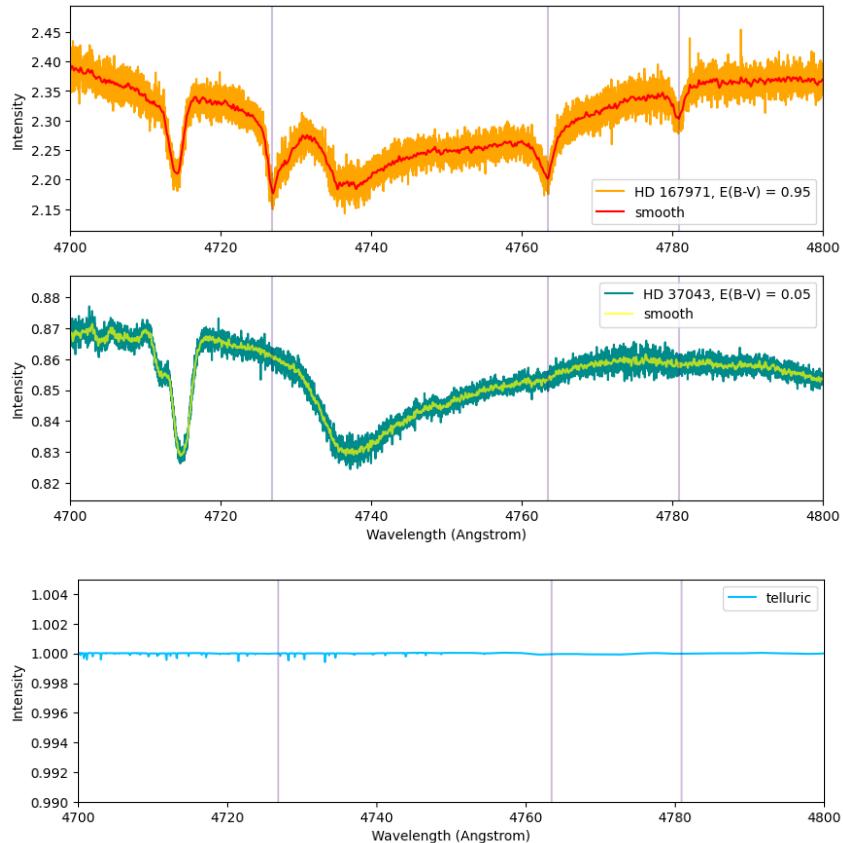
Hasil kecepatan radial koreksi terhadap MAB digunakan untuk menghasilkan panjang gelombang diam sebagai pengganti nilai *central wavelength* yang telah ditelusuri menggunakan metode *Find Peaks* menggunakan persamaan (III.13). Langkah terakhir ialah menyusun DIB yang ada pada sebuah tabel dilengkapi dengan membandingkan lokasi *central wavelength* data terhadap referensi dari katalog APO pada Subbab II.4.4 melalui bintang target Hobbs yakni HD 204827 dan HD 183143. Apabila terdapat profil DIB yang tidak cocok dengan referensi maka kolom diberi tanda “-”, sementara profil yang nyatanya bersesuaian dengan garis atom atau molekul akan diidentifikasi pencetus kimianya.

$$\lambda_{\text{rest}} = \frac{\lambda_{\text{corr}}}{\left(\frac{v_{r_{\text{MAB}}}}{c} + 1\right)} \quad (\text{III.13})$$

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

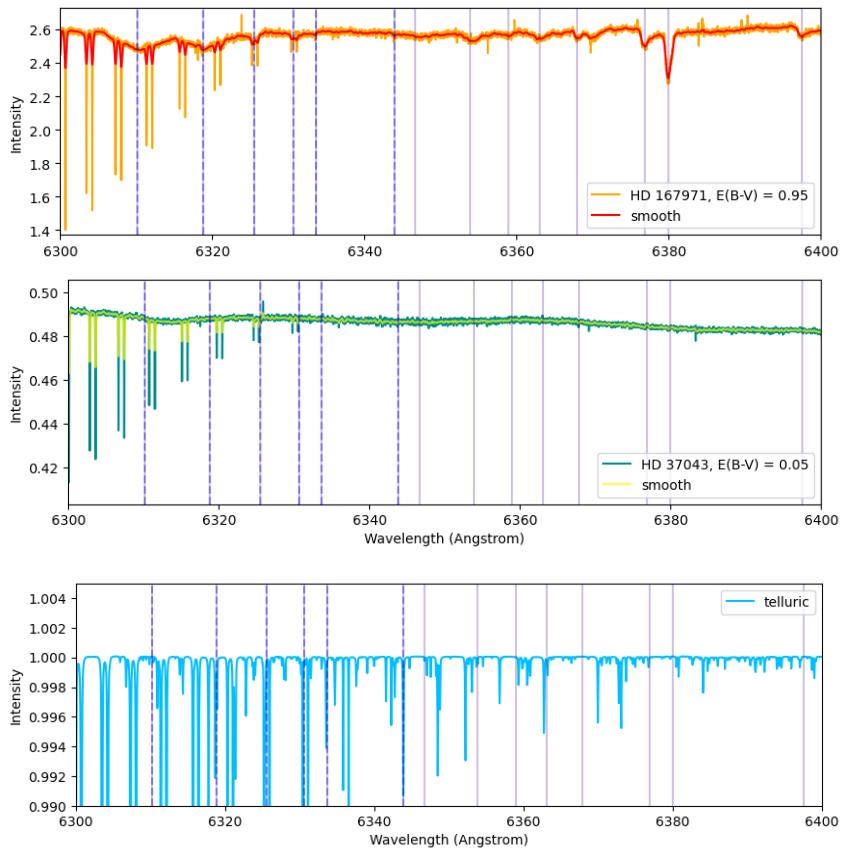
IV.1 Sensus DIB



Gambar IV.1: Penelusuran DIB pada $5800 \leq \lambda \leq 5900 \text{ \AA}$. Garis ungu menunjukkan keberadaan DIB. Plot lengkapnya terdapat pada Lampiran B

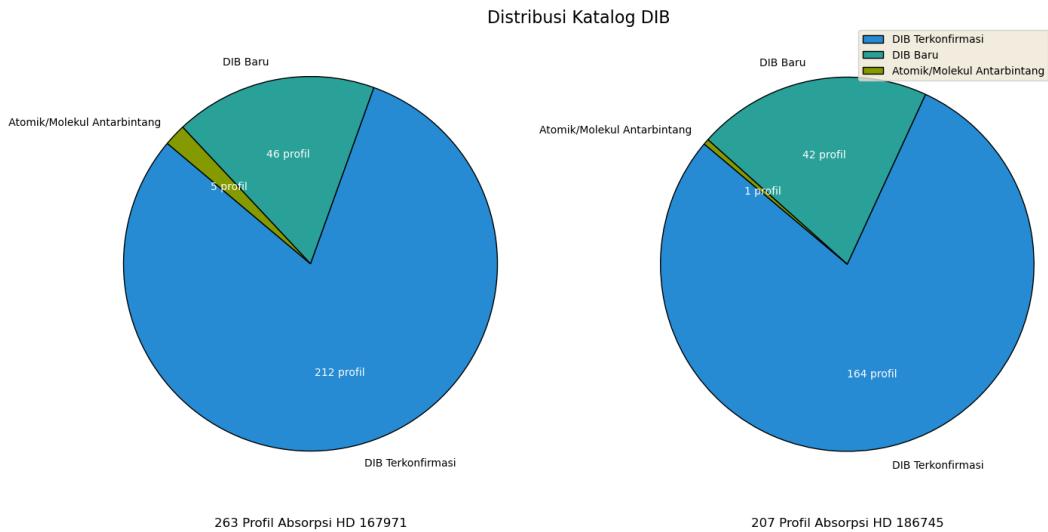
Berdasarkan proses pengolahan data melalui inspeksi secara visual, dihasilkan plot identifikasi garis absorpsi seperti yang terlihat pada Gambar IV.1. Garis berwarna ungu muda pada spektrum mengindikasikan temuan garis serapan antarbintang. Profil serapan ini tidak muncul pada spektrum minim pemerahan atau hanya terlihat sebagai profil serapan yang sangat lemah dibandingkan daya serapnya di bintang panas termerahkan MAB. Hal ini dikonfirmasi dengan sejumlah plot yang disusun pada tabel katalog di Lampiran A dan

telah dibandingkan dengan katalog referensi. Metode perbandingan DIB antara bintang termerahkan dengan minim pemerahan merupakan cara yang juga digunakan Katalog Hobbs HD 204827 (Hobbs, 2008) dan Katalog Hobbs HD 183143 (Hobbs, 2009).



Gambar IV.2: Penelusuran DIB pada $6300 \leq \lambda \leq 6400 \text{ \AA}$. Garis ungu menunjukkan keberadaan DIB yang terukur parameter dan garis biru putus-putus menunjukkan keberadaan DIB yang tidak terukur parameternya. Plot lengkapnya terdapat pada Lampiran B

Beberapa profil tidak berhasil diukur parameter profilnya sebab kontaminasi *telluric* sangat kuat. Profil-profil tersebut ditandai dengan garis putus-putus berwarna biru (lihat Gambar IV.2 dan diberi nilai "*" di setiap tabel data parameter profil garis sementara nilai tingkatan kekuatan profilnya disesuaikan dengan bentuk profil yang terhitung nilai lebar ekivalennya. Keseluruhan plot hasil pencarian DIB bintang target dapat dilihat pada Lampiran B.



Gambar IV.3: Distribusi katalog DIB pada kedua bintang terbagi atas kategori; DIB terkonfirmasi, DIB baru, dan atom atau molekul antarbin-tang

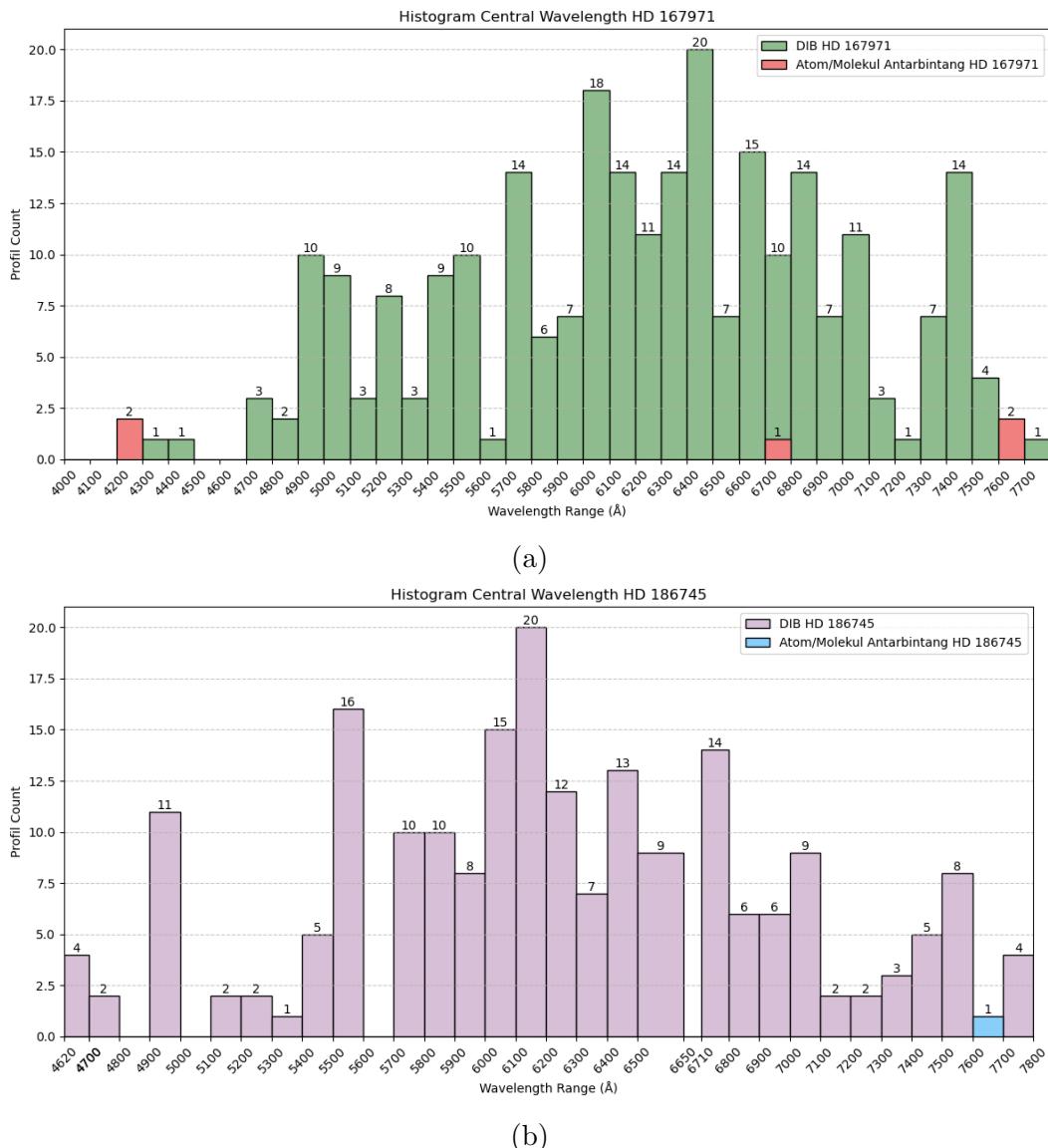
Hasilnya, sebanyak 263 profil absorpsi pada HD 167971 ditemukan terdiri atas:

- 212 profil DIB terkonfirmasi berdasarkan referensi
- 46 profil usulan DIB baru
- 5 profil garis atom atau molekul MAB

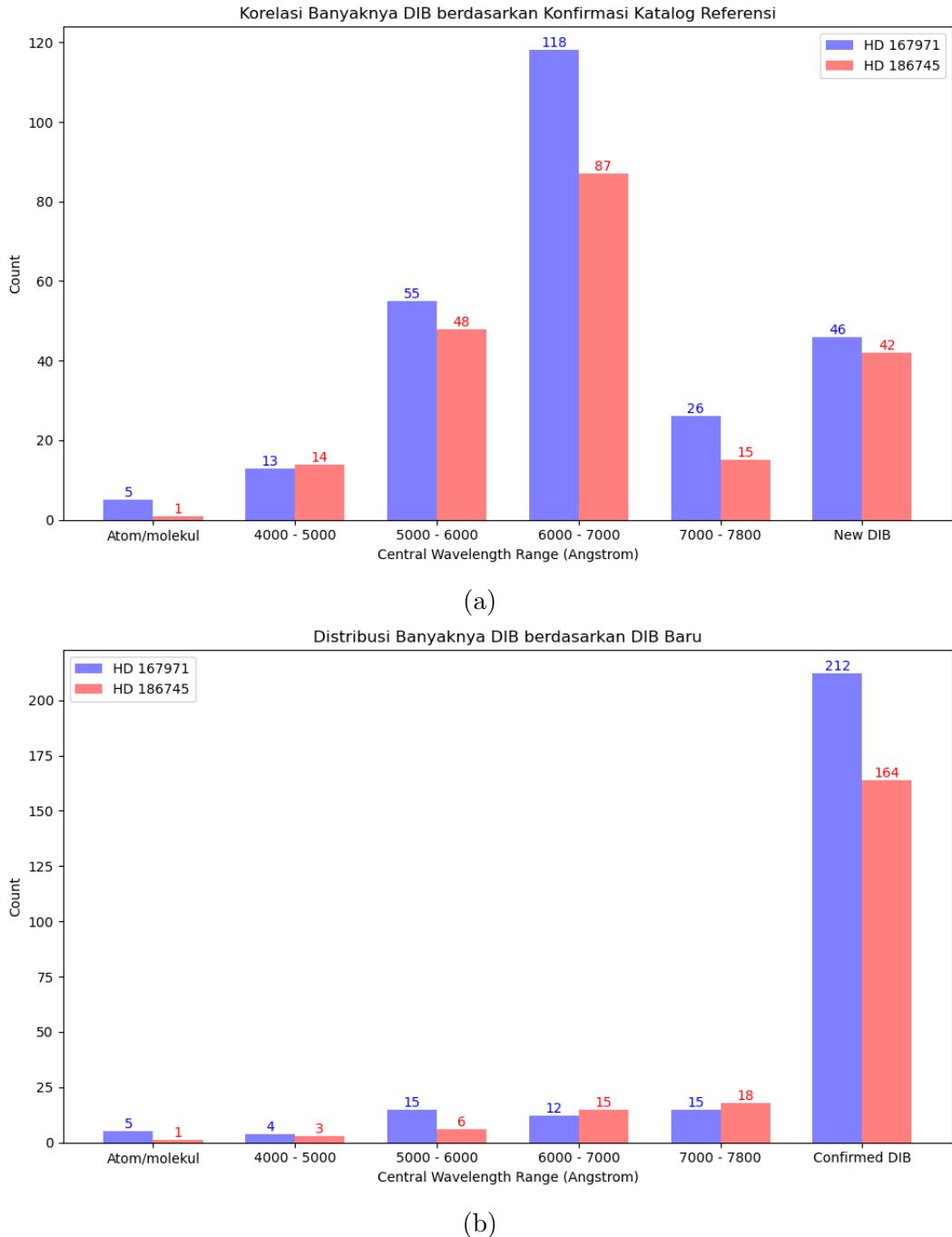
Sementara itu, 207 profil absorpsi berhasil ditemukan pada HD 186745 yang terdiri atas:

- 164 profil DIB terkonfirmasi berdasarkan referensi
- 42 profil usulan DIB baru
- 1 profil garis atom MAB

Mengacu pada katalog dengan parameter *central wavelength*, rentang $6000 \leq \lambda \leq 7000 \text{ \AA}$ menjadi lokasi dominan ditemukannya profil DIB yang secara umum didominasi oleh DIB lemah. Sebanyak 118 dari 212 DIB terkonfirmasi di HD 167971 dan 87 dari 164 DIB terkonfirmasi di HD 186745 muncul pada rentang panjang gelombang ini (lihat Gambar IV.5. Hal ini memberi informa-si cukup berbeda pada katalog referensi yang justru dominasi DIBnya banyak dijumpai di rentang $\lambda \leq 5000 \text{ \AA}$.



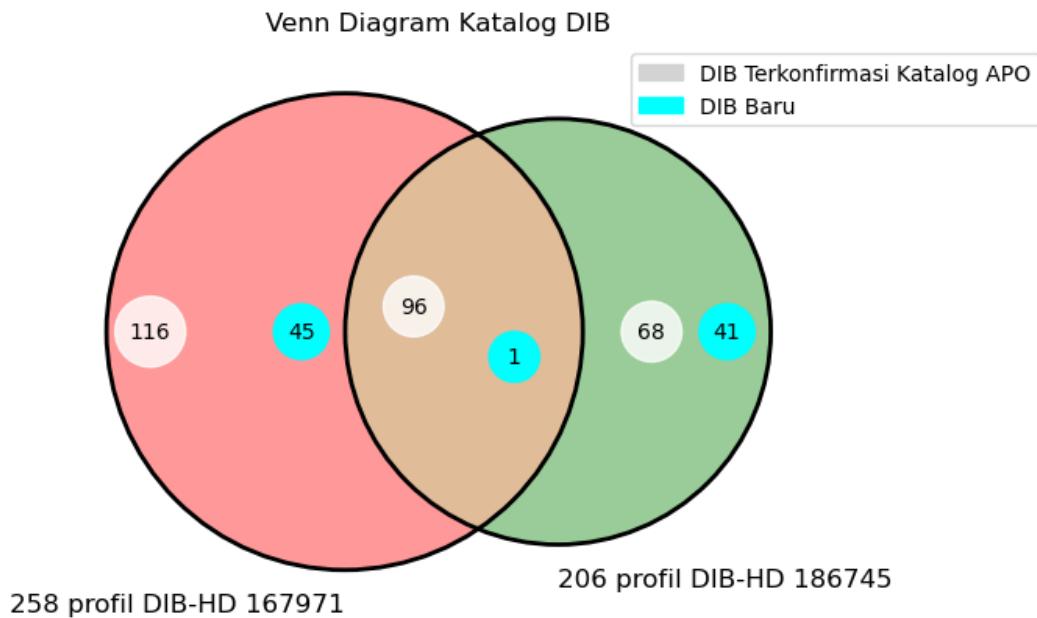
Gambar IV.4: Distribusi *central wavelength* katalog DIB dan garis atom atau molekul MAB pada: (a) HD 167971 dan (b) HD 186745



Gambar IV.5: Distribusi *central wavelength* berdasarkan: (a) rentang *central wavelength* dari katalog referensi dan (b) rentang *central wavelength* dari kandidat DIB Baru

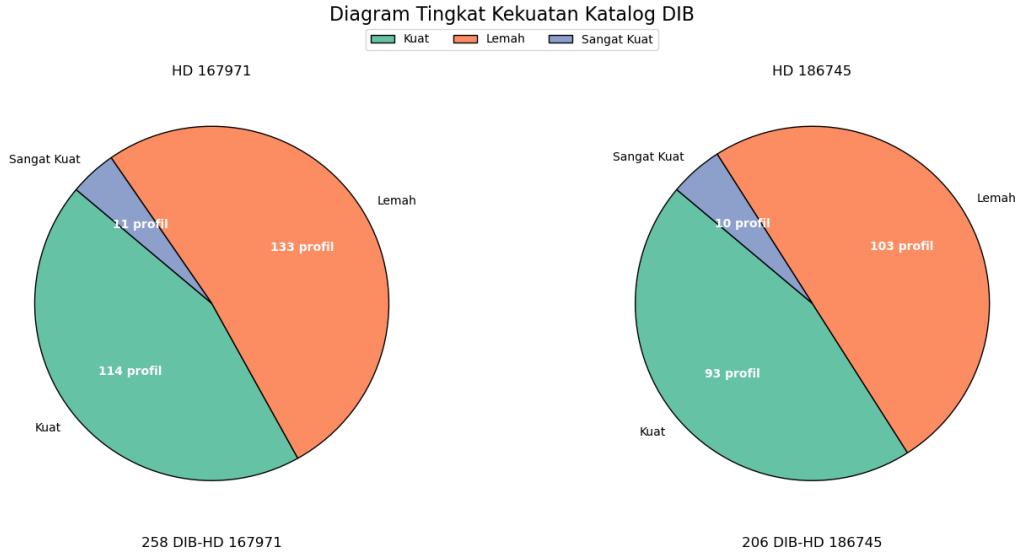
Dari 258 DIB di HD 167971 dan 206 DIB di HD 167971, dihasilkan 97 irisan DIB dengan rincian; 96 DIB terkonfirmasi katalog APO dan 1 profil DIB baru yang muncul pada kedua bintang target. Profil DIB baru yang muncul pada kedua bintang ini adalah DIB λ 6056.30 di HD 167971 dan DIB λ 6056.08 di HD 186745. Ilustrasi kesamaan data ini disertakan dalam visualisasi *venn diagram*

(lihat Gambar IV.6).



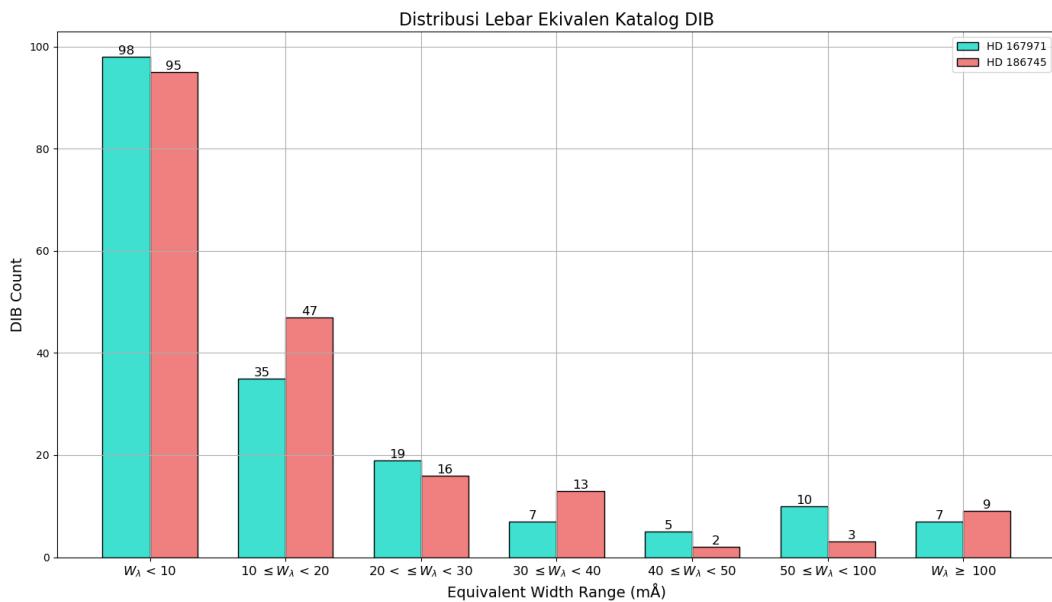
Gambar IV.6: *Venn diagram* menunjukkan adanya irisan data antara banyak DIB pada HD 167971 dengan HD 186745

Parameter tingkat kekuatan profil dikelompokkan pada tiga jenis sesuai besar lebar ekivalen; DIB lemah ($W_\lambda < 10 \text{ m}\text{\AA}$), DIB kuat ($10 \text{ m}\text{\AA} \leq \lambda < 100 \text{ m}\text{\AA}$), dan DIB sangat kuat ($W_\lambda \geq 100 \text{ m}\text{\AA}$). DIB yang tidak terukur parameter profil garisnya juga ditandai kategori tingkatan profil tersebut sesuai kesamaan bentuk profil garis pada DIB yang terhitung lebar ekivalennya atau pun dari DIB referensinya. Statistik jumlah DIB berdasarkan tingkat kekuatan profil ditunjukkan melalui visualisasi *pie chart* pada Gambar IV.7. Diagram ini mencakup 77 profil pada HD 167971 dan 21 profil pada HD 186745 yang tidak memiliki nilai parameter pada katalog DIB.

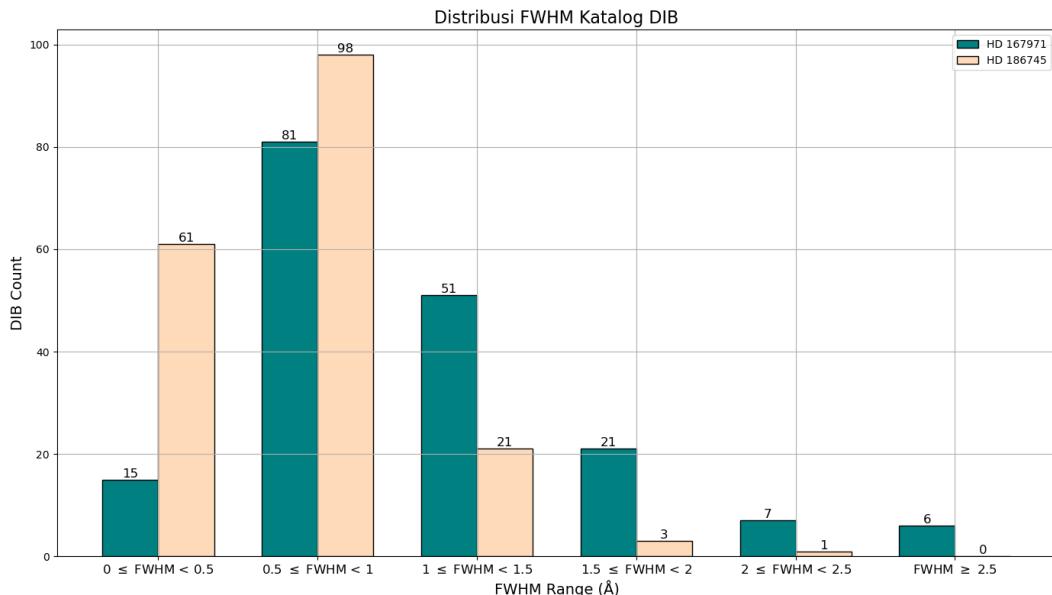


Gambar IV.7: Diagram klasifikasi tingkat kekuatan profil DIB pada kelompok; DIB kuat, DIB sangat kuat, dan DIB lemah

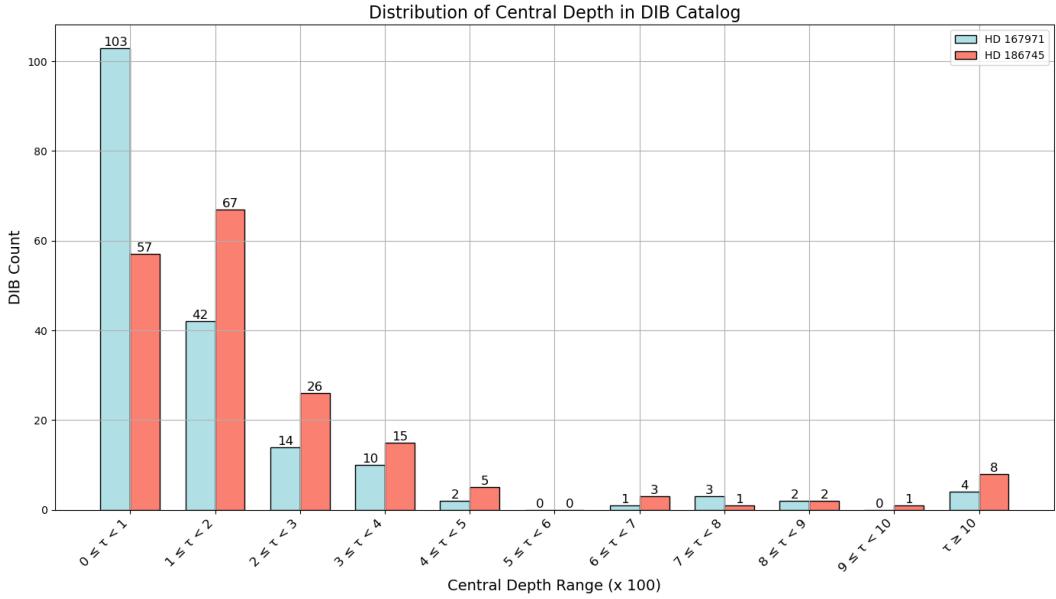
Tampak DIB lemah ($W_\lambda < 10 \text{ m}\text{\AA}$) mendominasi katalog sesuai dengan plot distribusi rentang lebar ekivalen pada Gambar IV.8 dengan perolehan frekuensi 98 DIB pada HD 167971 dan HD 186745. DIB paling lemah yang terukur nilai lebar ekivalennya pada katalog ini ialah 5808.07 dengan $W_\lambda = 1.32 \text{ m}\text{\AA}$ di HD 167971 dan DIB $\lambda 4987.71$ dengan $W_\lambda = 1.46 \text{ m}\text{\AA}$ di HD 186745. Di sisi lain, DIB yang paling kuat ialah $\lambda 4428.64$ dengan $W_\lambda = 1332.56 \text{ m}\text{\AA}$ di HD 167971 dan $\lambda 5780.46$ di HD 186745. Berdasarkan parameter lebar diukur dari FWHM (lihat Gambar IV.9), katalog DIB didominasi oleh profil pada nilai rentang $0.5 \leq \text{FWHM} < 1$. Hal ini mengindikasi profil DIB yang paling banyak ditelusuri memiliki ukuran tidak begitu lebar maupun sempit. Selanjutnya, analisis dilakukan pada parameter *central depth* τ (lihat Gambar IV.10, nilai yang ditelusuri dikalikan dengan 100 sebagai pembanding kedalaman profil pasca normalisasi). Dihasilkanlah dominasi DIB dengan rentang kedalaman $\tau \leq 0.01$ pada HD 167971 dan $0.01 \leq \tau \leq 0.02$ pada HD 186745. Meninjau persamaan (II.8). Profil ini bersesuaian dengan DIB lemah yang mendominasi katalog cenderung melebar dan tidak begitu tajam (*sharp*).



Gambar IV.8: Histogram distribusi lebar ekivalen W_λ katalog DIB kedua bintang target. Histogram ini hanya melibatkan profil DIB yang punya besaran nilai parameter

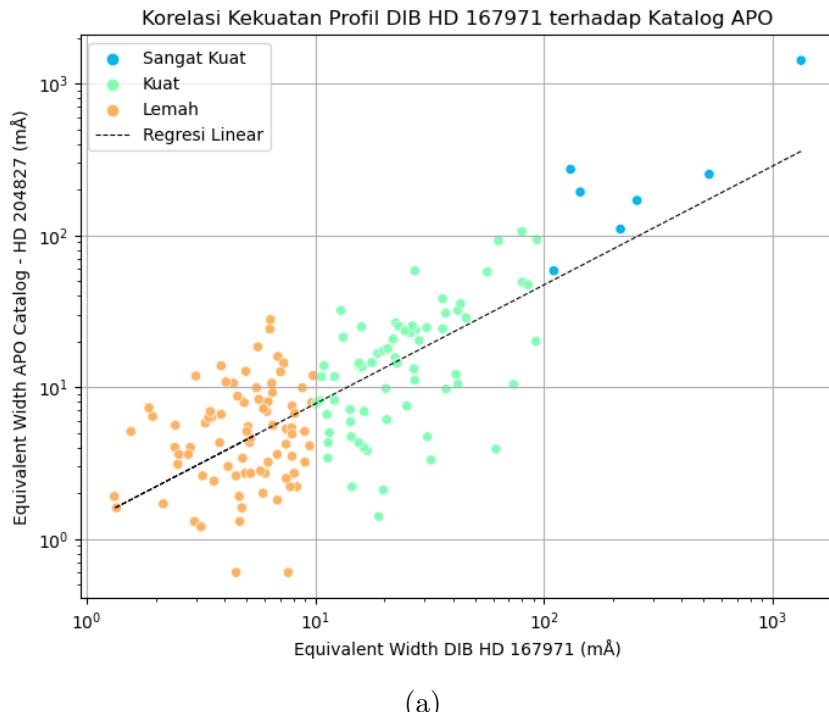


Gambar IV.9: Histogram distribusi FWHM katalog DIB kedua bintang target. Histogram ini hanya melibatkan profil DIB yang punya besaran nilai parameter

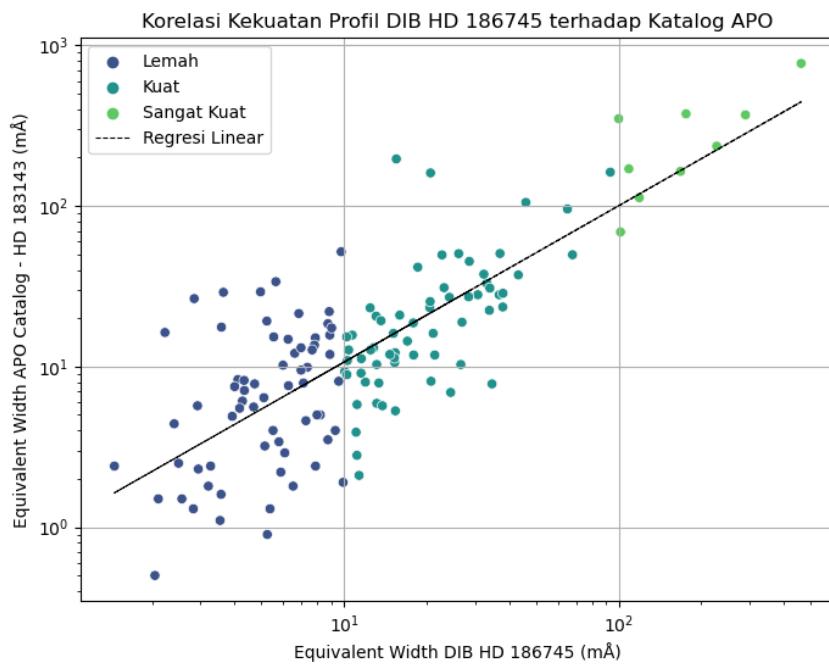


Gambar IV.10: Histogram distribusi *central depth* τ katalog DIB kedua bintang target. Histogram ini hanya melibatkan profil DIB yang punya besaran nilai parameter

Pengelompokan tingkat kekuatan DIB berdasarkan nilai lebar ekivalen bintang target berkorelasi kuat terhadap nilai lebar ekivalen bintang HD 167971 dan HD 186745 pada katalog APO yang juga termasuk bintang penelitian Hobbs (lihat Subbab II.4.3 dan II.4.2). Tampak pada plot *scattering* yang ditunjukkan pada IV.11, tingkat korelasi antara lebar ekivalen bintang target terhadap katalog referensi menunjukkan asosiasi yang kuat dengan nilai yang cukup linear. Akan tetapi, sebagian DIB lemah pada katalog DIB bintang target dengan nilai lebar ekivalen $W_\lambda < 10$ mÅ ternyata memiliki nilai lebar ekivalen di rentang DIB kuat pada katalog referensi. Hal ini dapat terjadi dari faktor serapan bintang yang berbeda pada masing-masing bintang.



(a)



(b)

Gambar IV.11: Plot korelasi antara: (a) DIB HD 167971 dengan DIB HD 204827 katalog APO dan (b) DIB HD 186745 dengan DIB HD 183143 katalog APO

IV.2 Analisis Profil DIB

Berdasarkan tingkat kekuatannya, profil DIB sangat kuat dengan lebar ekivalen ($W_\lambda \geq 100 \text{ m}\text{\AA}$) menjadi profil DIB yang paling mudah ditelusuri. Profil DIB terkonfirmasi sangat kuat yang muncul di kedua bintang target dengan *central wavelength* referensi $\lambda_{c\text{ref}}$ antara lain $\lambda 4726.98$, $\lambda 5780.64$, $\lambda 5797.18$, $\lambda 6203.58$, $\lambda 6284.05$, dan $\lambda 6613.74$ (lihat Gambar IV.12). Tampak nilai intensitas berbeda memengaruhi hasil perhitungan kedalaman *central depth* dan lebar ekivalen tiap profil sesuai yang tertera pada Tabel IV.1.

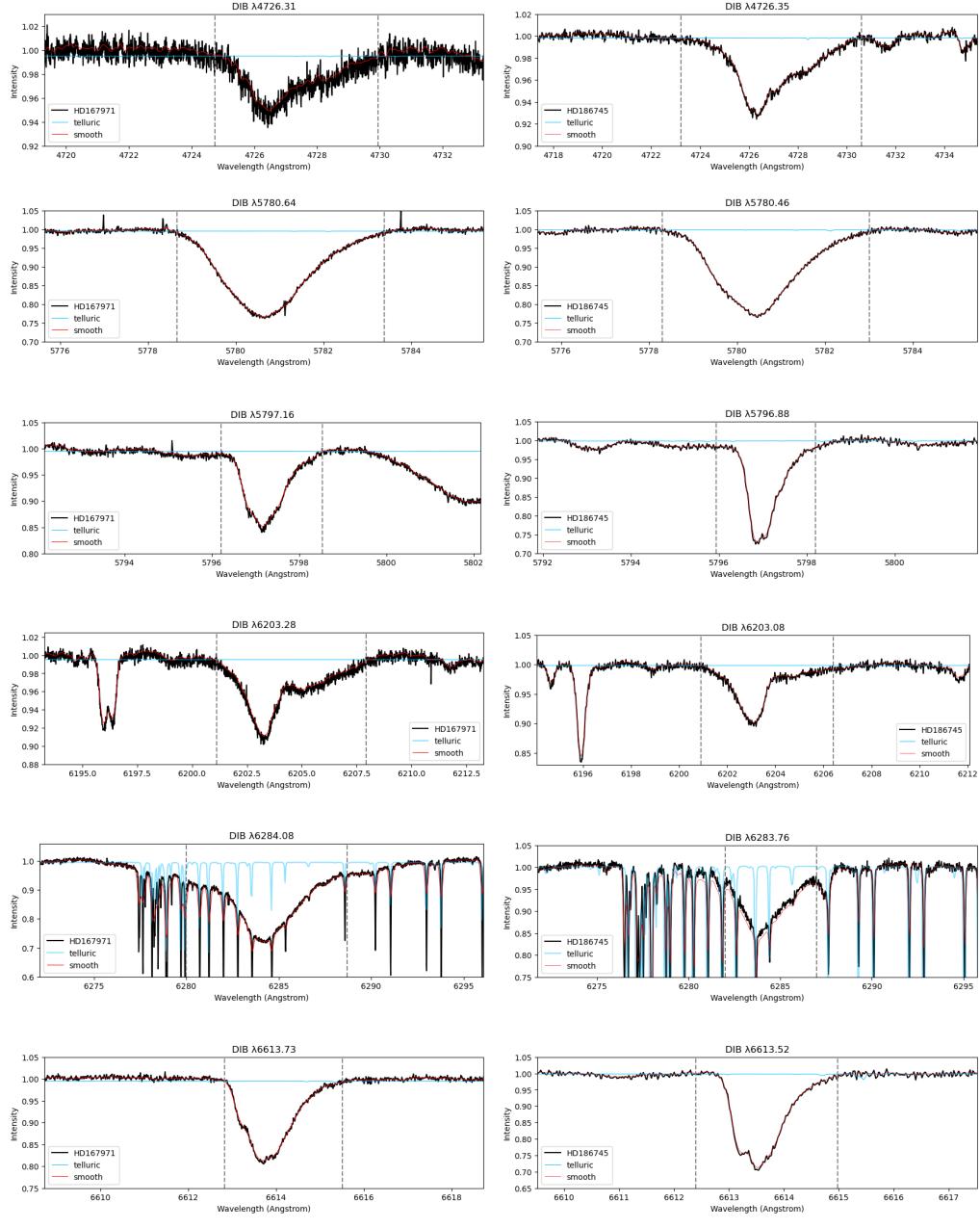
Tabel IV.1: Data DIB sangat kuat yang muncul pada kedua bintang

$\lambda_{c\text{ref}}$ (\text{\AA})	HD 167971				HD 186745			
	λ_c (\text{\AA})	$W_\lambda \pm \Delta W_\lambda$ (m\text{\AA})	FWHM (\text{\AA})	$\tau \times 100$	λ_c (\text{\AA})	$W_\lambda \pm \Delta W_\lambda$ (m\text{\AA})	FWHM (\text{\AA})	$\tau \times 100$
4726.98	4726.31	130.69 ± 58.93	2.491	4.97	4726.35	167.94 ± 58.21	2.049	6.94
5780.64	5780.64	528.05 ± 168.90	2.163	26.28	5780.46	461.61 ± 147.07	1.15	26
5797.18	5797.16	144.01 ± 47.43	0.995	14.8	5796.88	227.49 ± 72.66	0.729	29.82
6203.58	6203.28	216.01 ± 81.88	1.651	8.6	6203.08	100.02 ± 33.38	1.224	8.64
6284.05	6284.08	*	*	*	6283.76	*	*	*
6613.74	6613.73	255.28 ± 82.91	1.239	20.59	6613.52	289.53 ± 91.98	1.084	33.9

Data selengkapnya terdapat pada Tabel A.1 dan Tabel A.2

DIB yang dikategorikan sebagai DIB kuat juga cukup mudah untuk diidentifikasi secara visual. Kompleksitas struktur profil perlulah untuk dianalisis lebih teliti sebab fitur absorpsi semacam ini cukup berdekatan dengan fluks kontinu. Contoh DIB kuat yang tergolong mudah ditelusuri ialah *triplets* DIB dengan nilai *central wavelength* referensi di $\lambda 6439.51$, $\lambda 6445.30$, dan $\lambda 6449.27$ (lihat Gambar IV.13). Tampak terdapat perbedaan penurunan serapan fluks serta perubahan bentuk yang cukup signifikan antara HD 167971 dan HD 186745. Variasi bentuk ini dapat disebabkan oleh beberapa skema. Skema pertama ialah kompleksitas penyusun DIB tersebut sehingga profil tersebut memiliki bentuk yang berbeda dari bentukan klasik profil garis seperti Gaussian. Skema kedua ialah profil tersebut merupakan gabungan atau susunan fitur *blending* dari dua atau lebih profil sehingga tampak seperti memiliki dua puncak. Skema ketiga ialah profil tersebut dilewati beberapa grup MAB dengan kecepatan radial berbeda. Studi penelitian dalam memecahkan permasalahan-permasalahan ini cukup baik dilakukan pada spektrum resolusi tinggi, karena peningkatan resolusi mampu mempertajam bentukan garis spektrum sebagai bahan analisis profil pada pengamatan astrokimia lebih mendalam.

Sementara itu, tantangan pencarian DIB resolusi tinggi muncul pada profil DIB lemah. Profil ini cukup sukar diamati secara pengamatan visual. Misalnya, pada Gambar IV.14, DIB dengan nilai rata-rata *central wavelength* di

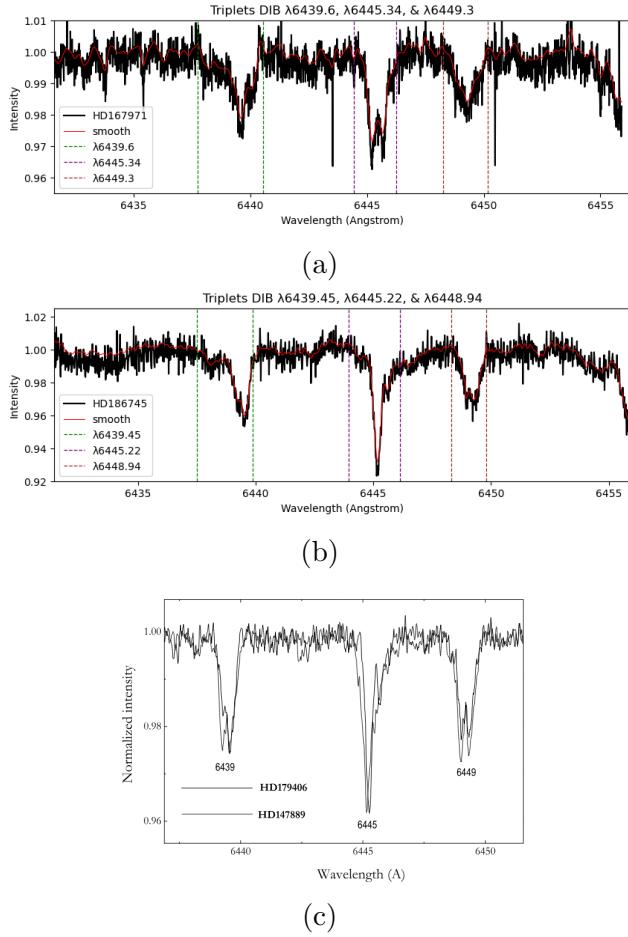


(a)

(b)

Gambar IV.12: Profil DIB sangat kuat setelah normalisasi kontinu dengan rujukan *central wavelength* referensi Katalog APO λ_{ref} pada; $\lambda 4726.98$, $\lambda 5797.18$, $\lambda 5780.64$, $\lambda 6203.58$, $\lambda 6284.05$, dan $\lambda 6613.74$. Gambar (a) adalah DIB pada HD 167971 dan gambar (b) adalah DIB pada HD 186745

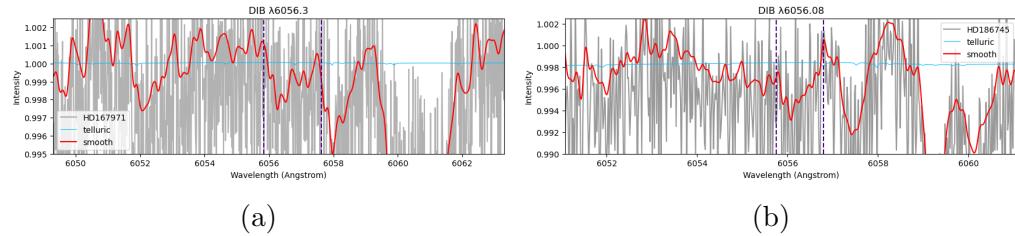
$\lambda 6056.19$ ini merupakan DIB lemah yang baru ditemukan pada kedua katalog bintang. DIB ini bersebelahan dengan profil DIB lemah terkonfirmasi yakni DIB $\lambda 6057.58$. DIB ini sulit diamati pada spektrum bintang resolusi tinggi, sehingga dilakukan *smoothing* sebagai alat bantu pelacak DIB sejenis lemah



Gambar IV.13: *Triplets* DIB λ_{cref} $\lambda 6439.51$, $\lambda 6445.30$, dan $\lambda 6449.27$ sebagai contoh DIB kuat. Gambar (a) merupakan DIB HD 167971, Gambar (b) merupakan DIB HD 186745, dan Gambar (c) merupakan DIB referensi di bintang HD 179406 dan HD 147889 menggunakan spektograf HARPS ($R \approx 120000$). (Sumber gambar: Galazutdinov dkk., 2008)

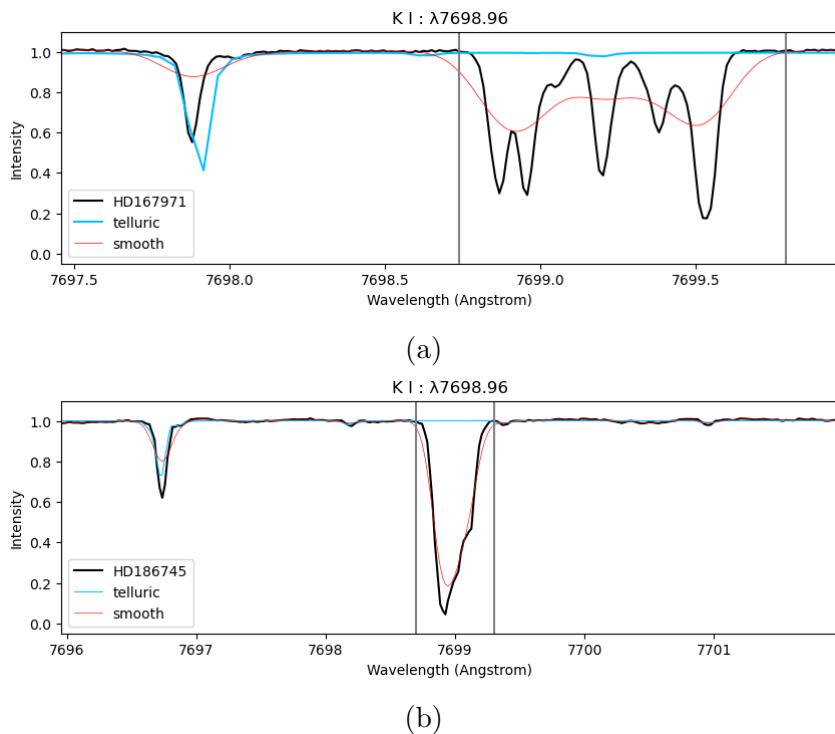
ini. Terkonfirmasi DIB lemah menjadi DIB yang paling melimpah di katalog, tetapi persentase estimasi galat yang diperoleh pada DIB lemah untuk lebar ekivalen (lihat nilai ΔW_λ pada Lampiran A) cukup tinggi bahkan dapat melebihi 100 %. Hal ini disebabkan oleh penggunaan rumus estimasi galat pada (III.10) merupakan persamaan klasik yang berorientasi pada kualitas spektrum dihasilkan *signal-to-noise* S/N, sedangkan profil lemah ini memiliki nilai yang cukup dekat dengan kontinu sehingga berpotensi terhitung sebagai *noise*. Dengan demikian, dibutuhkan analisis lebih tepat pada proses perolehan estimasi galat yang lebih sesuai serta dilakukan melalui automatisasi, misalnya dengan standar galat misalnya menggunakan metode *Markov Chain Monte-Carlo* (MCMC). Nilai yang diperoleh pada katalog ini juga perlu

ditelaah lebih dalam guna perolehan hasil yang lebih akurat.



Gambar IV.14: Profil DIB lemah pada *central wavelength* (a) $\lambda 6056.30$ di HD 167971 dan (b) $\lambda 6056.08$ di HD 186745 sebagai DIB lemah baru yang ditemukan pada kedua katalog bintang target

IV.3 Temuan Atom dan Molekul Antarbintang



Gambar IV.15: Garis atomik K I $\lambda 7698.96$ pada (a) Bintang HD 167971 dan (b) Bintang HD 186745

Sebanyak 5 garis serapan pada spektrum HD 167971 dan 1 garis serapan pada spektrum HD 186745 bukanlah DIB karena profil-profil ini muncul pada katalog atom dan molekul antarbintang. Nyatanya, profil-profil ini tidak muncul pada bintang pembanding yang minim pemerasan serta bukanlah bagian dari

telluric. Misalnya pada garis atom K I pada λ 7698.96. Profil kuat ini memiliki kedalaman yang sangat tinggi dan tajam ($\tau = 0.3883$ pada HD 167971 dan $\tau = 0.7998$ pada HD 186745) sehingga keberadaannya mudah diidentifikasi (lihat Gambar IV.15). Hal ini membuktikan bahwa analisis spektrum melalui perbandingan antara bintang pemerahan rendah terhadap bintang pemerahan tinggi mampu menjadi metode indentifikasi keberadaan garis-garis atom atau molekul MAB. Tabel lengkap keberadaan garis antarbintang pada bintang target penelitian tercantum pada Tabel IV.2.

Tabel IV.2: Temuan garis atom atau molekul MAB pada katalog DIB

Atom / Molekul	λ_{rest} (Å)	λ_c^a (Å)	$W_\lambda \pm \Delta W_\lambda^a$ (mÅ)	λ_c^b (Å)	$W_\lambda \pm \Delta W_\lambda^b$ (mÅ)
Ca I	4226.73 ^c	4226.81	51.86 \pm 5.0	-	-
CH ⁺	4232.54 ^d	4232.61	14.04 \pm 5.35	-	-
Li I	6707.91 ^c	6707.96	2.46 \pm 3.41	-	-
K I	7664.89 ^c	7664.89	299.27 \pm 3.51	-	-
K I	7698.96 ^c	7698.96	265.54 \pm 6.33	7698.96	260.69 \pm 3.45

^a Bintang HD 167971 (lihat Tabel A.1)

^b Bintang HD 186745 (lihat Tabel A.2)

^c Panjang gelombang diperoleh berdasarkan

https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

^d Panjang gelombang diperoleh berdasarkan tabel katalog Hobbs (Hobbs, 2008)

BAB V

PENUTUP

V.1 Simpulan

Penelitian ini berhasil menemukan 258 DIB dan 5 garis antarbintang pada HD 167971 serta 206 DIB dan 1 garis atomik MAB pada HD 186745. Sebanyak 212 DIB pada HD 167971 dan 164 DIB pada HD 186745 merupakan profil DIB yang telah terkonfirmasi muncul pada katalog APO, sedangkan 46 DIB dan 42 DIB yang muncul pada masing-masing bintang merupakan DIB yang baru ditemukan pada penelitian ini. Kandidat DIB baru ini merupakan kumpulan DIB pada tingkatan profil lemah yang keberadaannya memang cukup sulit teramati visual. Resolusi tinggi menjadi sarana yang tepat untuk mendeteksi DIB dengan lebih baik. Garis antarbintang yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan aspek yang berbeda dengan DIB sebab bentuknya lebih sempit dan curam dibandingkan DIB yang cenderung lebar dan landai. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mendeteksi DIB, namun juga mendeteksi garis antarbintang dari atom atau molekul.

V.2 Saran

Penelitian ini berfokus pada metode analisis spektrum pada panjang gelombang rentang visual dan inframerah dekat sehingga diharapkan ke depannya terdapat perluasan katalog yang menjangkau wilayah panjang gelombang lebih tinggi sebagai wawasan astrofisika menjadi lebih baik. Keberadaan DIB usulan ataupun DIB yang telah terkonfirmasi pada penelitian ini berpeluang dijadikan objek penelitian guna mengungkapkan keterkaitannya dengan pencetus DIB yang masih ditelaah hingga saat ini. Katalog ini juga dapat menjadi referensi sebagai bahan penelitian DIB seperti kaitannya dengan *family of DIB* ataupun pengaruhnya dalam MAB. Adapun tantangan yang dihadapi pada penelitian ini dapat menjadi alternatif penelitian mendatang seperti metode koreksi *telluric* yang minim menyisakan residu atau algoritma *machine learning* yang saat ini marak dijadikan alat bantu analisis data spektroskopi.

DAFTAR PUSTAKA

- Adelman, S. J., Gulliver, A. F., dan Holmgren, D. E. 1996. Telluric Lines. *MASS; Model Atmospheres and Spectrum SynthesisASP Conference Series.* **108**. hlm. 293.
- Allen, J. S. The Classification of Stellar Spectra. (https://www.star.ucl.ac.uk/~pac/spectral_classification.html).
- Cajaiba, J., Queiroz, A., de Oliveira, A., dan Kartnaller, V. 2017. Advances in the Application of Spectroscopic Techniques in the Biofuel Area over the Last Few Decades. *Frontiers in Bioenergy and Biofuels*. hlm. 25-58
- Cami, J. 2024. The Mystery of the Diffuse Interstellar Bands (DIBs). (https://physics.uwo.ca/undergraduate/current_students/undergraduate_research_topics/astronomy/Diffuse_Interstellar_Bands.html).
- Campbell, E. K., Holz, M., Gerlich, D., dan Maier, J. P. 2015. Laboratory Confirmation of C₆₀⁺ as the Carrier of Two Diffuse Interstellar Bands. *Nature*. **523(7560)**. hlm. 322-323.
- Carrol, B. W. dan Ostlie, D. A. 2017. *An Introduction to Modern Astrophysics* (2n ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Chiuzbăian, S. G., Hague, C. F., dan Lüning, J. 2012. Approaching Ultimate Resolution for Soft X-ray Spectrometers. *Applied Optics 51*. **20**. hlm. 4684-4690.
- Cox, N. L., Cami, J., Farhang, A., Smoker, J., Monreal-Ibero, A., Lallement, R., Sarre, P. J., Marshall, C. C., Smith, K. T., Evans, C. J., dan Royer, P. 2017. The ESO Diffuse Interstellar Bands Large Exploration Survey (EDIBLES) - I. Project Description, Survey Sample, and Quality Assessment. *Astronomy & Astrophysics*. **606**. A76.
- Cowley, C. R., Castelli, F., dan Hubrig, S. 2017. The Herbig Ae SB2 system HD 104237. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **431(4)**. hlm 3485-3493.

- Demircan, O. 1987. HD 167971: A Bright Massive Close Eclipsing Binary System. *Communications of the Department of Astronomy of Ankara University*. **36(1)**. hlm. 71-76.
- Draine, B. T. 2011. *Physics of The Interstellar and Intergalactic Medium*. (vol. 19). Princeton University Press.
- Ebenbichler, A. dkk. 2024. The EDIBLES Survey. VIII. Band Profile Alignment of Diffuse Interstellar Bands. *Astronomy & Astrophysics*. A6.
- Fan, H. dkk. 2017. The Behavior of Selected Diffuse Interstellar Bands with Molecular Fraction in Diffuse Atomic and Molecular Clouds. *Astrophysical Journal*. **850(2)**. hlm. 1-24.
- Fan, H. dkk. 2019. The Apache Point Observatory Catalog of Optical Diffuse Interstellar Bands. III. HD 183143. *Astrophysical Journal*. **705**. hlm. 32-45. (<https://dib.uchicago.edu/>).
- Fan, H. dkk. 2021. Families and Clusters of Diffuse Interstellar Bands: A Data-Driven Correlation Analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **510(3)**. hlm. 3546-3560.
- Fan, H. dkk. 2024. The EDIBLES Survey-VII. A Survey of C₂ and C₃ in Interstellar Clouds. *Astronomy & Astrophysics*. **681**. A26.
- Foing, B. H., dan Ehrenfreund, P. 1994. Detection of Two Interstellar Absorption Bands coincident with Spectral Features of C₆₀⁺. *Nature*. **369(6478)**. hlm. 296-298.
- Foing, B. H., dan Ehrenfreund, P. 2015. Fullerene Solves An Interstellar Puzzle. *Nature*. **523(7560)**. hlm. 296-297.
- Gallagher, N. B. *Fitting Smooth Curves Part III: Baselinining with an Asymmetric Least-Squares Algorithm*.
- Galazutdinov, G. A., LoCurto, G., dan Krełowski, J. 2008. High-resolution Profiles of Diffuse Interstellar Band. *The Astrophysical Journal*. **682(2)**. hlm. 1076-1085.
- Geballe, T. R. 2016. The Diffuse Interstellar Bands - A Brief Review. *Journal of Physics: Conference Series*. **728(6)**. hlm. 1-7.

- Haffner, L. M., Reynolds, R. J., Tufte, S. L., Madsen, G. J., Jaehnig, K. P., dan Percival, J. W. 2003. The Wisconsin H α Mapper Northern Sky Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. **149(2)**. hlm. 405.
- Hartmann, J. F. 1904. Investigations of the Spectrum and Orbit of δ Orionis. *A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1975*. hlm. 510-513.
- Heger, M. L. 1922. The Spectra of Certain Class B Stars in the Regions 5630Å-6680Å and 3280Å - 3380Å. *Lick Observatory Bulletin*. **10(337)**. hlm. 146-147.
- Hobbs, L. M. dkk. 2008. A Catalog of Diffuse Interstellar Bands in the Spectrum of HD 204827. *Astrophysical Journal*. **680**. hlm. 1256-1269.
- Hobbs, L. M. dkk. 2009. Studies of the Diffuse Interstellar Bands. III. HD 183143. *Astrophysical Journal*. **705**. hlm. 32-45.
- Jabr, F. 2012. How Does a Spectrograph Work? (<https://www.scientificamerican.com/article/ancient-stars-how-does-spectrograph-work/>).
- Joblin, C., Tielens, A. G. G. M., Mulas, G., Mallochi, G., dan Cecchi-Pestellini, C. 2011. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and the Extinction Curve. *European Astronomical Society Publications Series*. **46**. hlm. 327-340.
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., dan Donner, K. J. (Eds.). 2007. *Fundamental Astronomy*. (5th ed.). Springer Berlin Heidelberg.
- Karty, J. 2012. Accurate Mass Spectrometry Lab. (<https://www.slideserve.com/kim/accurate-mass-spectrometry-lab>).
- Lan, T. W., Ménard, B., dan Zhu, G. 2015. Exploring the Diffuse Interstellar Bands With the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **452(42)**. hlm. 3629-3649.
- Larsen, D. 2022. 13.1: The Electromagnetic Spectrum. (https://chem.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis/Chem_110B%3A_Physical_Chemistry_II/Text/13%3A_Molecular_Spectroscopy/13-01._Different_Regions_of_the_Electromagnetic_Spectrum_Are_Used_to_Investigate_Different_Molecular_Processes).

- Lee, T. A. 1967. *Interstellar Extinction in the Orion Association*. The University of Arizona.
- Merril, P. W. dan Wilson, O. C. 1938. Unidentified Interstellar Lines in the Yellow and Red. *Astrophysical Journal*. **87**. hlm. 1-15.
- Morton, D. C., dan Adams, T. F. 1968 Effective Temperatures and Bolometric Corrections of Early-Type Stars. *Astrophysical Journal*. **151**. hlm. 611.
- Morton, D. C. 2003. Atomic Data for Resonance Absorption Lines. III. WaveLENGTHs Longward of the Lyman Limit for the Elements Hydrogen to Gallium. *The Astrophysical Journal Supplement Series*. **149(1)**. hlm. 205.
- Noll, S., Kausch, W., Barden, M., Jones, A. M., Szyszka, C., Kimeswenger, S., dan Vinther, J. 2012. An Atmospheric Radiation Model for Cerro Paranal - I. The Optical Spectral Range. *Astronomy & Astrophysics*. **543**. hlm. A92. (<https://www.eso.org/observing/etc/skycalc/>).
- Palma, C. Kirchoff's Laws and Spectroscopy. (https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/l3_p6.html).
- Percheron, I. 2023. UVES. *ESO Phase 3 Data Release Description*.
- Puspitarini, L., 2019. Extracting Diffuse Interstellar Bands From Cool Star Spectra: Tracing Galactic ISM Structures, Kinematics, and Properties. *Journal of Physics: Conference Series*. **1127(1)**. hlm. 1-6.
- Romaniello, M., Arnaboldi, M., Barbieri, M., Delmotte, N., Dobrzycki, A., Fourniol, N., Sterzik, M., et al, 2023. The ESO Science Archive Facility: Status, Impact, and Prospects. *arXiv preprint arXiv:2310.20535*. (<https://archive.eso.org/scienceportal/>).
- Richmond, M. 2014. The Curve of Growth. (<http://spiff.rit.edu/classes/phys440/lectures/curve/curve.html>).
- Schwartz, M. D. 2016. 13.1: Lecture 21: The Doppler Effect. (<https://scholar.harvard.edu/schwartz/teaching>).
- Tavernier, S. 2022. *Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics*. Springer Nature.
- Thorburn, J. A. dkk. 2021. Some Diffuse Interstellar Bands Related to Intersellar C₂ Molecules. *The Astrophysical Journal*. **584(1)**. hlm. 339.

- Trumpler, R. J. 1930. Absorption of Light in the Galactic System. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. **42(248)**. hlm. 214-227.
- Ochsenbein, F., Bauer, P., Marcout, J., et al 2000. The VizieR Database of Astronomical Catalogue. (<https://vizier.cds.unistra.fr/>).
- Vollmann, K., dan Eversberg, T. 2006. Remarks on Statistical Rrrors in Equivalent Widths. *Astronomische Nachrichten: Astronomical Notes*. **327(9)**. hlm. 862-865.
- Wolff, B. 2022. ESPRESSO. *ESO Phase 3 Data Release Description*.
- Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D., Dubois, P., Bonnarel, F., Borde, S., Monier, R., et al. 2000. The SIMBAD Astronomical Database-The CDS Reference Database for Astronomical Objects. (<https://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>).
- Zombeck, M. V. 2006. *Handbook of Space Astronomy and Astrophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Origin(Pro)**, (e.g. "Versi 2024"). *OriginLab Corporation*, Northampton, MA, USA
- Prodi Sarjana Astronomi. 2020. *Pedoman Standar Kegiatan Tugas Akhir*. Bandung: Prodi Sarjana Astronomi.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

TABEL KATALOG

Pada bagian ini, akan ditampilkan tabel katalog penelitian Bintang HD 167971 dengan Bintang HD 186745 berdasarkan perhitungan spektrum *smoothing* dan ternormalisasi pada $F_c = 1$. Parameter kolom tabel meliputi:

- Kolom pertama ialah indeks merujuk penemuan tabel berurutan sesuai lokasi ditemukannya pada Lampiran B
- Kolom kedua ialah lokasi *central wavelength observed* yang baru dikoreksi pada kecepatan radial barisentris saja
- Kolom ketiga ialah lokasi *central wavelength* yang telah terkoreksi pada kecepatan radial MAB
- Kolom keempat ialah lokasi *central wavelength* referensi sesuai katalog APO (Fan, 2019), pencetus garis atom atau molekul antarbintang, dan '-' jika tidak ditemukan pada referensi
- Kolom kelima ialah nilai lebar ekivalen
- Kolom keenam ialah estimasi galat lebar ekivalen melalui persamaan (III.10)
- Kolom ketujuh ialah persentase estimasi galat lebar ekivalen melalui $\% \text{Galat} = \frac{\Delta W_\lambda}{W_\lambda} \times 100\%$
- Kolom kedelapan ialah nilai FWHM
- Kolom kesembilan ialah nilai *central depth*
- Kolom kesepuluh ialah jenis profil; DIB dan Atomik/Molekul
- Kolom terakhir ialah tingkat profil

Pemberian tanda "*" merupakan jenis profil DIB yang tidak berhasil diukur besaran parameter profil garisnya.

Tabel A.1: Katalog DIB HD 167971

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	$\lambda_{c_{\text{ref}}}^a$ (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
1	4227.83	4226.81	Ca I	51.86	17.12	33.02	0.315	15.92	Atomik/Molekul	Kuat
2	4233.63	4232.61	CH ⁺	14.04	6.95	49.49	0.321	4.44	Atomik/Molekul	Kuat
3	4429.71	4428.64	4429.33	1332.56	441.54	33.13	14.754	8.80	DIB	Sangat Kuat
4	4301.38	4300.34	-	28.95	10.59	36.59	0.485	7.10	DIB	Kuat
5	4727.45	4726.31	4726.98	130.69	58.93	45.09	2.491	4.97	DIB	Sangat Kuat
6	4764.11	4762.96	4762.44	80.37	37.28	46.39	2.146	3.47	DIB	Kuat
7	4781.52	4780.37	4780.10	36.02	24.37	67.65	1.375	2.14	DIB	Kuat
8	4802.79	4801.63	-	10.84	14.55	134.20	1.435	0.81	DIB	Kuat
9	4875.84	4874.66	-	2.91	9.43	324.07	0.951	0.36	DIB	Lemah
10	4952.60	4951.40	4951.13	4.38	9.57	218.52	0.66	0.52	DIB	Lemah
11	4957.87	4956.67	4956.96	3.18	7.44	233.87	0.894	0.40	DIB	Lemah
12	4965.18	4963.98	4963.92	27.21	14.48	53.22	0.779	3.43	DIB	Kuat
13	4970.44	4969.24	4969.12	6.85	12.62	184.25	0.915	0.75	DIB	Lemah
14	4976.56	4975.36	-	2.11	6.83	323.61	0.87	0.30	DIB	Lemah
15	4979.40	4978.20	4978.06	1.35	5.76	426.44	0.462	0.30	DIB	Lemah
16	4980.72	4979.52	4979.62	3.87	7.85	202.81	0.677	0.57	DIB	Lemah
17	4983.33	4982.13	4982.23	2.16	12.22	565.57	0.345	0.25	DIB	Lemah
18	4986	4984.80	4984.78	12.94	8.66	66.91	0.763	1.67	DIB	Kuat
19	4989.30	4988.09	4987.53	6.32	16.53	261.59	0.708	0.49	DIB	Lemah
20	5004.96	5003.75	5003.58	22.31	13.56	60.77	0.693	1.55	DIB	Kuat
21	5062.69	5061.47	5061.50	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
22	5068.80	5067.58	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
23	5076.10	5074.87	5074.48	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
24	5084	5082.77	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
25	5085.71	5084.48	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
26	5088.56	5087.33	-	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
27	5091.84	5090.61	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
28	5093.55	5092.32	5092.17	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
29	5118.98	5117.74	5117.62	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
30	5171.74	5170.49	5170.49	5.52	8.22	149	0.613	0.83	DIB	Lemah
31	5177.25	5176	5176	6.36	7.47	117.44	0.832	0.89	DIB	Lemah
32	5204.84	5203.58	-	63.37	40.48	63.89	4.99	1.26	DIB	Kuat
33	5237.84	5236.57	5236.27	22.48	28.56	127.06	1.755	1.16	DIB	Kuat
34	5246.90	5245.63	5245.48	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
35	5248.29	5247.02	5247.39	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
36	5249.80	5248.53	-	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
37	5258.80	5257.53	5257.44	4.96	7.43	149.82	0.512	0.85	DIB	Lemah
38	5263.76	5262.49	5262.44	7.46	22.17	297.25	1.42	0.34	DIB	Lemah
39	5275.22	5273.95	-	4.82	4.89	101.55	0.448	1.02	DIB	Lemah
40	5357.61	5356.32	-	2.47	1.81	73.45	0.27	0.31	DIB	Lemah
41	5359.73	5358.44	5358.76	3.21	6.28	195.55	1.015	0.31	DIB	Lemah
42	5365.50	5364.20	5363.77	42.02	29.79	70.89	2.291	1.58	DIB	Kuat
43	5406.02	5404.71	5404.58	18.75	68.77	366.78	1.005	1.76	DIB	Kuat
44	5420.31	5419	5419.57	14.29	14.70	102.90	1.123	1.19	DIB	Kuat
45	5425.51	5424.20	5424.19	7.44	11.65	156.60	1.205	0.67	DIB	Lemah
46	5434.56	5433.25	-	3.28	9.52	290.40	0.868	0.38	DIB	Lemah
47	5440.43	5439.12	-	1.66	7.90	475.90	0.606	0.28	DIB	Lemah
48	5489.24	5487.91	5487.64	56.47	35.34	62.58	2.765	2	DIB	Kuat
49	5491.86	5490.53	5490.37	6.21	13.39	215.62	0.959	0.56	DIB	Lemah
50	5495.49	5494.16	5494.10	27.46	14.74	53.68	0.821	3.31	DIB	Kuat
51	5498.74	5497.41	5947.46	7.27	10.05	138.21	1.414	0.56	DIB	Lemah

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	λ_{ref}^a (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
52	5509.82	5508.49	5508.33	80	40.82	51.02	1.896	3.41	DIB	Kuat
53	5513.99	5512.66	5512.68	13.23	8.97	67.83	0.745	1.76	DIB	Kuat
54	5517.46	5516.13	5515.95	1.94	9.92	511.38	0.658	0.27	DIB	Lemah
55	5536.61	5535.27	5535.14	19.16	20.27	105.80	1.427	1.18	DIB	Kuat
56	5543.17	5541.83	5541.92	15.39	11.95	77.66	1.217	1.27	DIB	Kuat
57	5546.56	5545.22	5545.08	37.14	25.35	68.25	0.968	2.65	DIB	Kuat
58	5557.72	5556.38	5556.34	5.66	11.84	209.21	0.802	0.63	DIB	Lemah
59	5573.96	5572.61	-	8.97	16.24	180.99	2.141	0.48	DIB	Lemah
60	5579.55	5578.20	-	1.75	5.67	323.94	0.923	0.21	DIB	Lemah
61	5582.46	5581.11	5580.79	2.84	3.51	123.72	0.558	0.53	DIB	Lemah
62	5611.43	5610.07	5609.82	16.33	21.62	132.40	1.516	1.16	DIB	Kuat
63	5707.06	5705.68	5705.12	85.12	38.71	45.48	2.501	3.54	DIB	Kuat
64	5712.65	5711.27	5711.46	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
65	5721.30	5719.92	5719.57	19.84	28.96	145.99	1.588	1.06	DIB	Kuat
66	5748.38	5746.99	5747.15	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
67	5750.03	5748.64	5749.18	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
68	5764.22	5762.83	5762.68	7.04	18.32	260.17	0.313	0.79	DIB	Lemah
69	5767.55	5766.16	5766.16	21.88	16.57	75.72	1.006	1.85	DIB	Kuat
70	5774.10	5772.71	5772.63	9	11.83	131.47	0.888	0.96	DIB	Lemah
71	5777.45	5776.05	5775.91	11.24	13.48	119.94	1.23	0.98	DIB	Kuat
72	5782.04	5780.64	5780.64	528.05	168.90	31.99	2.163	26.28	DIB	Sangat Kuat
73	5786.54	5785.14	5785	1.87	5.93	316.90	0.541	0.34	DIB	Lemah
74	5790.95	5789.55	-	10.81	14.63	135.30	1.106	0.90	DIB	Kuat
75	5794.64	5793.24	5795.21	4.06	5.57	137.07	0.827	0.52	DIB	Lemah
76	5798.56	5797.16	5797.18	144.01	47.43	32.93	0.995	14.80	DIB	Sangat Kuat
77	5808.47	5807.07	5806.60	1.32	36.85	2791.97	0.196	0.30	DIB	Lemah
78	5811.01	5809.61	5809.25	4.88	3.58	73.35	0.266	0.63	DIB	Lemah
79	5820.01	5818.60	5818.74	4.57	10.58	231.51	0.624	0.67	DIB	Lemah
80	5830.06	5828.65	5828.50	12.12	12.64	104.29	1.009	1.18	DIB	Kuat
81	5846.50	5845.09	5844.89	20.54	27.96	136.15	0.905	1.36	DIB	Kuat
82	5851.27	5849.86	5849.82	63.21	24.01	37.98	1.035	6.12	DIB	Kuat
83	5902.25	5900.82	5900.59	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
84	5912.22	5910.79	5910.57	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
85	5924.56	5923.13	5923.51	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
86	5949	5947.56	5947.87	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
87	5960.15	5958.71	5958.86	*	*	*	*	*	DIB	Sangat Kuat
88	5973.75	5972.31	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
89	6001.33	5999.88	6000.70	4.67	12.25	262.35	1.102	0.48	DIB	Lemah
90	6006.49	6005.04	6004.96	26.96	25.93	96.18	1.603	1.17	DIB	Kuat
91	6012.91	6011.46	6011.64	73.60	44.94	61.06	3.373	2.30	DIB	Kuat
92	6018.14	6016.69	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
93	6020.99	6019.54	6019.33	16.86	20.29	120.32	1.184	1.44	DIB	Kuat
94	6025.16	6023.70	-	2.66	10.78	405.23	0.863	0.35	DIB	Lemah
95	6029.14	6027.68	6027.57	20.76	24.23	116.72	1.582	1.28	DIB	Kuat
96	6039.13	6037.67	6038.49	28.43	17.39	61.18	2.317	1.34	DIB	Kuat
97	6047.93	6046.47	6046.78	8.30	17.19	207.07	1.239	0.52	DIB	Lemah
98	6052.98	6051.52	6051.50	2.96	8.87	299.50	0.907	0.37	DIB	Lemah
99	6057.76	6056.30	-	1.359	6.87	505.56	0.387	0.20	DIB	Lemah
100	6058.86	6057.40	6057.58	2.78	11.34	407.99	0.69	0.38	DIB	Lemah

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	λ_{cref}^a (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
101	6061.92	6060.46	6060.31	16.32	19.09	116.96	1.983	0.95	DIB	Kuat
102	6066.77	6065.30	6065.32	12.11	12.45	102.84	0.991	1.34	DIB	Kuat
103	6069.62	6068.15	6068.20	7.87	17.48	222.07	1.718	0.55	DIB	Lemah
104	6072.96	6071.49	6071.33	4.93	11.54	234.14	0.956	0.52	DIB	Lemah
105	6082.79	6081.32	6081.13	4.77	15.08	316.04	0.818	0.37	DIB	Lemah
106	6086.62	6085.15	6087.52	6.03	13.94	231.23	1.248	0.49	DIB	Lemah
107	6091.33	6089.86	6089.85	23.15	12.27	53	0.785	2.87	DIB	Kuat
108	6109.55	6108.07	6108.06	10	13.21	132.08	0.782	1.15	DIB	Kuat
109	6111.80	6110.32	6110.77	4.64	14.33	308.78	0.831	0.58	DIB	Lemah
110	6114.77	6113.29	6113.22	26.04	19.61	75.33	1.182	2.01	DIB	Kuat
111	6118.36	6116.88	6116.80	15.50	13.41	86.48	1.007	1.53	DIB	Kuat
112	6120.05	6118.57	6118.57	11.50	10.55	91.78	1.298	1.01	DIB	Kuat
113	6129.96	6128.48	6128.26	11.33	17.99	158.79	2.132	0.59	DIB	Kuat
114	6137.61	6136.13	6136	2.44	9.85	403.88	0.943	0.30	DIB	Lemah
115	6141.50	6140.02	6139.95	16.02	9.39	58.62	0.68	1.46	DIB	Kuat
116	6143.89	6142.41	6142.21	9.44	16.08	170.30	1.258	0.67	DIB	Lemah
117	6152.98	6151.49	6151.14	14.20	24.25	170.74	1.655	0.74	DIB	Kuat
118	6163.74	6162.25	6162.06	8.76	9.53	108.81	0.919	0.96	DIB	Lemah
119	6167.30	6165.81	6165.61	9.77	17.08	174.78	1.032	0.77	DIB	Lemah
120	6188.65	6187.16	6187.30	19.80	24.11	121.77	1.305	0.94	DIB	Kuat
121	6197.51	6196.01	6196.68	61.67	21.87	35.46	0.835	7.55	DIB	Kuat
122	6204.78	6203.28	6203.58	216.01	81.88	37.91	1.651	8.60	DIB	Sangat Kuat
123	6213.26	6211.76	6211.69	25.10	29.10	115.96	1.051	1.35	DIB	Kuat
124	6217.37	6215.87	6215.73	10.90	15.35	140.82	1.366	0.81	DIB	Kuat
125	6222.41	6220.91	6220.95	5.75	10.16	176.71	1.033	0.67	DIB	Lemah
126	6225.16	6223.66	6223.65	5.16	9.45	183.09	0.952	0.56	DIB	Lemah
127	6228	6226.50	6226.25	3.52	9.26	263.13	0.952	0.48	DIB	Lemah
128	6235.58	6234.07	6234.01	17.63	13.75	77.98	0.783	2.11	DIB	Kuat
129	6246.53	6245.02	6245.14	7.90	14.45	182.94	1.488	0.50	DIB	Lemah
130	6252.29	6250.78	6250.87	5.20	21.09	405.52	1.138	0.45	DIB	Lemah
131	6271.49	6269.98	6269.89	110.38	42.58	38.57	1.321	7.20	DIB	Sangat Kuat
132	6285.60	6284.08	6284.05	*	*	*	*	*	DIB	Sangat Kuat
133	6311.08	6309.56	6308.83	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
134	6319.74	6318.21	6318.07	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
135	6326.40	6324.87	6324.91	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
136	6331.53	6330	6330.03	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
137	6334.51	6332.98	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
138	6344.80	6343.27	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
139	6347.60	6346.07	-	1.75	7.21	411.81	0.239	0.20	DIB	Lemah
140	6354.76	6353.23	6353.31	22.80	20.46	89.75	1.575	1.30	DIB	Kuat
141	6359.86	6358.32	6358.36	5.07	11.25	221.86	0.657	0.64	DIB	Lemah
142	6363.93	6362.39	6362.02	3	17.98	599.44	1.487	0.84	DIB	Lemah
143	6368.81	6367.27	6367.30	27.21	26.38	96.95	0.882	1.31	DIB	Kuat
144	6377.83	6376.29	6376.14	41.99	20.85	49.66	1.01	3.54	DIB	Kuat
145	6380.85	6379.31	6379.25	93.16	32.41	34.79	0.837	10.74	DIB	Kuat
146	6398.42	6396.87	6397.04	30.69	23.14	75.40	1.214	2.21	DIB	Kuat
147	6402.11	6400.56	6400.49	7.91	11.78	148.89	1.066	0.81	DIB	Lemah
148	6411.64	6410.09	6410.25	1.56	7.27	466.33	0.474	0.31	DIB	Lemah
149	6415.74	6414.19	6414.08	6.12	10.74	175.57	0.888	0.68	DIB	Lemah

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	$\lambda_{\text{c}_{\text{ref}}}^a$ (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
150	6420.28	6418.73	6418.64	2.43	6.85	281.79	0.61	0.40	DIB	Lemah
151	6427.34	6425.79	6425.68	15.56	13.45	86.46	0.79	1.88	DIB	Kuat
152	6441.16	6439.60	6439.51	24.64	18.16	73.72	0.968	2.05	DIB	Kuat
153	6446.90	6445.34	6445.30	26.53	17.31	65.26	0.943	2.65	DIB	Kuat
154	6450.86	6449.30	6449.27	15.91	12.87	80.91	1.035	1.59	DIB	Kuat
155	6457.80	6456.24	6455.92	20.32	21.99	108.22	0.978	1.76	DIB	Kuat
156	6461.92	6460.36	6460.36	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
157	6465.20	6463.64	6463.55	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
158	6466.84	6465.28	6465.43	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
159	6468.64	6467.08	6466.89	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
160	6470.43	6468.87	6468.7	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
161	6472.09	6470.53	-	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
162	6475.48	6473.92	6474.32	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
163	6485.72	6484.15	6485.71	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
164	6489.20	6487.63	6489.42	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
165	6493.36	6491.79	6494.13	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
166	6499.84	6498.27	6498	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
167	6510.97	6509.40	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
168	6522.37	6520.79	6520.74	36.05	25.64	71.12	1.434	2.32	DIB	Kuat
169	6538.20	6536.62	6536.51	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
170	6544.82	6543.24	6543.22	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
171	6555.10	6553.52	6553.88	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
172	6566.63	6565.04	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
173	6599.21	6597.62	6597.34	10.46	6.37	60.93	0.50	1.36	DIB	Kuat
174	6602.10	6600.51	6599.99	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
175	6615.33	6613.73	6613.74	255.28	82.91	32.48	1.239	20.59	DIB	Sangat Kuat
176	6624.65	6623.05	6622.84	9.62	14.32	148.82	1.126	0.89	DIB	Lemah
177	6627.50	6625.90	6625.82	4.15	13.90	334.98	1.132	0.39	DIB	Lemah
178	6632.27	6630.67	6630.81	5.01	11.79	235.25	1.642	0.40	DIB	Lemah
179	6634.62	6633.02	6633	6.44	10.99	170.59	1.11	0.59	DIB	Lemah
180	6645.79	6644.18	-	8.70	16.86	193.76	1.502	0.58	DIB	Lemah
181	6647.68	6646.07	6645.99	3.30	7.25	219.76	0.653	0.48	DIB	Lemah
182	6656.35	6654.74	6654.72	3.41	7.60	222.73	0.647	0.51	DIB	Lemah
183	6659.10	6657.49	6657.34	2.50	8.38	335.35	0.539	0.40	DIB	Lemah
184	6662.42	6660.81	6662.17	32.07	14.29	44.55	1.289	2.90	DIB	Kuat
185	6673.92	6672.31	6669.36	18.94	19.75	104.25	0.957	1.82	DIB	Kuat
186	6690.98	6689.36	6689.35	6.49	9.26	142.73	0.921	0.88	DIB	Lemah
187	6696.21	6694.59	6694.53	3.81	13.22	347.06	0.591	0.39	DIB	Lemah
188	6701	6699.38	6699.28	92.30	42.48	46.02	1.519	4.71	DIB	Kuat
189	6709.58	6707.96	Li I	2.46	3.49	142.03	0.402	0.43	Atomik/Molekul	Lemah
190	6711.17	6709.55	6709.49	5.90	13.85	234.81	0.744	0.65	DIB	Lemah
191	6715.38	6713.76	6713.79	6.82	16.14	236.62	1.763	0.48	DIB	Lemah
192	6738.81	6737.18	6737.26	8.11	13.06	161	1.095	0.64	DIB	Lemah
193	6742.81	6741.18	6740.97	11.37	15.68	137.87	1.215	1.02	DIB	Kuat
194	6749.33	6747.70	6747.82	14.35	20.85	145.31	1.659	0.83	DIB	Kuat
195	6772.15	6770.51	6770.17	15.48	16.84	108.78	1.001	1.33	DIB	Kuat
196	6788.02	6786.38	6786.39	14.44	18.48	127.99	1.744	0.91	DIB	Kuat
197	6790.47	6788.83	6788.83	7.77	14.09	181.33	1.107	0.70	DIB	Lemah
198	6794.48	6792.84	6792.51	8.07	13.23	163.95	0.99	0.78	DIB	Lemah
199	6797.19	6795.55	6795.26	6.21	7.70	124.02	0.835	0.76	DIB	Lemah
200	6803.37	6801.73	6801.47	8.97	7.89	87.95	0.476	1.11	DIB	Lemah
201	6805.33	6803.69	6803.35	4.50	9.39	208.59	0.562	0.60	DIB	Lemah
202	6810.74	6809.09	6809.49	4.50	9.95	221.06	1.199	0.42	DIB	Lemah

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	λ_{ref}^a (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
203	6813.01	6811.36	6811.27	30.94	23.02	74.40	2.67	1.34	DIB	Kuat
204	6823.70	6822.05	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
205	6825.31	6823.66	6825.86	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
206	6829.43	6827.78	6827.39	10.62	16.56	155.91	0.781	1.24	DIB	Kuat
207	6836.32	6834.67	6834.58	2.53	6.52	257.81	0.799	0.37	DIB	Lemah
208	6839.68	6838.03	6839.49	3.16	7.58	240.02	0.451	0.57	DIB	Lemah
209	6845.39	6843.74	6843.76	5.93	7.39	124.69	0.67	0.91	DIB	Lemah
210	6854.34	6852.68	6852.52	3.47	7.20	207.35	0.469	0.68	DIB	Lemah
211	6861.91	6860.25	6860.02	7.60	8.35	109.86	0.902	1	DIB	Lemah
212	6864.52	6862.86	6862.49	4.80	10.03	208.92	1.041	0.60	DIB	Lemah
213	6866.65	6864.99	6864.70	3.60	7.63	211.87	0.877	0.50	DIB	Lemah
214	6921.20	6919.53	6919.26	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
215	6940.80	6939.12	-	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
216	6967.30	6965.62	6965.97	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
217	6973.56	6971.88	6973.70	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
218	6980.30	6978.61	6978.47	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
219	6984.14	6982.45	6982.47	7.90	6.40	81.08	0.216	3.43	DIB	Lemah
220	6995.09	6993.40	6993.12	*	*	*	*	*	DIB	Sangat Kuat
221	7022.10	7020.40	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
222	7031.90	7030.20	7030.26	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
223	7033.30	7031.60	7031.64	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
224	7060.97	7059.26	7061.09	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
225	7063.20	7061.49	7062.69	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
226	7071.30	7069.59	7069.60	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
227	7074.89	7073.18	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
228	7080.76	7079.05	-	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
229	7085.42	7083.71	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
230	7087.63	7085.92	7084.65	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
231	7088.90	7087.19	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
232	7118.18	7116.46	7116.37	6.52	9.20	141.09	1.185	0.62	DIB	Lemah
233	7121.87	7120.15	7119.84	37.26	21.89	58.75	1.951	2.01	DIB	Kuat
234	7161.54	7159.81	7160.32	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
235	7226.30	7224.55	7224.16	*	*	*	*	*	DIB	Sangat Kuat
236	7336.57	7334.80	7334.52	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
237	7359.57	7357.79	7357.60	41.20	19.23	46.67	1.577	3.02	DIB	Kuat
238	7368.67	7366.89	7367.08	45.60	22.44	49.20	1.713	3.04	DIB	Kuat
239	7371.82	7370.04	-	26.17	12.82	49	1.51	2.13	DIB	Kuat
240	7378.08	7376.30	7375.85	6.81	9.53	139.95	0.874	1.01	DIB	Lemah
241	7380.92	7379.14	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
242	7384.49	7382.71	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
243	7404.31	7402.52	7405.73	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
244	7408.57	7406.78	7406.26	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
245	7421.27	7419.48	7419.11	7.46	12.81	171.70	0.578	0.93	DIB	Lemah
246	7430.40	7428.61	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
247	7451.52	7449.72	-	2.10	6.34	301.94	0.911	0.30	DIB	Lemah
248	7452.96	7451.16	7451.36	10.13	17.56	173.37	1.402	0.80	DIB	Kuat
249	7455.85	7454.05	-	2.14	10.51	491.32	0.814	0.34	DIB	Lemah
250	7460.25	7458.45	7458.26	14.23	21.31	149.74	0.886	1	DIB	Kuat
251	7464.42	7462.62	-	3.89	20.51	527.29	0.994	0.31	DIB	Lemah

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	$\lambda_{c_{\text{ref}}}^a$ (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
252	7468.44	7466.64	-	1.69	12.36	731.26	0.833	0.26	DIB	Lemah
253	7472.60	7470.80	7470.38	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
254	7475.10	7473.29	7472.61	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
255	7478.54	7476.73	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
256	7496.77	7494.96	7495	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
257	7522.47	7520.65	7520.63	5.21	8.95	171.78	0.928	0.58	DIB	Lemah
258	7528.13	7526.31	-	5.82	12.78	219.51	0.985	0.56	DIB	Lemah
259	7561.08	7559.25	7559.43	3.87	12.70	328.05	0.958	0.36	DIB	Lemah
260	7564.39	7562.56	7562.16	43.17	20.04	46.42	1.352	3.24	DIB	Kuat
261	7666.74	7664.89	K I	299.27	94.57	31.60	0.702	60.12	Atomik/Molekul	Sangat Kuat
262	7700.82	7698.96	K I	265.54	84.09	31.67	0.90	37.83	Atomik/Molekul	Sangat Kuat
263	7724.29	7722.42	7721.98	5.60	6.43	114.81	0.586	1.04	DIB	Lemah

(a) Referensi *central wavelength* merujuk pada Katalog APO (<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/ApJ/878/151>) dan atom atau molekul pada Katalog Hobbs (Hobbs, 2008)

(b) Prosentase galat lebar ekivalen melalui $\% \text{Galat} = \frac{\Delta W_\lambda}{W_\lambda} \times 100\%$

(*) Profil yang tidak terukur parameternya akibat kuat dari kontaminasi *telluric*

(-) Usulan DIB baru yang tidak ditemukan pada referensi Katalog APO atau Katalog Hobbs

Tabel A.2: Katalog DIB HD 186745

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	$\lambda_{\text{c}_{\text{ref}}}^a$ (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
1	4680.40	4680.11	4680.24	6.53	5.42	83.04	0.664	0.94	DIB	Lemah
2	4683.36	4683.07	4683.03	11.35	5.23	46.10	0.434	2.62	DIB	Kuat
3	4686.86	4686.57	-	1.63	3.63	222.42	0.455	0.31	DIB	Lemah
4	4689.18	4688.89	4688.84	5.26	4.65	88.36	0.501	1.01	DIB	Lemah
5	4726.65	4726.35	4726.98	167.94	58.21	34.66	2.049	6.94	DIB	Sangat Kuat
6	4762.91	4762.61	4762.44	45.92	21.49	46.79	1.417	2.75	DIB	Kuat
7	4959.93	4959.62	4959.52	2.11	6.22	294.76	0.571	0.33	DIB	Lemah
8	4962.10	4961.79	-	4.87	6.06	124.40	0.441	0.79	DIB	Lemah
9	4964.17	4963.86	4963.92	36.74	12.80	34.84	0.609	6	DIB	Kuat
10	4965.47	4965.16	4965.19	2.41	3.12	129.60	0.314	0.70	DIB	Lemah
11	4966.39	4966.08	4965.97	2.50	5.41	216.23	0.30	0.67	DIB	Lemah
12	4968.13	4967.82	-	2.33	3.31	142.14	0.405	0.65	DIB	Lemah
13	4974.97	4974.66	4974.93	3.57	4.33	121.37	0.553	0.65	DIB	Lemah
14	4979.83	4979.52	4979.62	7.88	5.89	74.70	0.602	1.26	DIB	Lemah
15	4982.47	4982.16	4982.23	2.05	2.13	103.97	0.356	0.62	DIB	Lemah
16	4985.05	4984.74	4984.78	20.02	10.34	51.67	0.473	4.04	DIB	Kuat
17	4987.02	4986.71	4986.77	1.46	4.97	340.50	0.437	0.35	DIB	Lemah
18	5115.21	5114.89	-	3.59	4.60	128.25	0.726	0.54	DIB	Lemah
19	5117.93	5117.61	5117.62	4.96	6.03	121.48	0.758	0.70	DIB	Lemah
20	5257.78	5257.45	5257.44	9.66	5.63	58.25	0.719	1.40	DIB	Lemah
21	5262.77	5262.44	5262.44	2.83	4.12	145.76	0.423	0.67	DIB	Lemah
22	5358.92	5358.59	5358.76	7.12	7.97	111.96	1.156	0.66	DIB	Lemah
23	5404.81	5404.47	5404.58	26.16	13.55	51.81	0.867	2.60	DIB	Kuat
24	5419.16	5418.82	5419.57	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
25	5488.30	5487.96	5487.64	15.51	10.45	67.38	0.983	1.42	DIB	Kuat
26	5490.61	5490.27	5490.37	3.21	3.61	112.48	0.534	0.65	DIB	Lemah
27	5494.35	5494.01	5494.10	30.08	11.09	36.87	0.303	6.33	DIB	Kuat
28	5504.60	5504.26	5504.32	2.57	3.10	120.49	0.365	0.67	DIB	Lemah
29	5508.81	5508.47	5508.33	11.09	5.11	46.10	0.71	1.85	DIB	Kuat
30	5512.91	5512.57	5512.68	20.75	8.91	42.96	0.491	3.89	DIB	Kuat
31	5516.24	5515.90	5515.95	4.73	6.32	133.53	0.654	0.57	DIB	Lemah
32	5527.72	5527.37	5527.49	2.15	3.22	149.86	0.287	0.62	DIB	Lemah
33	5530.43	5530.08	5530.10	5.38	6.33	117.68	0.514	0.89	DIB	Lemah
34	5542.08	5541.73	5541.92	15.30	7.31	47.75	0.614	2.33	DIB	Kuat
35	5546.85	5546.50	5546.46	11.97	5.87	49.01	0.533	2.10	DIB	Kuat
36	5560.53	5560.18	5560.16	4.11	5.22	127.12	0.63	0.64	DIB	Lemah
37	5581.14	5580.79	5580.79	3.54	3.49	98.58	0.417	0.82	DIB	Lemah
38	5583.50	5583.15	-	3.22	6.62	205.53	0.776	0.38	DIB	Lemah
39	5584.47	5584.12	-	3.03	3.87	127.62	0.36	0.72	DIB	Lemah
40	5585.90	5585.55	5585.56	2.95	4.36	147.96	0.677	0.46	DIB	Lemah
41	5588.72	5588.37	-	5.67	3.96	69.91	0.845	0.71	DIB	Lemah
42	5590.49	5590.14	-	3.53	3.87	109.60	0.463	0.71	DIB	Lemah
43	5594.88	5594.53	5594.58	24.46	11.12	45.45	0.515	3.48	DIB	Kuat
44	5704.89	5704.53	5705.12	20.66	10.87	52.60	1.591	1.50	DIB	Kuat
45	5719.89	5719.53	5719.57	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
46	5763.03	5762.67	5762.68	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
47	5766.48	5766.12	5766.16	*	*	*	*	*	DIB	Kuat

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	λ_{ref}^a (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
48	5769.42	5769.06	5769.09	9.93	5.31	53.50	0.68	1.53	DIB	Lemah
49	5772.90	5772.54	5772.63	5.55	5.24	94.39	0.781	0.74	DIB	Lemah
50	5776.14	5775.78	5775.91	7.87	6.06	77.03	0.901	0.90	DIB	Lemah
51	5780.82	5780.46	5780.64	461.61	147.07	31.86	1.15	26	DIB	Sangat Kuat
52	5785.38	5785.02	5785	7.81	6.87	87.97	0.764	1.09	DIB	Lemah
53	5797.24	5796.88	5797.18	227.49	72.66	31.94	0.729	29.82	DIB	Sangat Kuat
54	5809.77	5809.41	5809.25	23.14	12.04	52.04	1.048	1.80	DIB	Kuat
55	5812.02	5811.66	5811.96	10.72	8.29	77.30	0.557	1.16	DIB	Kuat
56	5814.51	5814.15	5814.28	8.74	6.83	78.20	0.525	1.29	DIB	Lemah
57	5829	5828.64	5828.50	15.36	8.62	56.10	0.683	2.11	DIB	Kuat
58	5835.18	5834.82	-	19.16	12.18	63.59	1.29	1.31	DIB	Kuat
59	5838.35	5837.99	5838.04	5.89	6.61	112.18	0.395	1.06	DIB	Lemah
60	5840.89	5840.53	5840.65	11.15	6	53.78	0.539	2.30	DIB	Kuat
61	5842.59	5842.23	5842.28	4.83	4.67	96.78	0.748	0.67	DIB	Lemah
62	5845.15	5844.78	5844.89	7.36	4.89	66.39	0.444	1.53	DIB	Lemah
63	5850.12	5849.75	5849.82	101.57	34.01	33.49	0.815	12.68	DIB	Sangat Kuat
64	5910.89	5910.52	4910.57	26.63	10.11	37.97	0.718	3.72	DIB	Kuat
65	5923.89	5923.52	5923.51	30.71	12.06	39.28	0.652	3.84	DIB	Kuat
66	5926.40	5926.03	5926.05	12.46	8.78	70.44	0.611	1.57	DIB	Kuat
67	5974.14	5973.77	5973.79	6.09	5.01	82.18	0.398	1.28	DIB	Lemah
68	5976.09	5975.72	5975.71	8.20	7.03	85.67	0.734	1.05	DIB	Lemah
69	5982.99	5982.62	5982.77	6.62	6.25	94.49	0.611	0.96	DIB	Lemah
70	5986.89	5986.52	5986.60	5.52	5.43	98.30	0.644	0.87	DIB	Lemah
71	5988.54	5988.17	5988.05	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
72	6005.40	6005.02	6004.96	9.77	9.06	92.76	0.998	0.86	DIB	Lemah
73	6011.81	6011.43	6011.64	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
74	6015.31	6014.93	6014.84	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
75	6019.94	6019.56	6019.33	13.09	8.34	63.69	0.872	1.49	DIB	Kuat
76	6027.54	6027.16	6027.57	24.21	14.26	58.92	1.596	1.45	DIB	Kuat
77	6030.94	6030.56	6030.39	7.98	5.05	63.27	0.734	1.44	DIB	Lemah
78	6036.04	6035.66	-	3.54	4.18	117.99	0.468	0.70	DIB	Lemah
79	6038.24	6037.86	6037.54	12.75	9.86	77.30	0.471	1.15	DIB	Kuat
80	6056.46	6056.08	-	2.63	4.23	160.76	0.61	0.47	DIB	Lemah
81	6057.80	6057.42	6057.58	5.80	5.45	94.05	0.572	0.94	DIB	Lemah
82	6059.66	6059.28	6059.34	13.40	9.98	74.51	0.492	1.55	DIB	Kuat
83	6065.58	6065.20	6065.32	13.64	6.39	46.88	0.502	2.60	DIB	Kuat
84	6071.90	6071.52	6071.33	17.93	10.38	57.91	1.10	1.55	DIB	Kuat
85	6090.15	6089.77	6089.85	37.86	13.23	34.95	0.501	7.63	DIB	Kuat
86	6093.74	6093.36	6093.33	3.27	5.44	166.44	0.312	0.60	DIB	Lemah
87	6102.64	6102.26	6102.39	3.92	4.17	106.47	0.361	0.99	DIB	Lemah
88	6108.39	6108.01	6108.06	10.23	5.09	49.77	0.392	2.43	DIB	Kuat
89	6110.31	6109.93	6109.91	4.27	3.50	81.87	0.354	1.13	DIB	Lemah
90	6113.58	6113.20	6113.22	33.12	13.39	40.42	0.533	4.84	DIB	Kuat
91	6117.18	6116.80	6116.80	17.02	9.08	53.33	0.799	2.04	DIB	Kuat
92	6118.85	6118.47	6118.57	5.15	4.64	90.01	0.523	0.96	DIB	Lemah
93	6120.66	6120.28	-	3.70	6.57	177.43	0.497	0.53	DIB	Lemah
94	6124.54	6124.16	6124.43	2.50	5.52	220.83	0.52	0.40	DIB	Lemah
95	6140.25	6139.87	6140.04	21.12	9.24	43.77	0.529	3.56	DIB	Kuat
96	6162.20	6161.82	6161.95	15.27	7.64	50.05	0.383	2.84	DIB	Kuat

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	λ_{ref}^a (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
97	6166.23	6165.84	-	6.77	5.71	84.38	0.46	1.16	DIB	Lemah
98	6168.25	6167.86	6168.06	10.06	8.20	81.55	0.965	1.06	DIB	Kuat
99	6170.88	6170.49	6170.51	8.84	7.32	82.81	0.967	0.97	DIB	Lemah
100	6177.60	6177.21	-	1.89	3.68	194.55	0.613	0.38	DIB	Lemah
101	6186.09	6185.70	6185.79	7.66	3.84	50.09	0.387	1.98	DIB	Lemah
102	6187.74	6187.35	6187.30	2.23	4.44	199.19	0.574	0.36	DIB	Lemah
103	6189.71	6189.32	6189.52	4	4.29	107.33	0.429	0.78	DIB	Lemah
104	6195.04	6194.65	6194.73	10.25	4.40	42.91	0.306	3.27	DIB	Kuat
105	6196.30	6195.91	6195.99	65.10	20.97	32.21	0.384	16.75	DIB	Kuat
106	6199.30	6198.91	6199.04	4.17	3.86	92.48	0.393	0.97	DIB	Lemah
107	6203.47	6203.08	6203.58	100.02	33.38	33.37	1.224	8.64	DIB	Sangat Kuat
108	6212	6211.61	6211.69	8.88	4.57	51.52	0.473	1.93	DIB	Lemah
109	6213.44	6213.05	6212.95	6.28	4.63	73.65	0.53	1.17	DIB	Lemah
110	6221.25	6220.86	6220.95	4.33	4.86	112.20	0.569	0.78	DIB	Lemah
111	6223.89	6223.50	6223.65	11.57	8.05	69.60	0.397	2.07	DIB	Kuat
112	6226.48	6226.09	6226.25	9.30	5.57	59.93	0.411	2.05	DIB	Lemah
113	6230.32	6229.93	-	2.01	2.21	109.71	0.223	0.80	DIB	Lemah
114	6234.40	6234.01	6234.01	26.90	13.37	49.69	0.567	3.44	DIB	Kuat
115	6237.11	6236.72	6236.86	4.34	4.82	111.15	0.373	1.03	DIB	Lemah
116	6251.29	6250.90	-	6.95	4.68	67.39	0.536	1.31	DIB	Lemah
117	6270.11	6269.72	6269.89	93.25	32.35	34.70	0.944	9.06	DIB	Kuat
118	6284.15	6283.76	6284.05	*	*	*	*	*	DIB	Sangat Kuat
119	6330.32	6329.92	6330.03	15.14	6.92	45.72	0.559	2.80	DIB	Kuat
120	6353.70	6353.30	6353.31	22.75	12.71	55.88	1.41	1.53	DIB	Kuat
121	6358.79	6358.39	6358.36	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
122	6362.85	6362.45	6362.26	4.97	4.54	91.32	0.736	0.76	DIB	Lemah
123	6367.63	6367.23	6367.30	17.88	6.72	37.57	0.417	4.19	DIB	Kuat
124	6376.27	6375.87	6376.14	67.91	24.13	35.53	1.179	8.05	DIB	Kuat
125	6379.57	6379.17	6379.25	118.90	38.21	32.13	0.813	24.65	DIB	Sangat Kuat
126	6400.75	6400.35	6400.49	6.98	5	71.68	1.014	0.81	DIB	Lemah
127	6410.61	6410.21	6410.25	11.07	9.37	84.64	0.488	1.63	DIB	Kuat
128	6418.88	6418.48	6418.64	5.11	5.01	97.99	0.535	0.89	DIB	Lemah
129	6426.05	6425.65	6425.68	20.53	8.33	40.57	0.671	3.13	DIB	Kuat
130	6439.85	6439.45	6439.51	33.97	15.38	45.26	0.828	3.37	DIB	Kuat
131	6445.62	6445.22	6445.30	43.13	19.27	44.68	0.823	4.31	DIB	Kuat
132	6449.34	6448.94	6449.27	20.60	8.52	41.37	0.752	2.78	DIB	Kuat
133	6460.83	6460.43	6460.36	11.54	10.42	90.32	0.821	1.30	DIB	Kuat
134	6463.99	6463.59	6463.65	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
135	6467.37	6466.97	6466.89	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
136	6489.80	6489.39	6489.42	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
137	6492.38	6491.97	6492.01	8.74	4.71	53.90	0.403	2.13	DIB	Lemah
138	6498.38	6497.97	6498	12.81	8.08	63.04	0.808	1.57	DIB	Kuat
139	6520.94	6520.53	6520.74	36.98	15.02	40.61	0.85	3.81	DIB	Kuat
140	6554.21	6553.80	6553.88	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
141	6597.71	6597.30	6597.34	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
142	6613.93	6613.52	6613.74	289.53	91.98	31.77	1.084	33.90	DIB	Sangat Kuat
143	6623.17	6622.76	6622.84	9.02	4.95	54.90	0.65	1.49	DIB	Lemah
144	6631.11	6630.70	-	7.21	3.97	55.12	0.444	1.63	DIB	Lemah
145	6639.72	6639.31	6639.32	4.69	12.31	262.46	0.645	0.80	DIB	Lemah

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	λ_{ref}^a (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
146	6643.90	6643.48	6643.43	2.85	4.01	140.59	0.691	0.43	DIB	Lemah
147	6646.44	6646.02	6645.99	12.81	6.37	49.71	0.808	1.57	DIB	Kuat
148	6733.99	6733.57	6733.67	34.59	17.75	51.33	1.465	1.90	DIB	Kuat
149	6741.67	6741.25	6740.97	6.85	5.92	86.41	0.621	0.95	DIB	Lemah
150	6744.46	6744.04	6743.90	21.41	13.89	64.89	1.982	1.20	DIB	Kuat
151	6748.32	6747.90	6747.82	10.40	8.80	84.66	0.832	1.09	DIB	Kuat
152	6751.54	6751.12	6750.76	13.16	7.33	55.72	1.042	1.40	DIB	Kuat
153	6753.25	6752.83	-	12.93	8.39	64.92	1.179	1.08	DIB	Kuat
154	6765.99	6765.57	6765.29	15.39	10.74	69.77	0.752	1.56	DIB	Kuat
155	6768.22	6767.80	6767.69	11.16	6.47	57.93	0.888	1.37	DIB	Kuat
156	6770.80	6770.38	6770.17	33.83	15.19	44.90	0.745	2.84	DIB	Kuat
157	6779.69	6779.27	6778.97	13.80	8.14	58.97	0.674	1.84	DIB	Kuat
158	6783.24	6782.82	-	4.28	3.70	86.34	0.312	1.01	DIB	Lemah
159	6789.18	6788.76	6788.83	14.69	9.35	63.64	0.721	1.28	DIB	Kuat
160	6793.07	6792.65	6792.51	6.98	4.01	57.50	0.523	1.42	DIB	Lemah
161	6795.88	6795.46	6795.26	12.50	5.55	44.38	0.368	2.97	DIB	Kuat
162	6811.83	6811.40	6811.27	5.65	4.22	74.77	0.39	1.25	DIB	Lemah
163	6827.96	6827.53	6827.39	3.64	3.18	87.50	0.365	0.96	DIB	Lemah
164	6836.84	6836.41	-	5.36	8.21	153.11	0.548	1.01	DIB	Lemah
165	6844.47	6844.04	6843.76	32.30	12.43	38.49	0.648	3.49	DIB	Kuat
166	6847.26	6846.83	-	4.07	2.60	63.97	0.296	1.39	DIB	Lemah
167	6863	6862.57	6862.49	10.29	4.86	47.27	0.647	1.77	DIB	Kuat
168	6945.29	6944.86	6944.62	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
169	6974.35	6973.91	-	11	5.61	51.01	0.486	2.10	DIB	Kuat
170	6979.15	6978.71	6978.47	5.24	3.81	72.80	0.456	1.17	DIB	Lemah
171	6982.94	6982.50	-	5.63	2.04	36.22	0.683	0.83	DIB	Lemah
172	6993.81	6993.37	6993.12	108.91	35.18	32.30	0.867	12.63	DIB	Sangat Kuat
173	6997.52	6997.08	-	5.98	4.59	76.68	0.633	0.99	DIB	Lemah
174	7003.20	7002.76	7002.52	37.92	15.06	39.72	1.014	3.24	DIB	Kuat
175	7013.95	7013.51	-	17.19	8.47	49.29	0.91	1.92	DIB	Kuat
176	7031.01	7030.57	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
177	7046.65	7046.21	7045.88	6.26	3.21	51.32	0.381	1.67	DIB	Lemah
178	7070.11	7069.67	7069.60	28.60	12.17	42.54	0.655	3.59	DIB	Kuat
179	7081.52	7081.08	-	7.38	5.30	71.85	0.716	1.03	DIB	Lemah
180	7086.17	7085.73	7085.37	15.96	7.51	47.03	1.156	1.60	DIB	Kuat
181	7097.29	7096.85	-	3.21	3.51	109.49	0.234	1.05	DIB	Lemah
182	7100.22	7099.78	-	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
183	7101.50	7101.06	7101.24	*	*	*	*	*	DIB	Lemah
184	7157.80	7157.35	-	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
185	7224.65	7224.20	7224.16	175.92	56.02	31.84	1.135	16.94	DIB	Sangat Kuat
186	7237.62	7237.17	-	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
187	7335.94	7335.48	-	*	*	*	*	*	DIB	Kuat
188	7347.99	7347.53	7347.34	3.58	2.96	82.63	0.524	0.81	DIB	Lemah
189	7350.30	7349.84	-	37.98	14.11	37.16	1.088	3.59	DIB	Kuat
190	7403.24	7402.78	-	16.52	8.49	51.39	1.396	1.40	DIB	Kuat
191	7412.79	7412.33	-	11.60	5.88	50.70	0.355	2.10	DIB	Kuat
192	7419.79	7419.33	7419.11	8.89	5.59	62.90	0.845	1.08	DIB	Lemah
193	7481.12	7480.65	-	37.67	14.80	39.30	1.419	3.04	DIB	Kuat
194	7495.66	7495.19	7495	9.57	4.23	44.18	0.429	2.31	DIB	Lemah

Indeks	λ_{obs} (Å)	λ_c (Å)	$\lambda_{c_{\text{ref}}}^a$ (Å)	W_λ (mÅ)	ΔW_λ (mÅ)	%Galat ^b	FWHM (Å)	τ ($\times 100$)	Jenis	Tingkat Profil
195	7503.53	7503.06	-	15.25	6.29	41.22	*	2.56	DIB	Kuat
196	7525.35	7524.88	-	14.90	9.69	65.02	1.408	1.24	DIB	Kuat
197	7531.25	7530.78	-	9.62	5.58	58.05	0.405	1.92	DIB	Lemah
198	7538.97	7538.50	-	10.14	6.64	65.48	0.828	1.30	DIB	Kuat
199	7541.58	7541.11	-	8.63	5.29	61.25	0.419	1.66	DIB	Lemah
200	7560.21	7559.74	7559.43	18.57	7.85	42.26	0.604	2.86	DIB	Kuat
201	7565.51	7565.04	-	13.25	6.18	46.68	0.781	1.96	DIB	Kuat
202	7572.49	7572.02	7571.68	13.16	8.59	65.24	0.62	2.23	DIB	Kuat
203	7699.44	7698.96	K I	260.69	82.40	31.61	0.316	79.98	Atomik/Molekul	Sangat Kuat
204	7707.07	7706.59	7706.76	2.93	2.42	82.49	0.255	2	DIB	Lemah
205	7708.45	7707.97	7708.06	6	3.63	60.42	0.27	2.50	DIB	Lemah
206	7720.80	7720.32	7720.21	7.27	3.69	50.78	0.104	2.80	DIB	Lemah
207	7722.20	7721.72	7721.98	28.43	10.69	37.59	0.242	4.88	DIB	Kuat

(a) Referensi *central wavelength* merujuk pada Katalog APO (<https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/ApJ/878/151>) dan atom atau molekul pada Katalog Hobbs (Hobbs, 2009)

(b) Prosentase galat lebar ekivalen melalui $\% \text{Galat} = \frac{\Delta W_\lambda}{W_\lambda} \times 100\%$

(*) Profil yang tidak terukur parameternya akibat kuat dari kontaminasi *telluric*

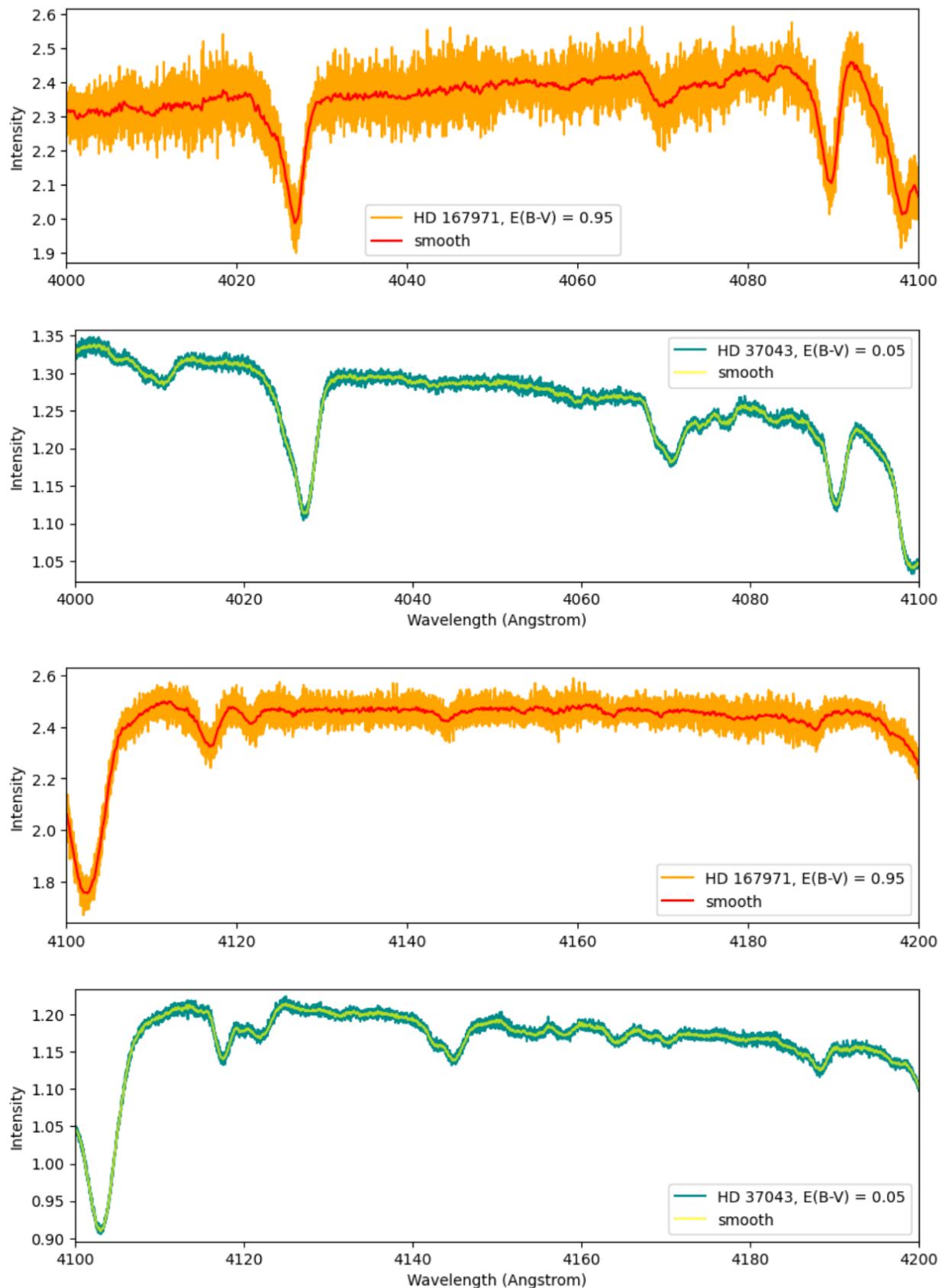
(-) Usulan DIB baru yang tidak ditemukan pada referensi Katalog APO atau Katalog Hobbs

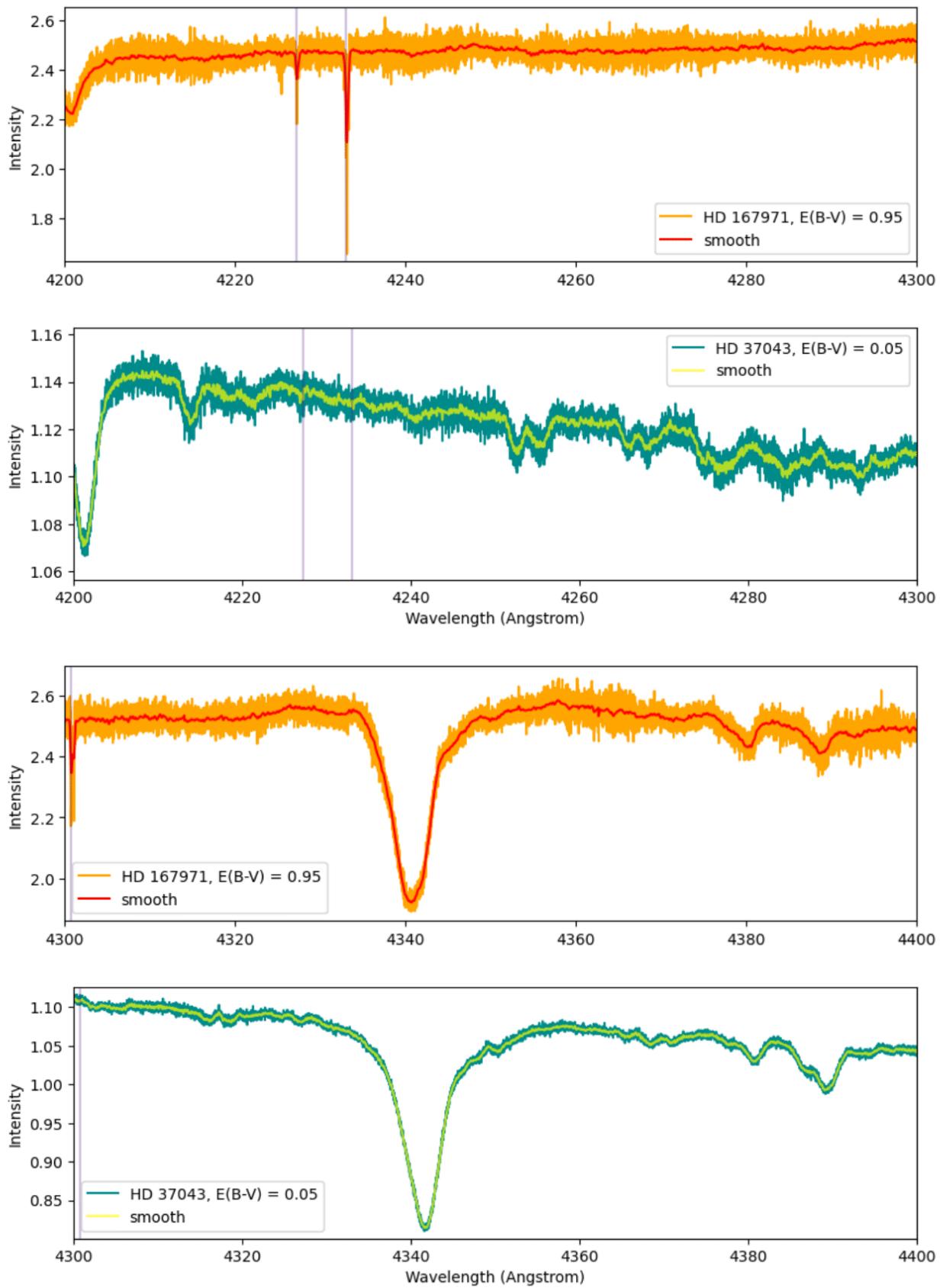
LAMPIRAN B

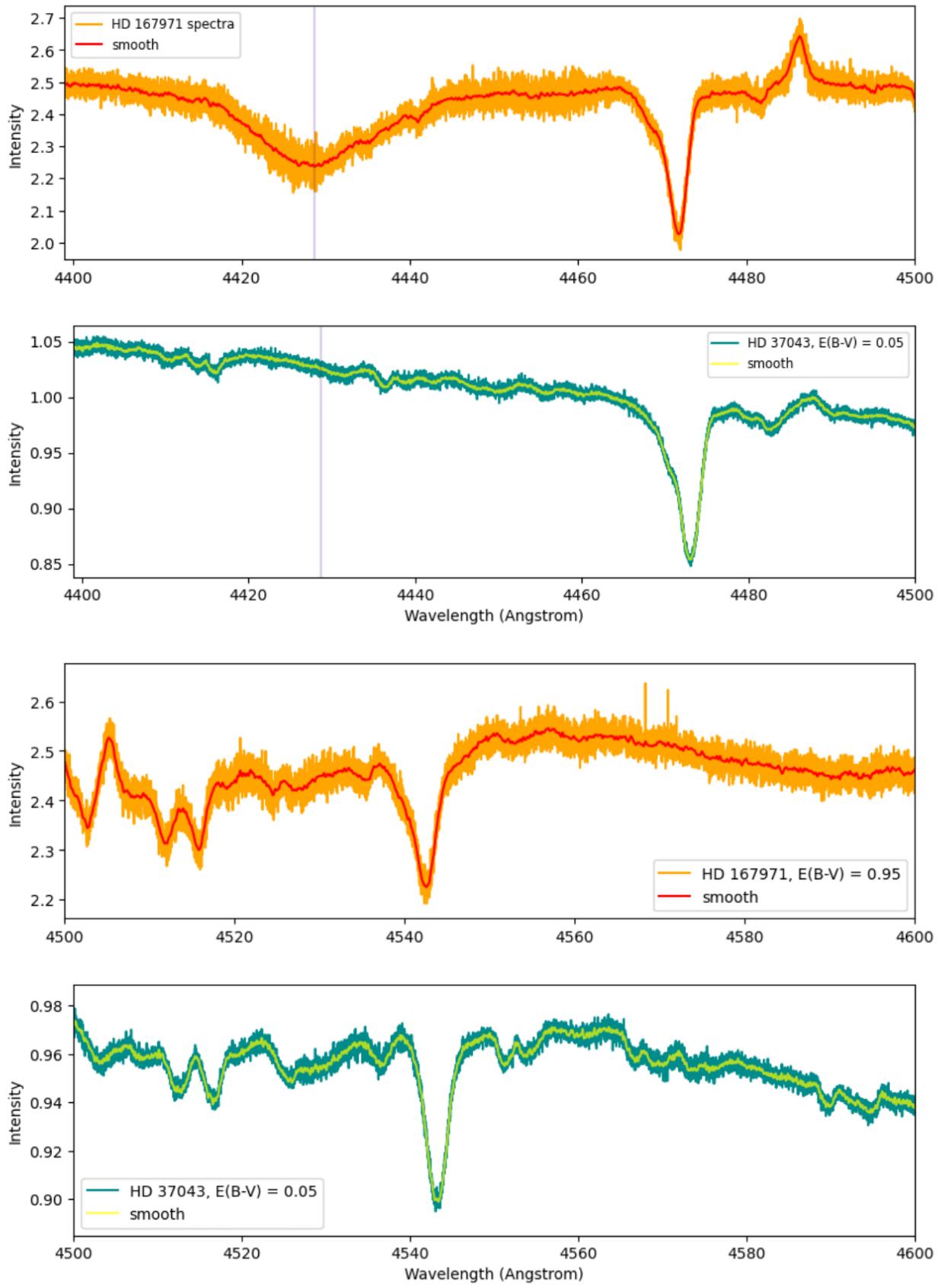
PLOT KATALOG

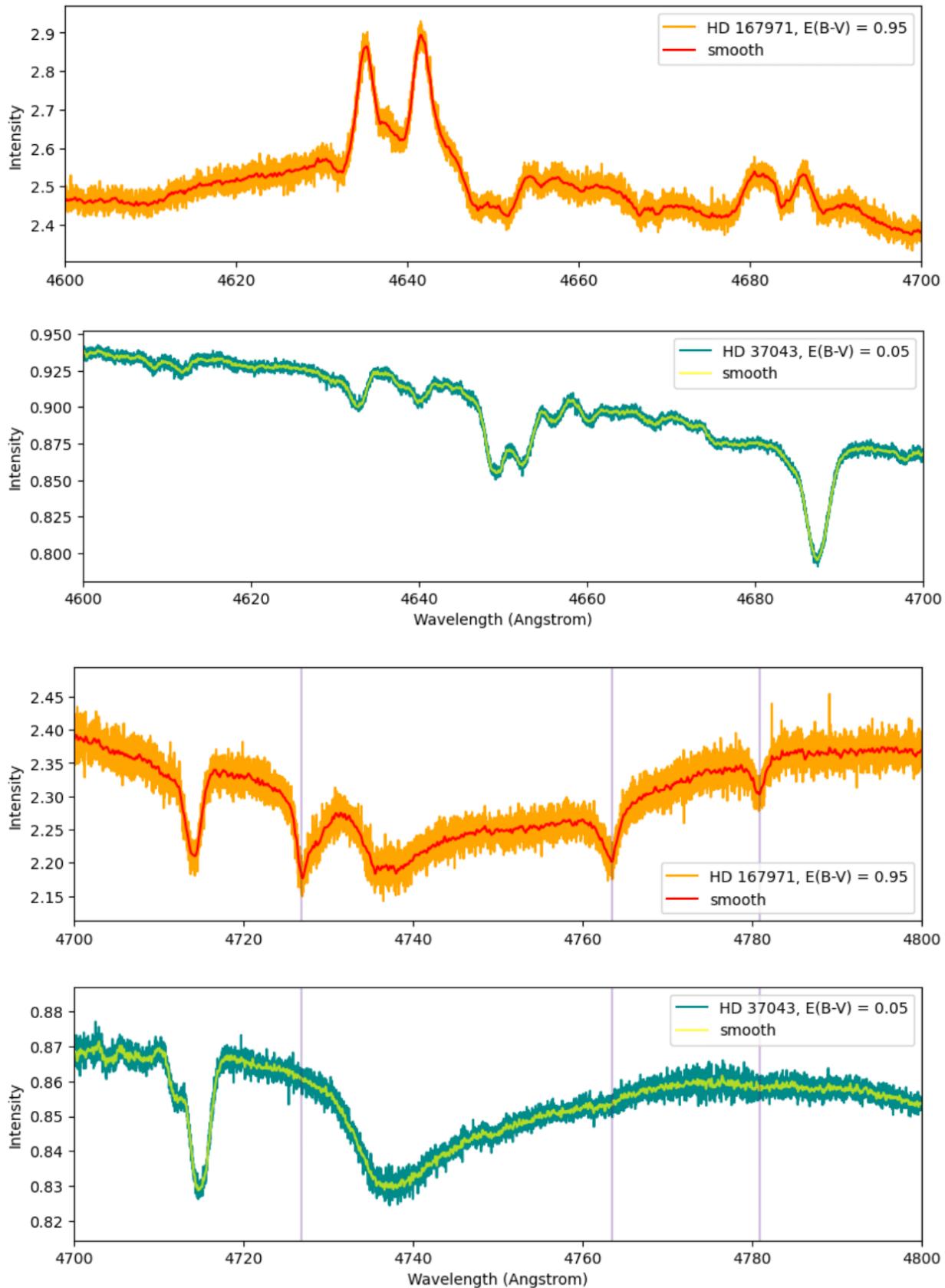
Pada bagian ini, akan ditampilkan plot temuan dua katalog penelitian; Bintang HD 167971 dengan bintang pembandingnya ι Orionis, dan Bintang HD 186745 dengan bintang pembandingnya β Orionis setiap panjang gelombang 100 Å. Bintang target dengan DIB direpresentasikan oleh plot atas (warna jingga untuk spektrum mentah dan warna merah untuk spektrum *smoothing*) dan bintang pembanding direpresentasikan oleh plot bawah (warna biru-kehijauan abu-abu spektrum mentah dan warna kuning untuk spektrum *smoothing*). Garis ungu mengindikasikan keberadaan DIB yang terukur parameter profil garis pada tabel di Lampiran A dan garis biru putus-putus mengindikasikan keberadaan DIB yang tidak terukur parameter profil garis akibat kuatnya kontaminasi *telluric* (profil *telluric* tidak disertakan sebagai efisiensi penempatan gambar).

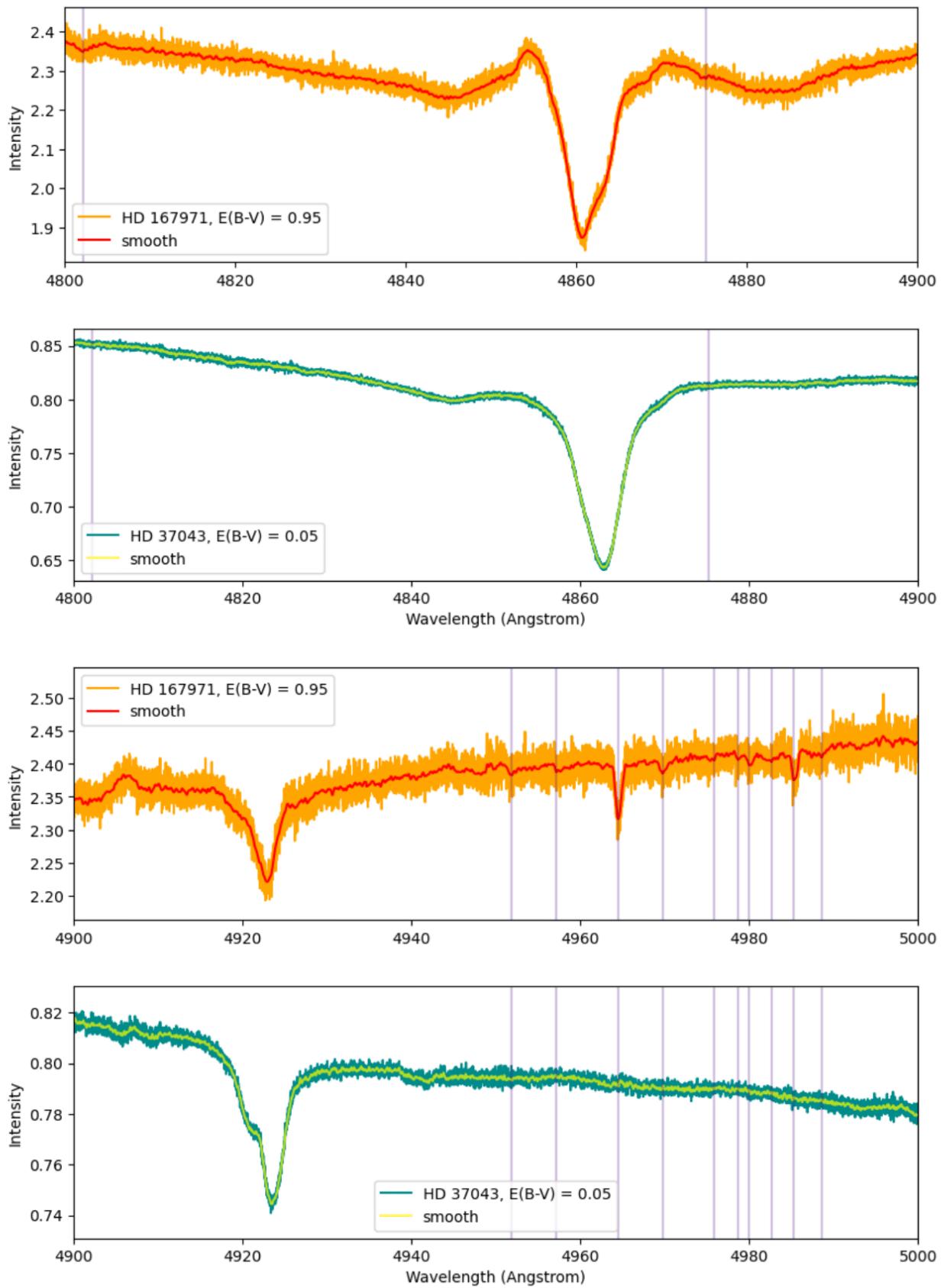
Gambar B.1: Spektrum DIB HD 167971

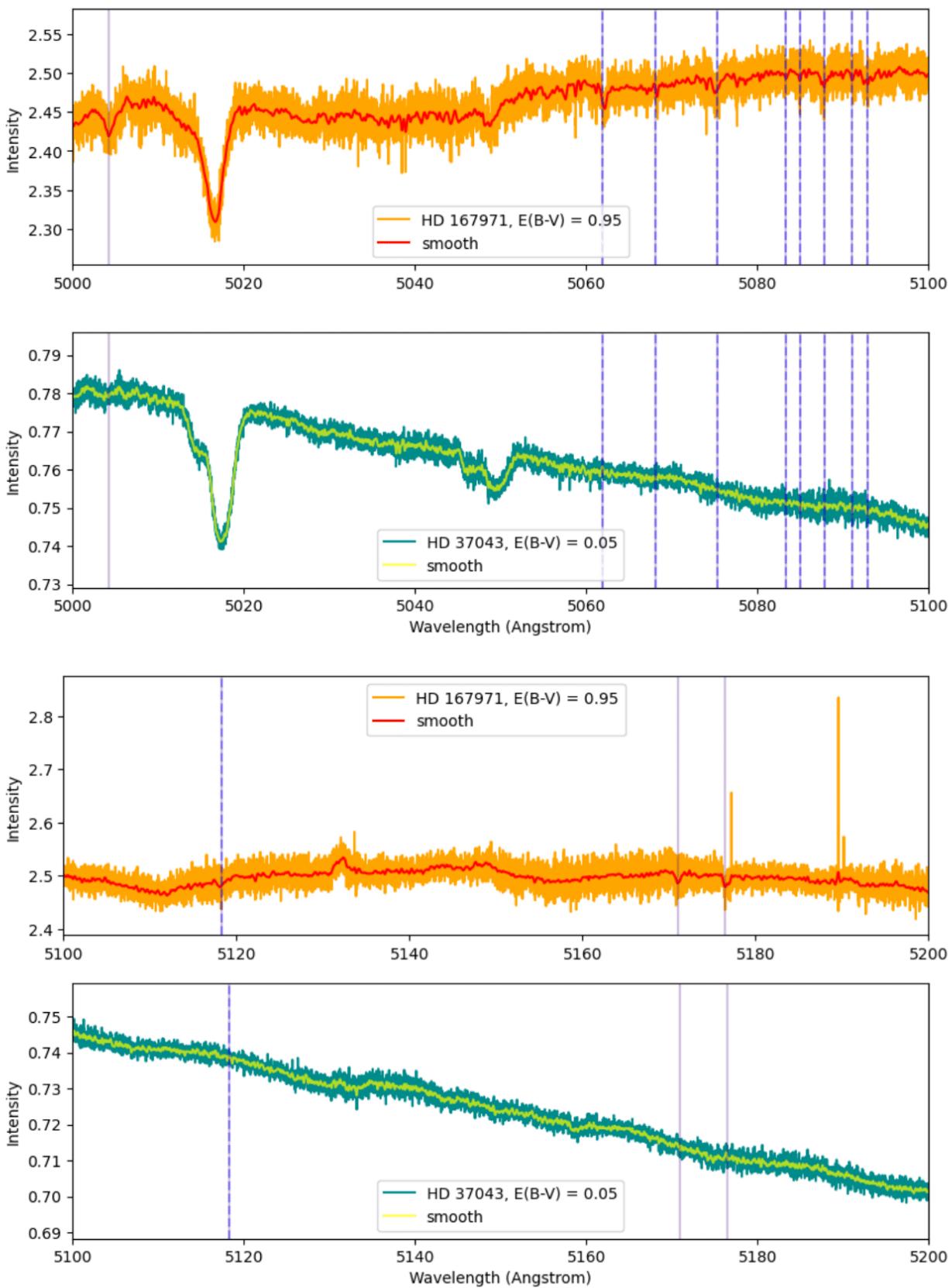


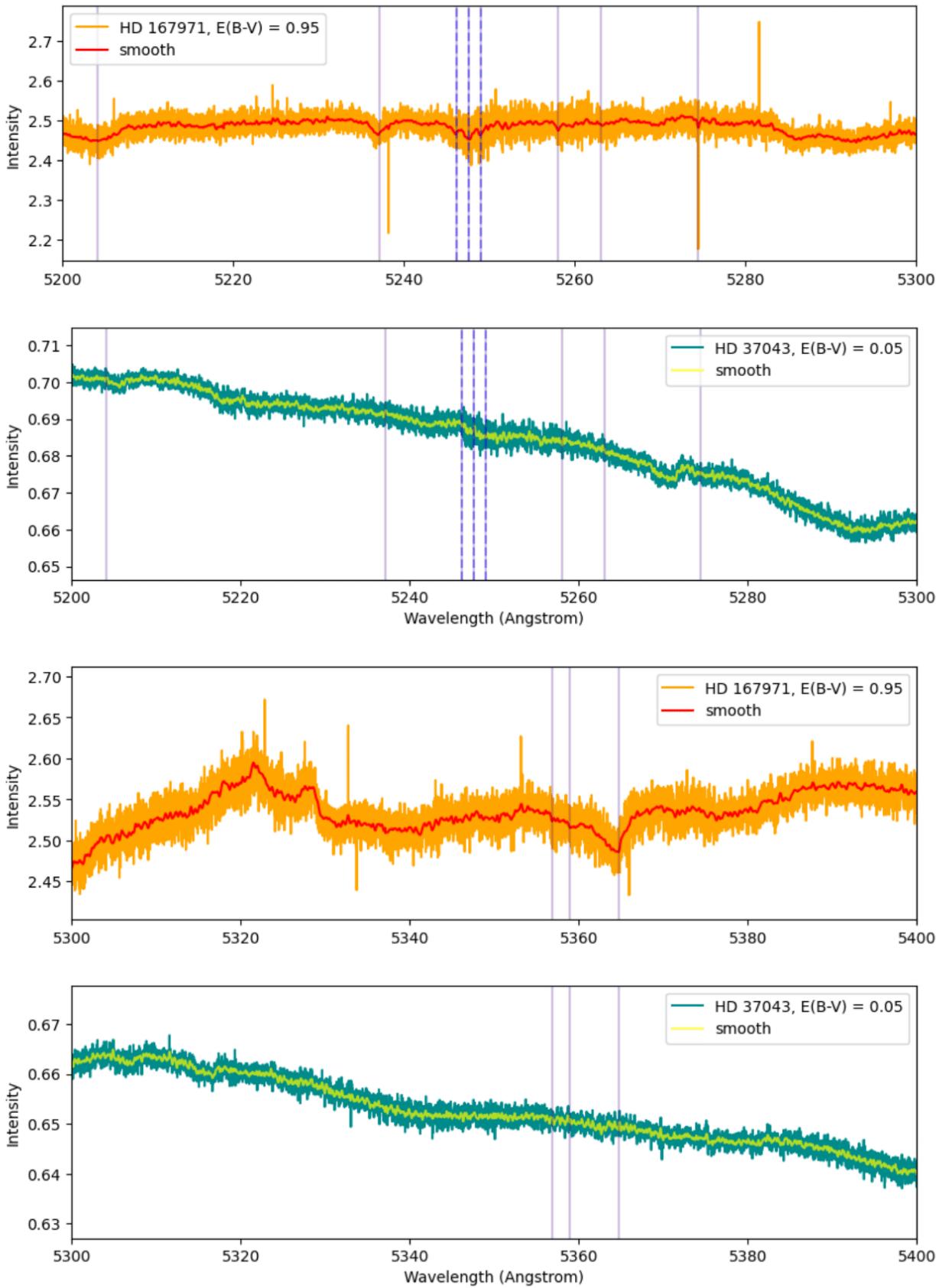


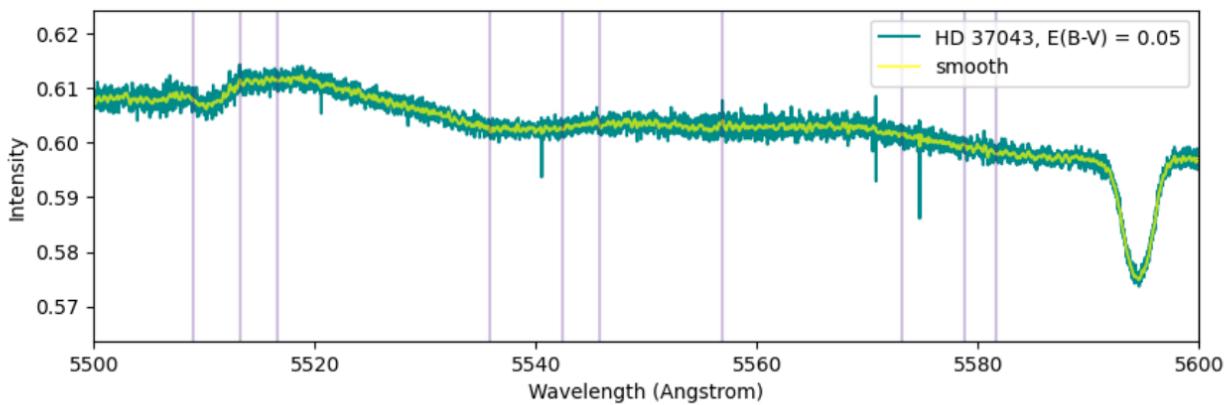
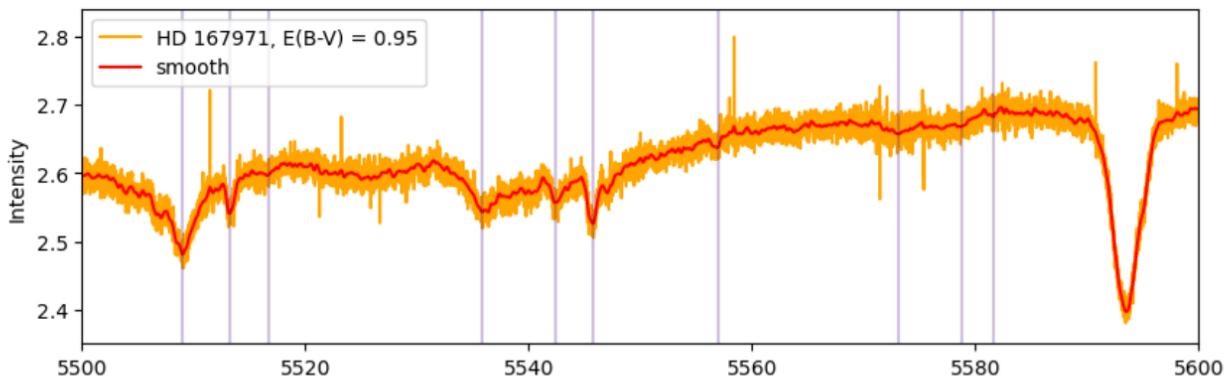
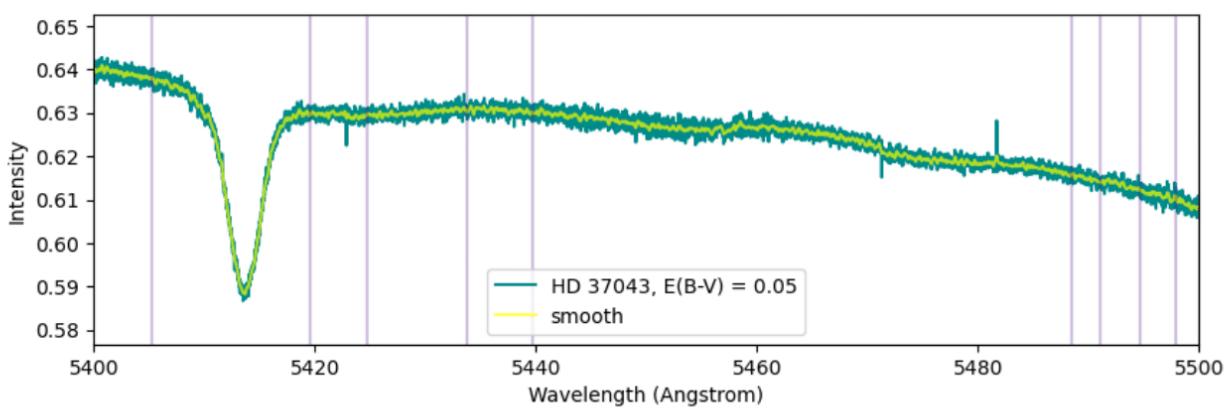
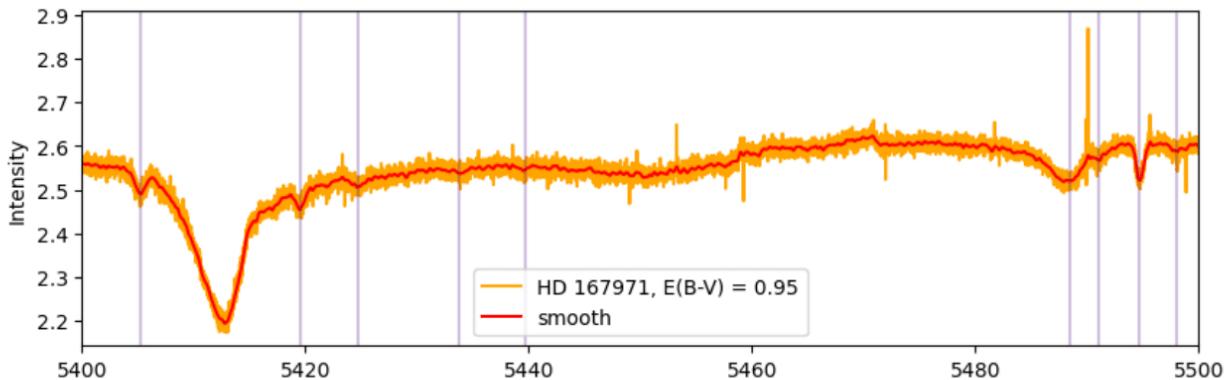


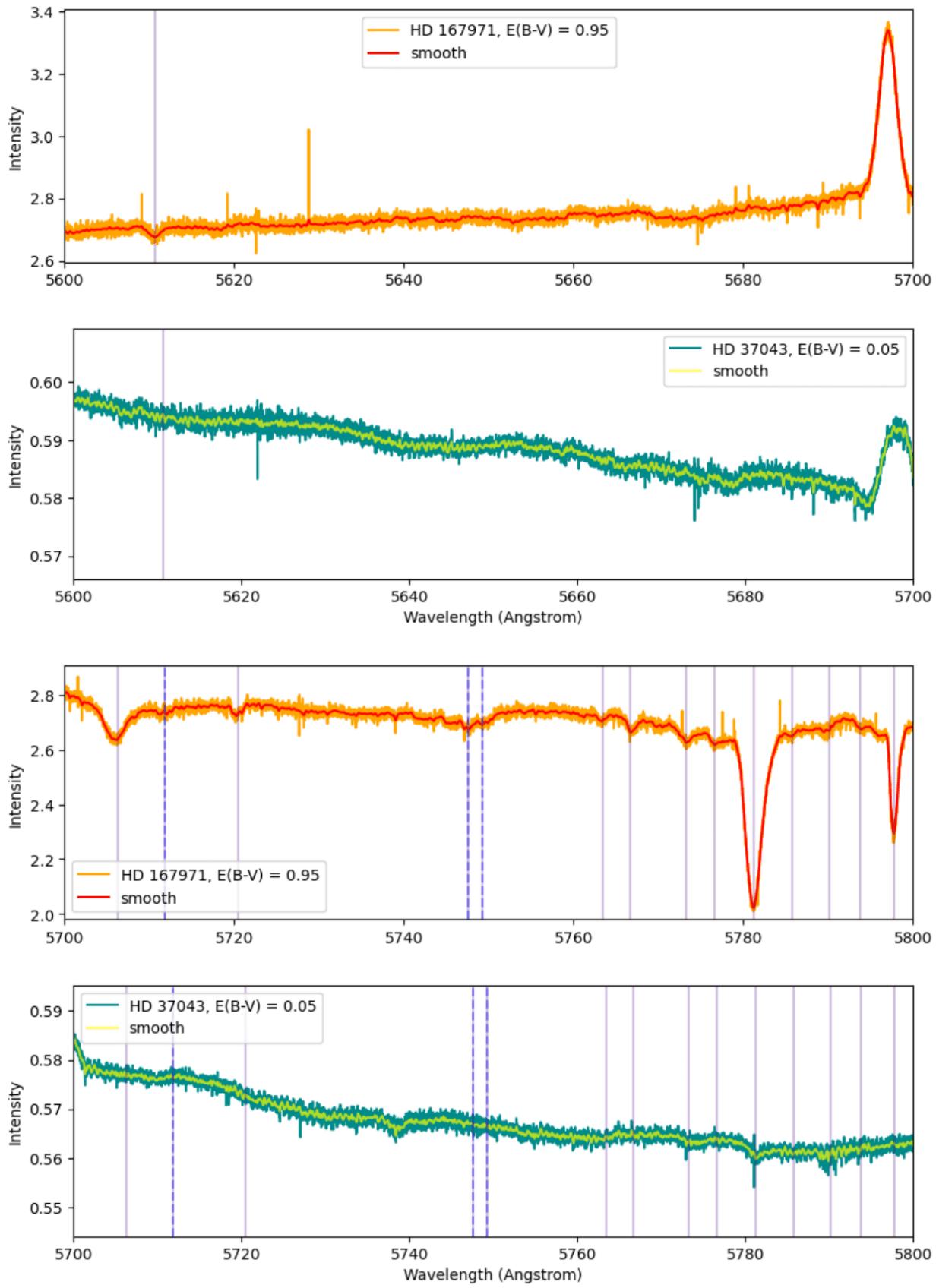


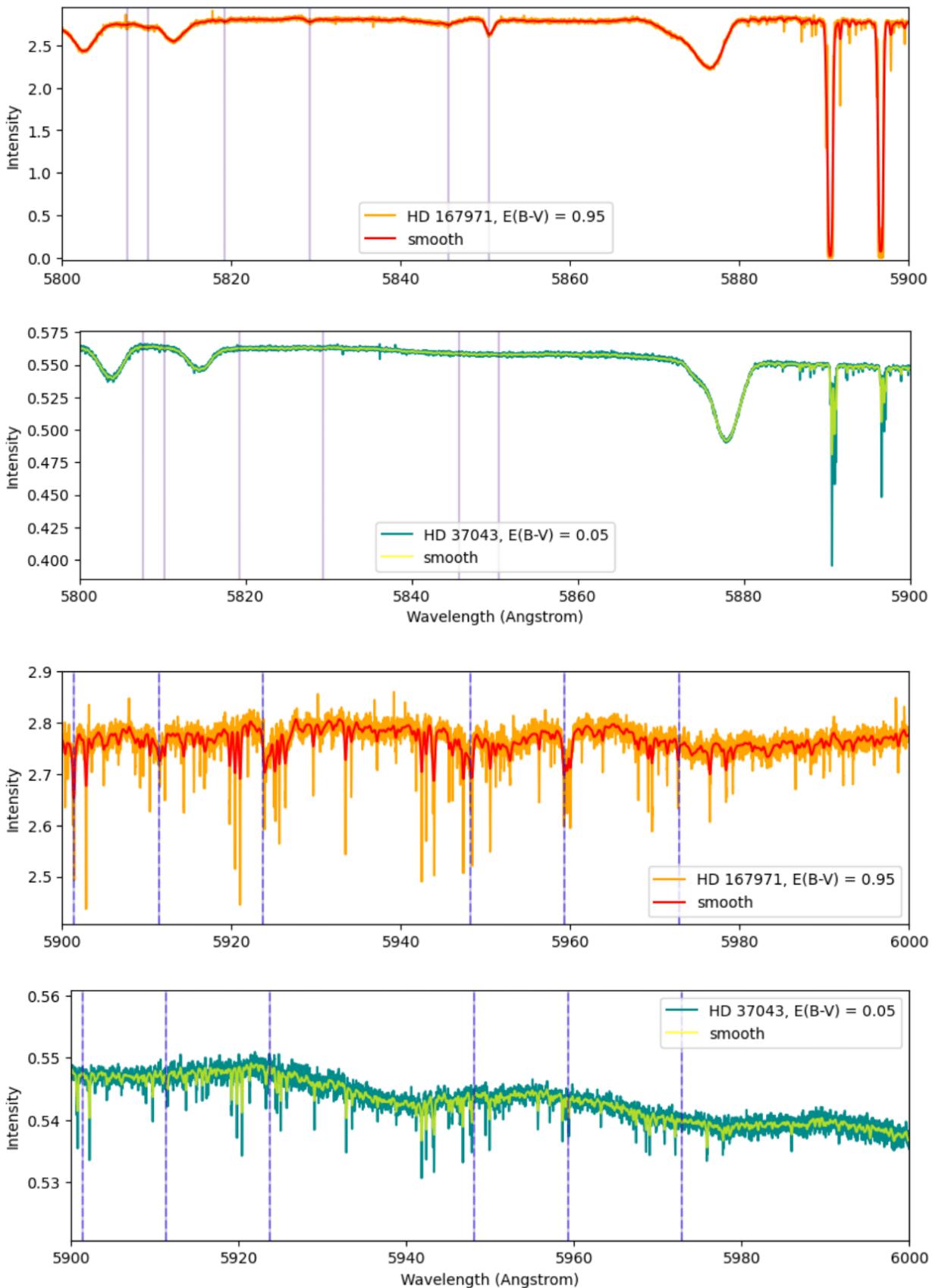


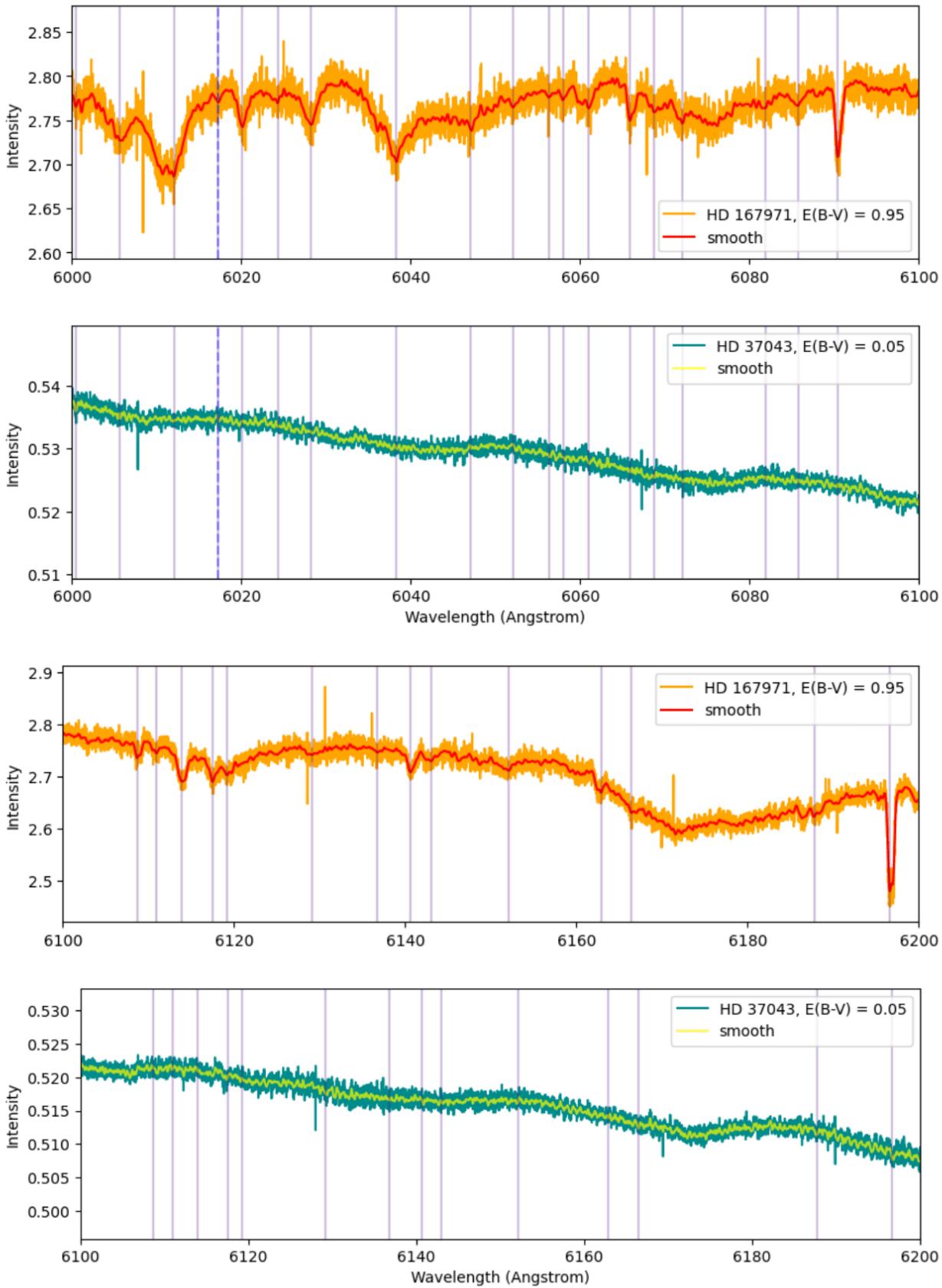


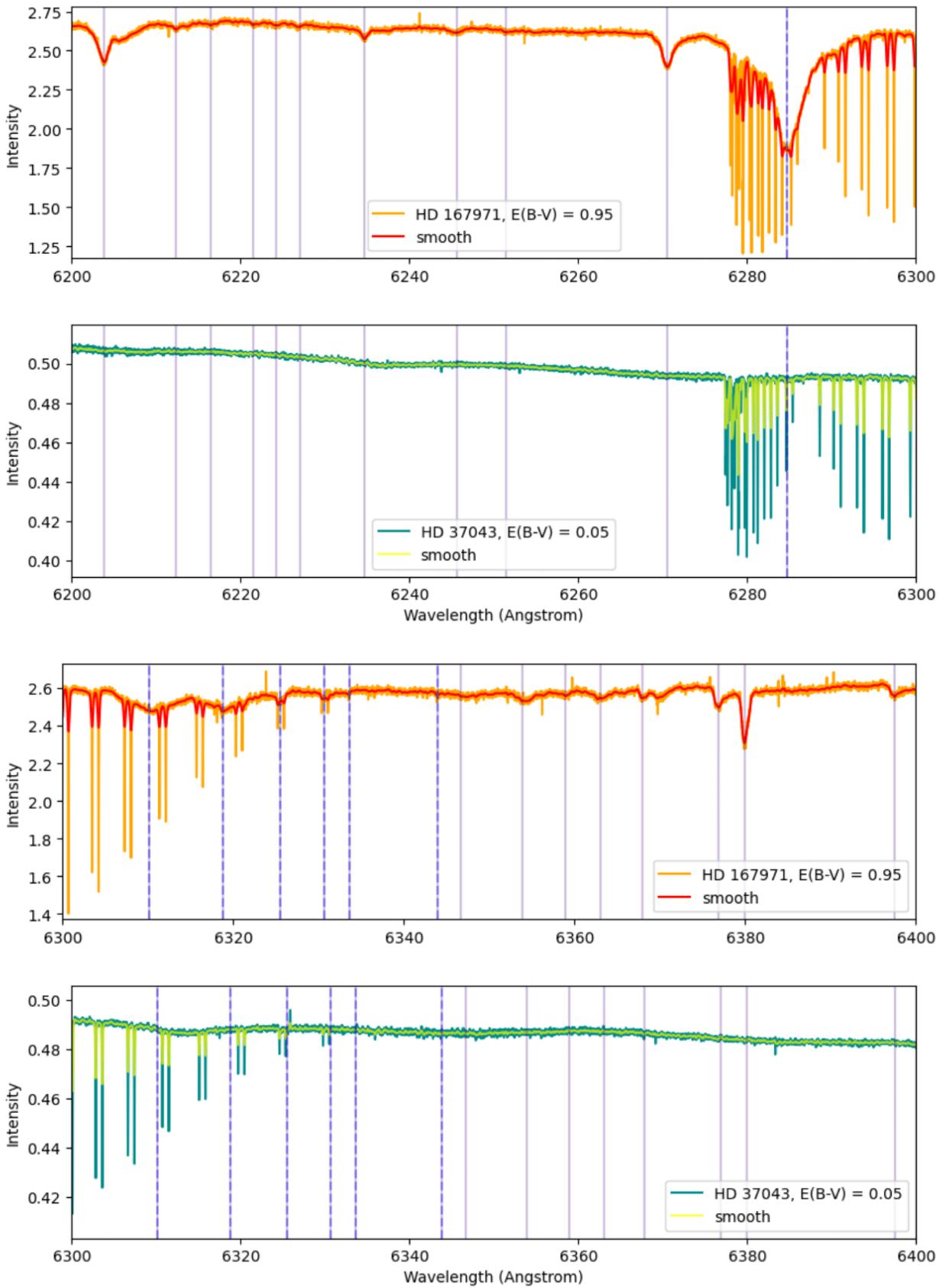


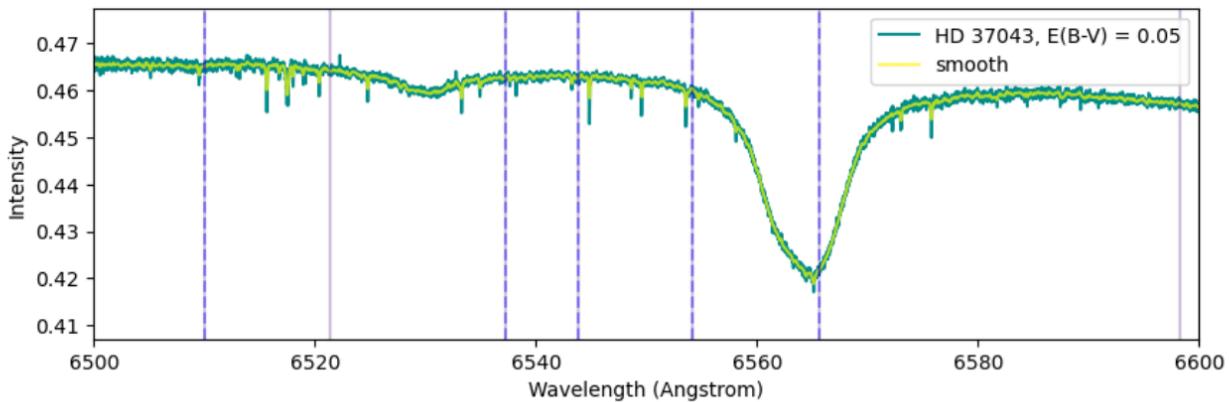
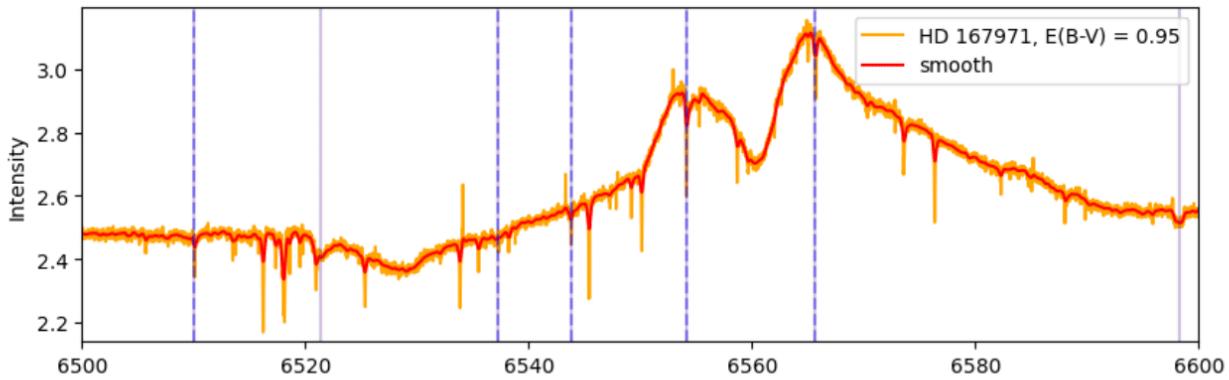
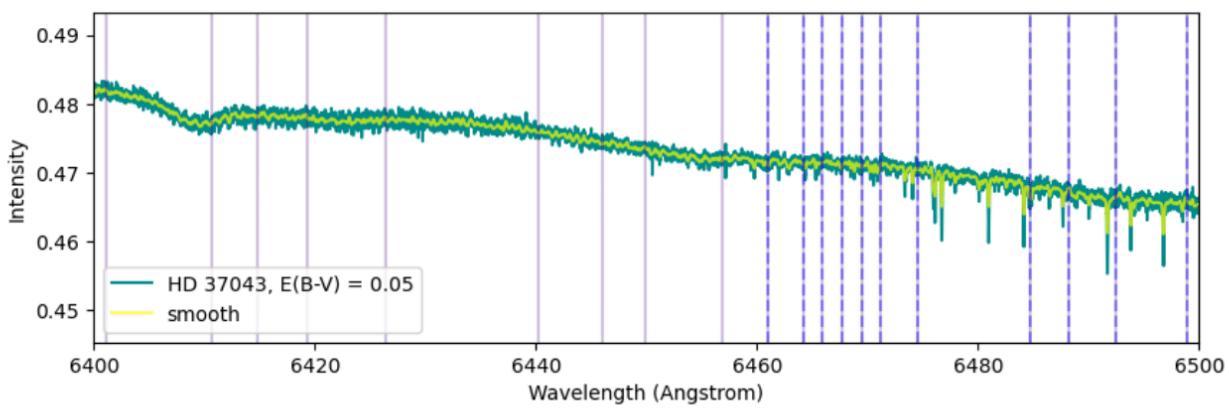
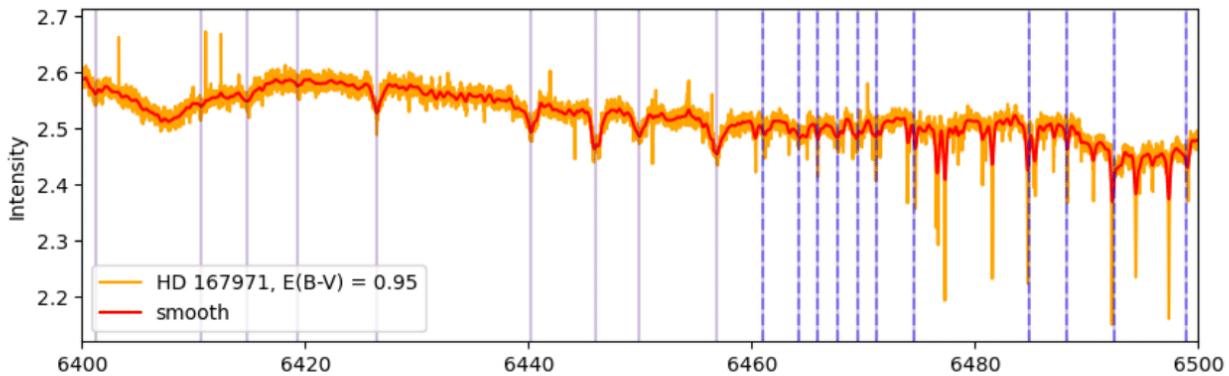


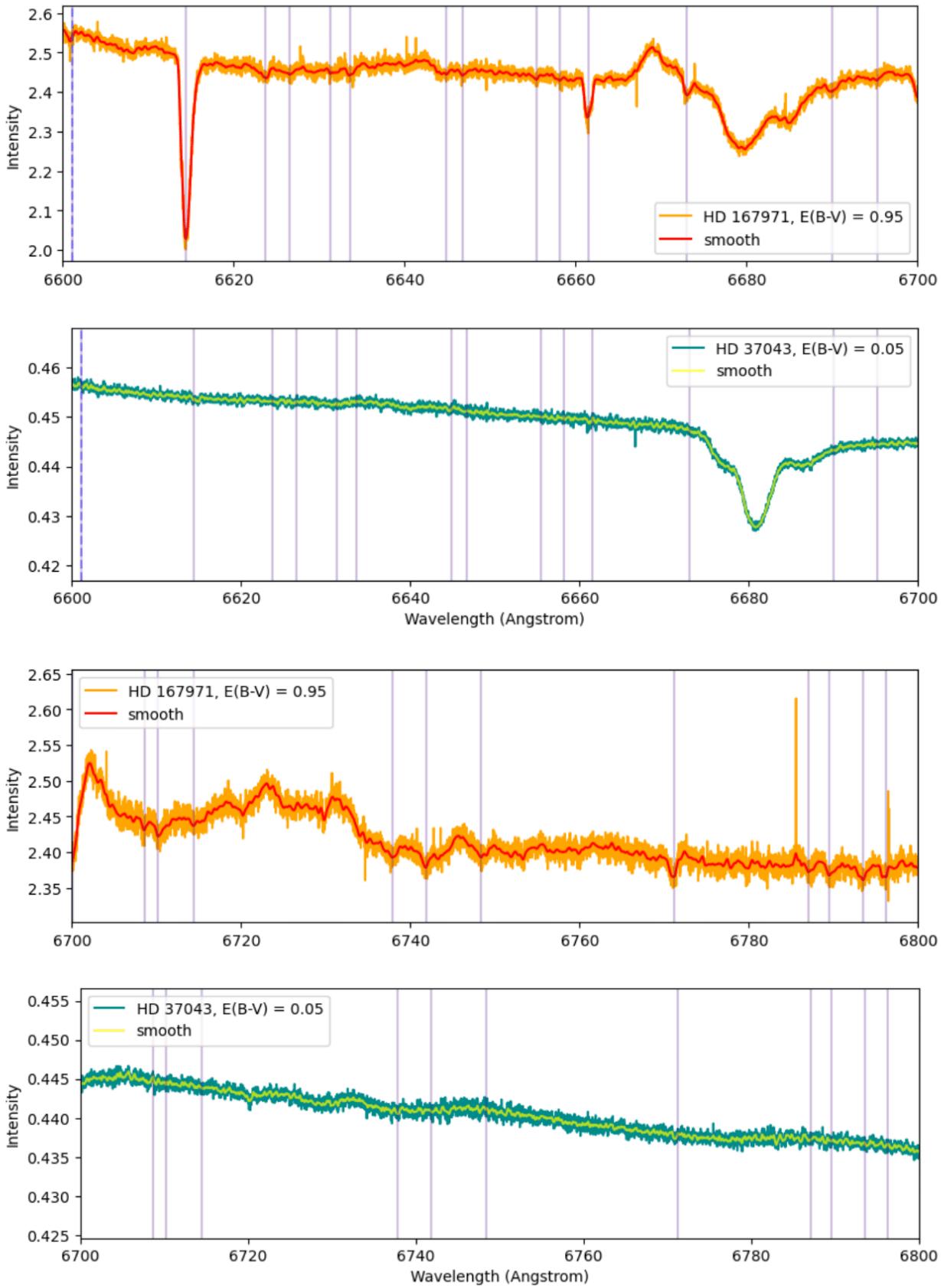


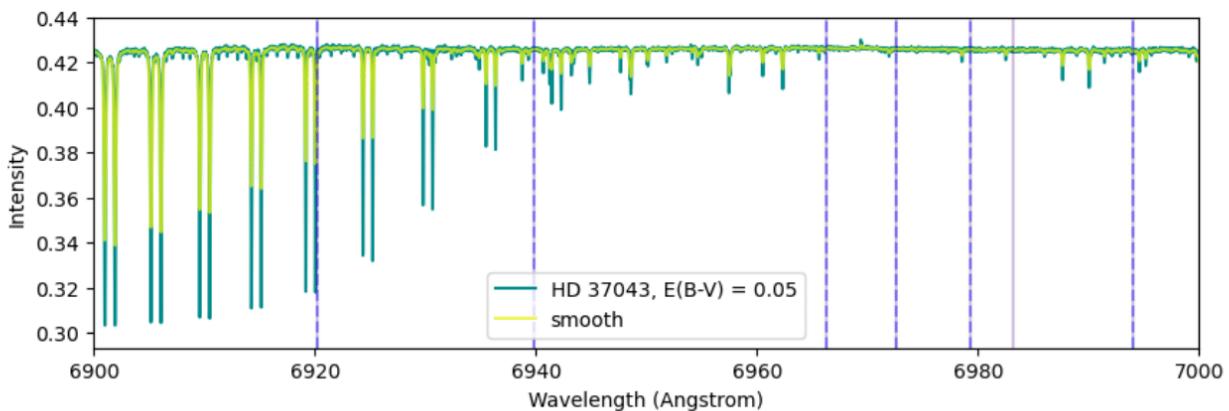
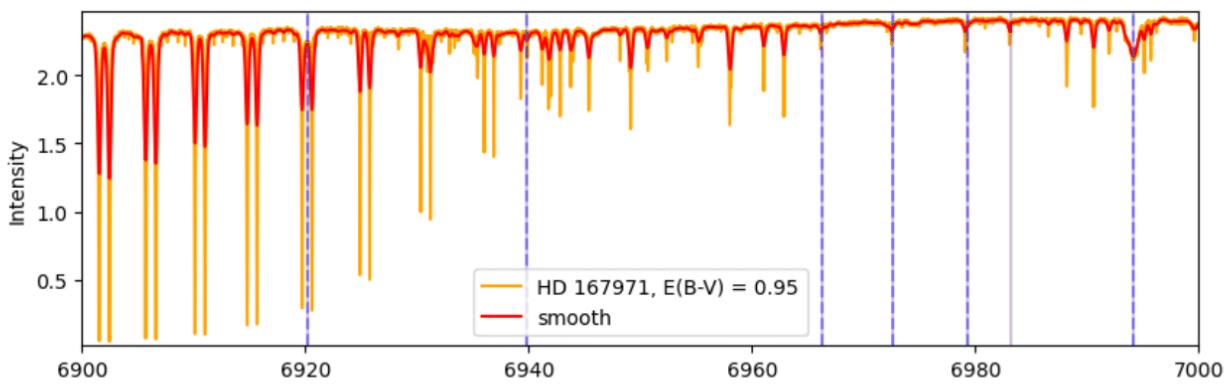
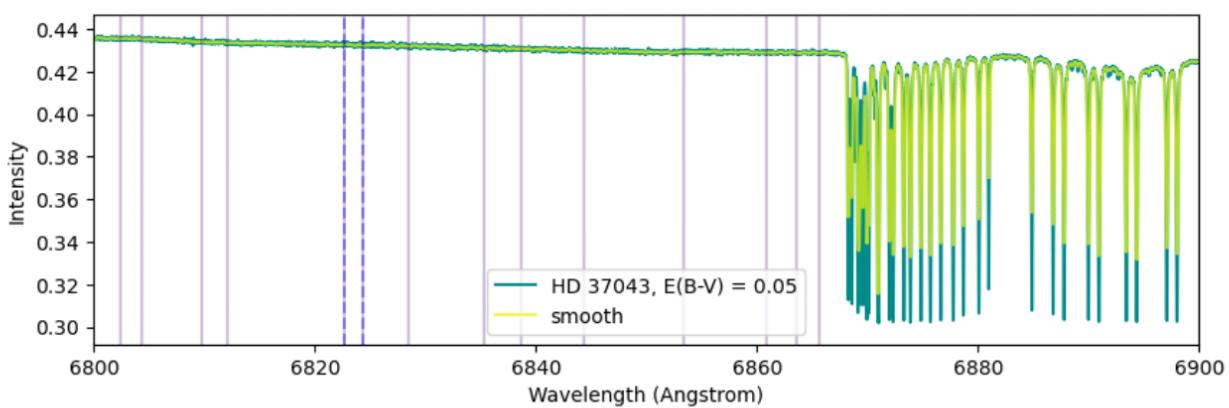
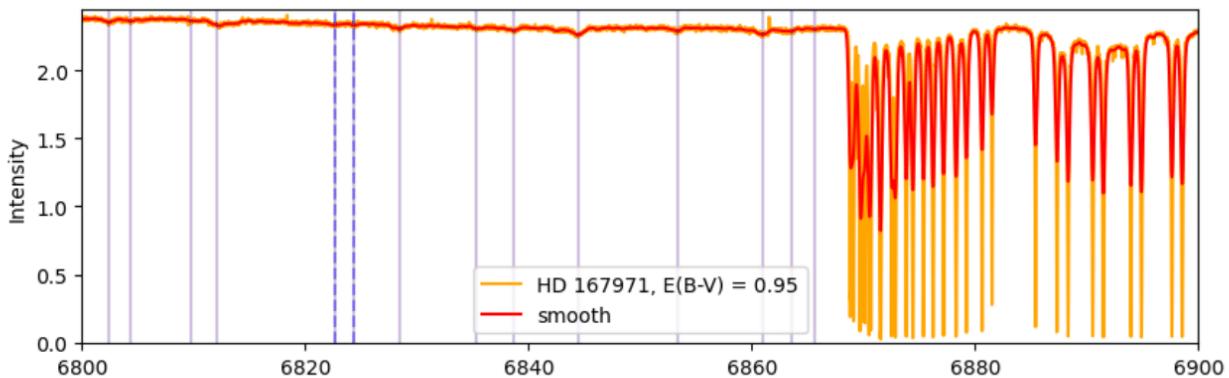


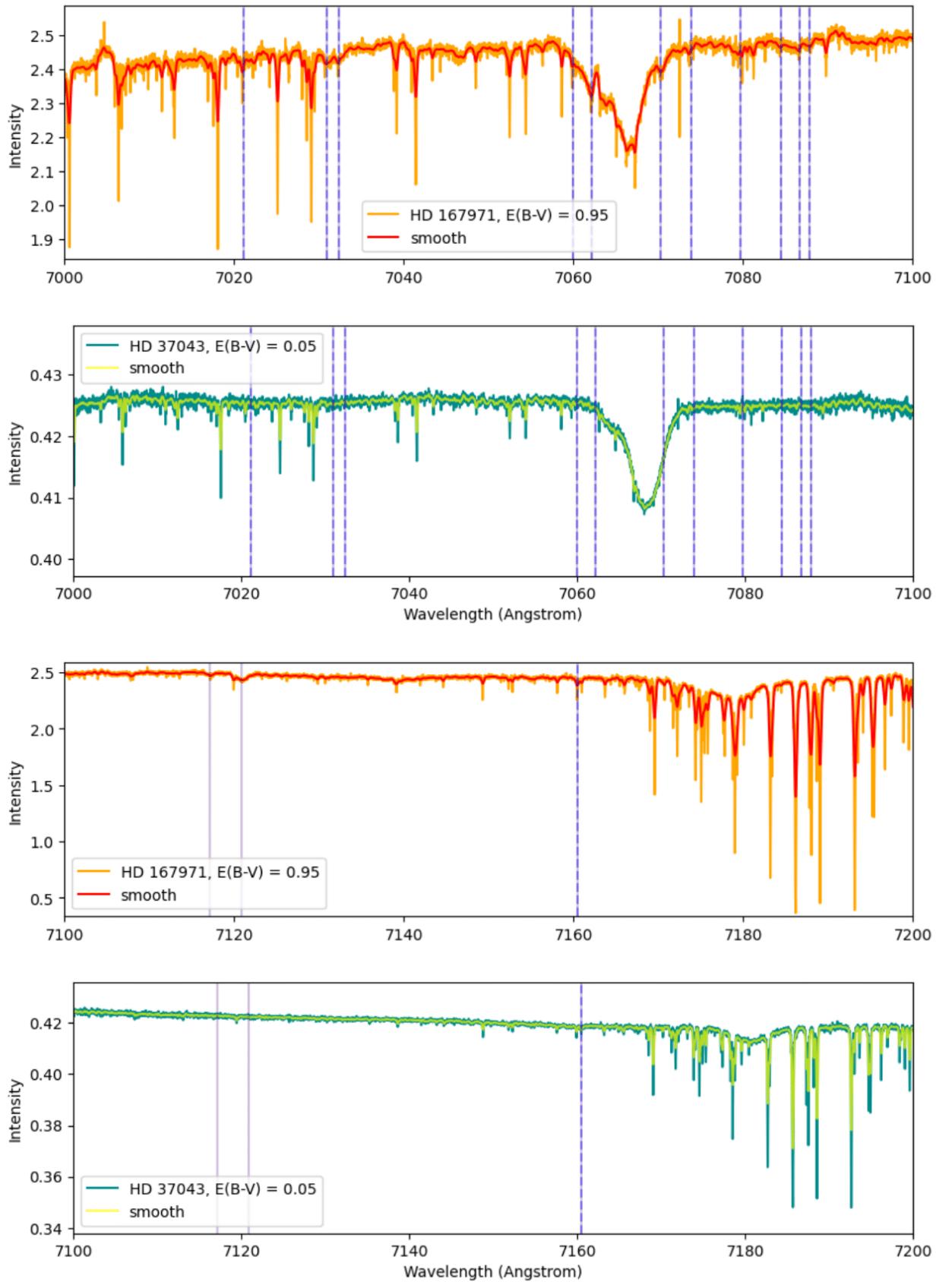


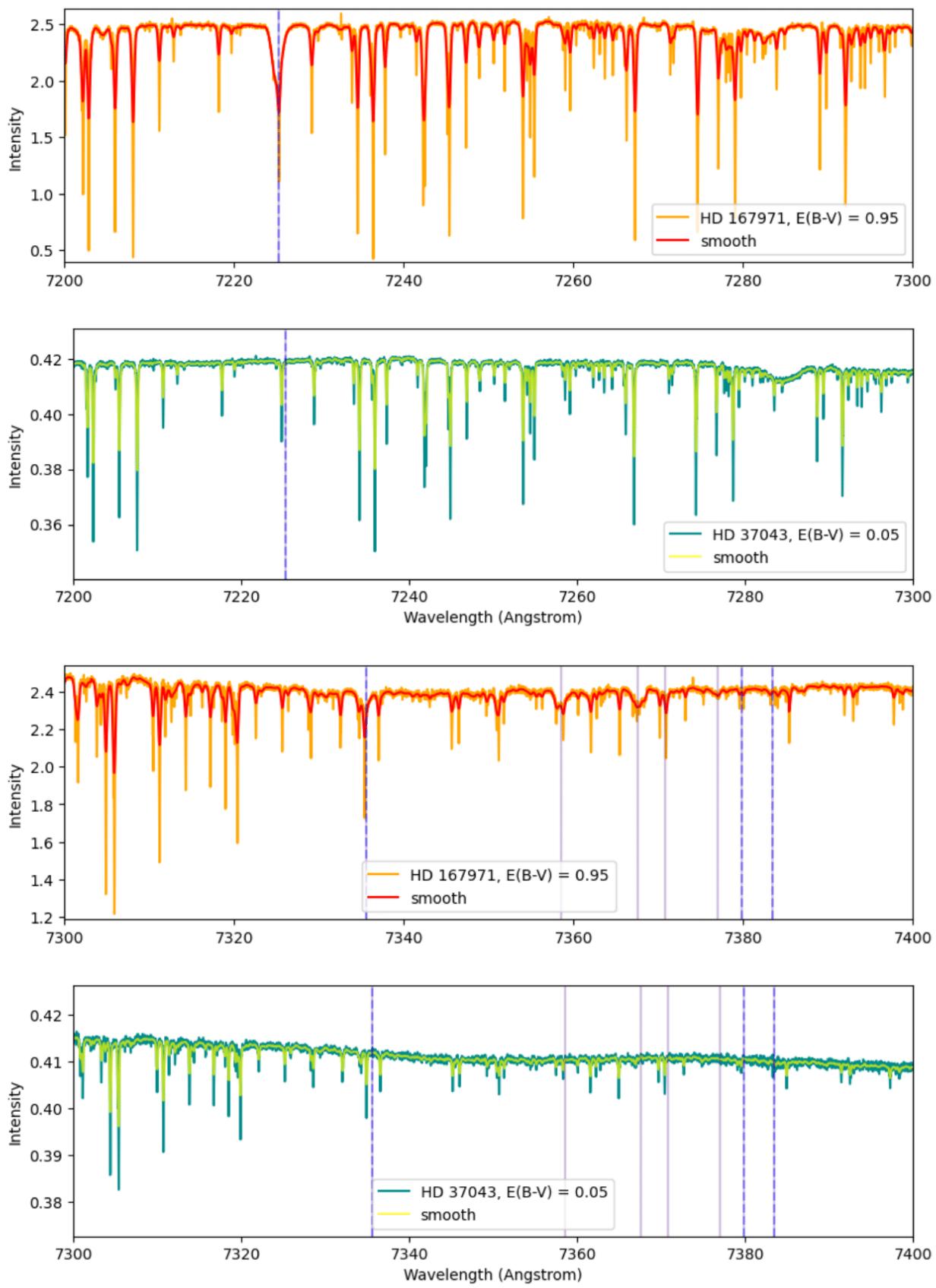


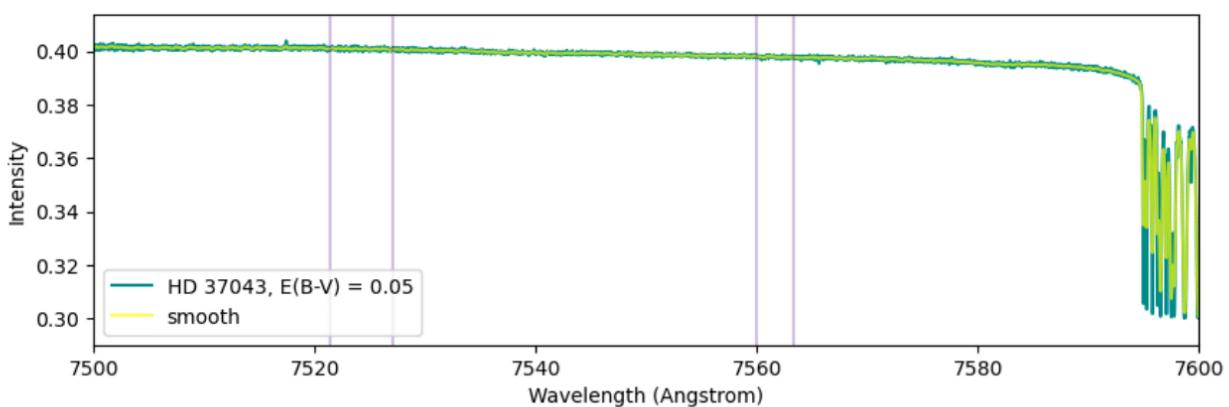
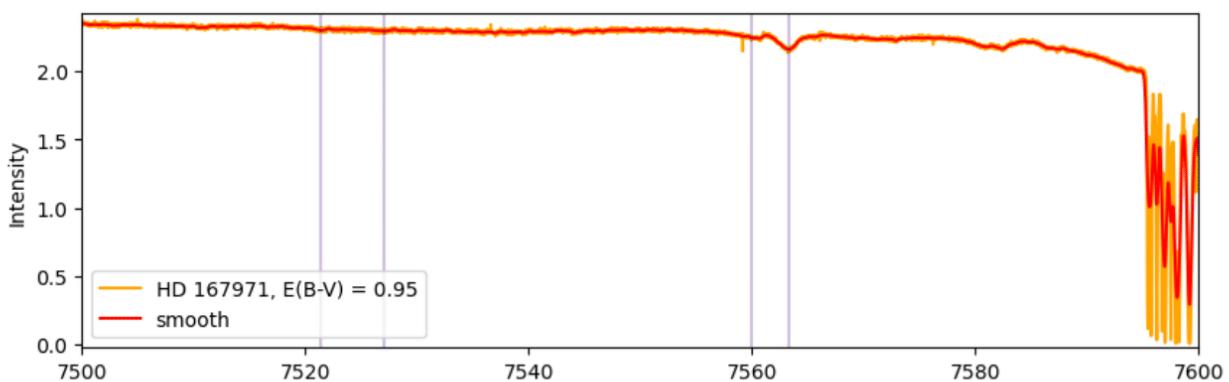
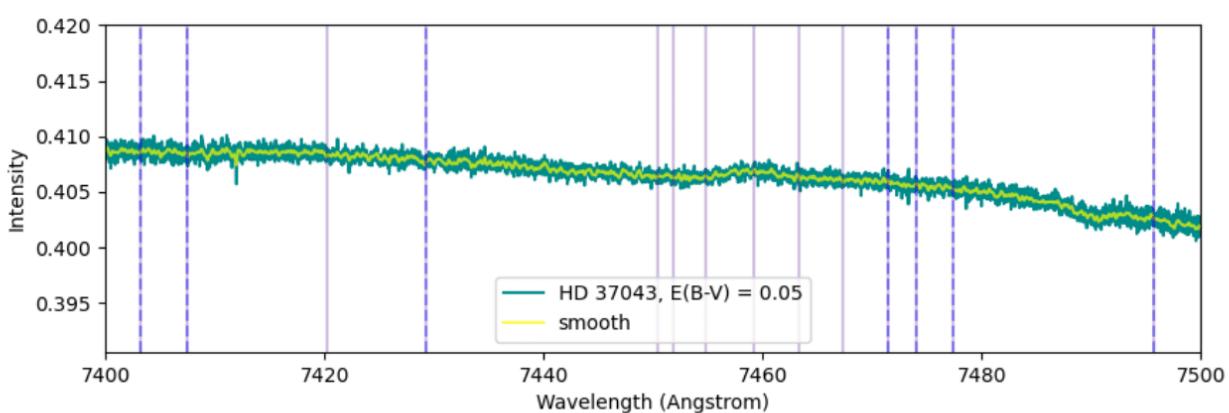
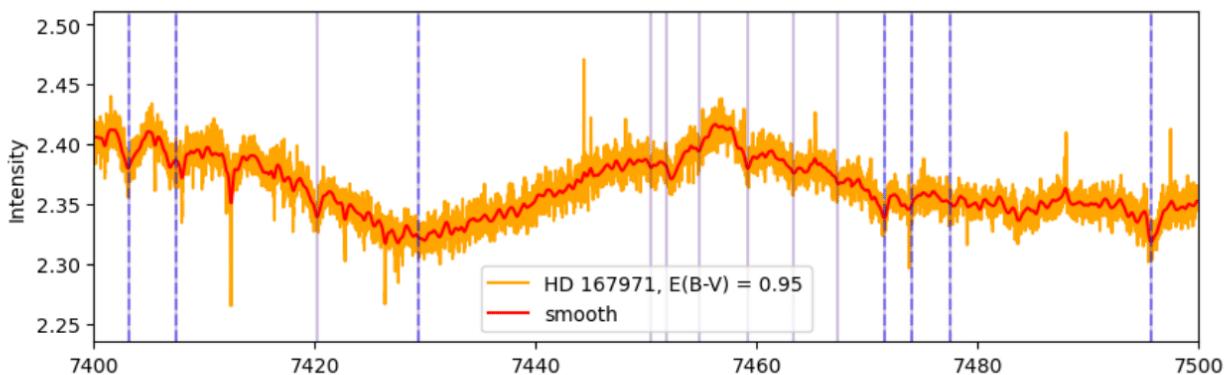


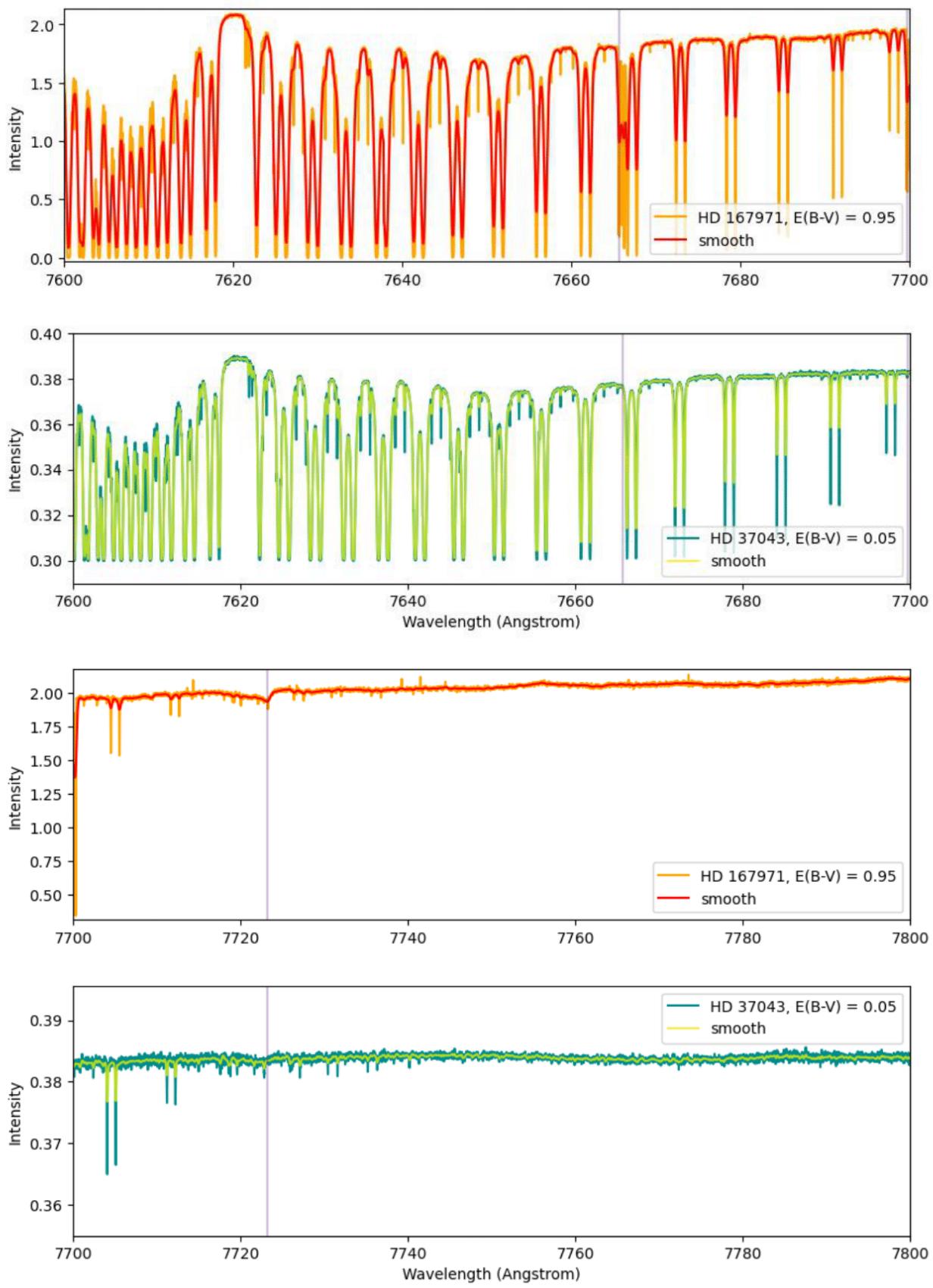












Gambar B.2: Spektrum DIB HD 186745

