

## Studi Kelimpahan *Planetary Nebulae*: NGC 2440 dan IC 2501

F. D. Rahayu<sup>1\*</sup> dan P. Mahasena<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Astronomi, FMIPA – ITB, Bandung, Indonesia

<sup>2</sup>KK Astronomi, FMIPA – ITB, Bandung, Indonesia

\*E-mail: fatha22@gmail.com

### ABSTRAK

Dalam pekerjaan ini, kelimpahan dua *Planetary Nebulae* (PN), NGC 2440 dan IC 2501 dihitung dengan menggunakan dua metode. Data yang digunakan adalah data pengamatan spektroskopi optik yang dilakukan oleh Sharpee et al. (2007) dengan menggunakan MIKE *Echelle Spectrograph* pada rentang panjang gelombang 3500 Å – 7500 Å. Metode penentuan kelimpahan secara empiris dilakukan dengan metode *Ionization Correction Factor* (ICF) yang dihitung dari intensitas garis emisi PN yang dapat diidentifikasi. Metode yang kedua adalah menggunakan model numerik fotoionisasi PN. Code yang digunakan untuk perhitungan model fotoionisasi adalah *Cloudy C08* (Ferland et al., 1998). Perhitungan dengan menggunakan model fotoionisasi diharapkan dapat memberikan hasil kelimpahan yang lebih akurat. Model fotoionisasi NGC 2440 dan IC 2501 dapat di-fit dengan data observasi dengan baik dan kelimpahan yang diperoleh dari model menunjukkan hasil yang lebih akurat dibandingkan dengan metode ICF.

**Kata Kunci:** *planetary nebulae* – kelimpahan kimia

### 1 PENDAHULUAN

*Planetary nebulae* (PN) NGC 2440 dan IC 2501 merupakan PN tipe II menurut klasifikasi tipe Peimbert. PN tipe II Peimbert adalah PN yang diduga berasal dari bintang progenitor dengan massa 1.2-2.4  $M_{\odot}$  (Peimbert, 1990) dan memiliki kelimpahan He dan N yang mirip dengan kelimpahan Matahari.

Studi kelimpahan kimia PN merupakan salah satu kontributor yang penting dalam studi evolusi kelimpahan kimia di galaksi. Untuk itu berbagai metode penentuan kelimpahan kimia terus berkembang sesuai dengan perolehan hasil observasi PN yang semakin baik. Data pengamatan NGC 2440 dan IC 2501 dari spektroskopi optik oleh Sharpee et al. (2007) digunakan untuk menentukan kelimpahan delapan elemen dasar PN, yaitu Helium (He), Karbon (C), Nitrogen (N), Oksigen (O), Ne (Neon), S (Sulfur), Chlorine (Cl), dan Argon (Ar). Terdapat dua metode penentuan kelimpahan yang digunakan dalam pekerjaan ini. Yang pertama adalah metode empiris yang dikenal dengan metode *Ionization Correction Factor* (ICF). Metode ini pada prinsipnya menggunakan suatu konstanta koreksi yang diperoleh dari elemen yang memiliki potensial ionisasi yang hampir sama dan dikembangkan pertama kali oleh Torres-Peimbert dan Peimbert (1977). Penentuan kelimpahan dengan metode ICF memiliki banyak keterbatasan. Selain tidak akuratnya nilai kelimpahan, metode ini juga tidak mampu memperkirakan nilai kelimpahan unsur-unsur yang lebih berat. Metode kedua adalah menggunakan model fotoionisasi PN untuk menentukan

kelimpahannya. Code yang digunakan dalam pembuatan model PN adalah *CLOUDY C.08* (Ferland et al., 1998). Data dasar untuk NGC 2440 dan IC 2501 diberikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data dasar untuk NGC 2440 dan IC 2501.

NGC 2440	IC 2501
$\alpha = 7^{\text{h}} 41^{\text{m}} 22^{\text{s}}$ (2000)	$\alpha = 9^{\text{h}} 38^{\text{m}} 47^{\text{s}}$ (2000)
$\delta = -18^{\circ} 12' 29''$ (2000)	$\delta = -60^{\circ} 05' 29''$ (2000)
Diameter $\approx 18.4''$	Diameter $\approx 2''$
$F(\text{H}\beta) \approx 3.16 \times 10^{-11}$ erg $\text{cm s}^{-1}$	$F(\text{H}\beta) \approx 2.14 \times 10^{-11}$ erg $\text{cm s}^{-1}$
Bintang pusat: $m_V \approx 17.63$	Bintang pusat: $m_V \approx 14.5$
$T_e \approx 222000$ K (model)	$T_e \approx 60000$ K (model)

### 2 PROPERTI NEBULA

Besaran fisis yang diperlukan untuk perhitungan kelimpahan PN secara empiris adalah temperatur elektron ( $T_e$ ) dan kerapatan elektron ( $N_e$ ).  $T_e$  dan  $N_e$  dihitung melalui perbandingan intensitas garis terlarang dari ion tertentu. Kedua nilai besaran tersebut dihitung dengan memecahkan secara numerik persamaan kesetimbangan untuk n-level atom dengan menggunakan code dari *STSDAS/IRAF* menggunakan sub rutin *temden*. Ion yang digunakan sebagai penentuan  $T_e$  dan  $N_e$  adalah ion yang berasal dari garis terlarang, yaitu [O I], [O II], [O III], [N II], [S II], dan [Ne III] untuk  $T_e$ . Sedangkan ion untuk penentuan  $N_e$  adalah ion [S II], [O II], [Cl III], dan [Ar IV]. Tabel 2 dan Tabel 3 menampilkan hasil  $T_e$  dan  $N_e$  untuk kedua PN.

Nilai dua besaran yang digunakan untuk penentuan kelimpahan adalah nilai rata-rata dari masing-masing besaran.

Tabel 2. Temperatur elektron.

NGC 2440		IC 2501	
Ion	$T_e$ (K)	Ion	$T_e$ (K)
[O I]	7959.4	[O I]	6906.5
[O II]	12337.3	[O II]	10464.1
[O III]	14819.4	[O III]	9541.3
[N II]	13243	[N II]	10989.1
[S II]	8232.5	[S II]	9694.1
[Ne III]	15441.2	[Ne III]	10828.7

Tabel 3. Kerapatan elektron.

NGC 2440		IC 2501	
Ion	$N_e$ (cm <sup>-3</sup> )	Ion	$N_e$ (cm <sup>-3</sup> )
[S II]	3152.13	[S II]	13006
[O II]	1657.81	[O II]	3513.86
[Cl III]	6483.44	[Cl III]	15276.7
[Ar IV]	6765.97	[Ar IV]	12909

### 3 KELIMPAHAN PN

Dalam pekerjaan ini, kelimpahan PN dihitung dengan dua metode. Selanjutnya hasil dari kedua metode tersebut dibandingkan untuk menguji keakuratannya.

#### 3.1 Metode Empiris

Penentuan kelimpahan total secara empiris dihitung dari penjumlahan nilai kelimpahan ion yang berasal dari garis terlarang atau garis rekombinasi yang dapat diidentifikasi. Dalam pekerjaan ini, elemen He dan C dihitung dari garis rekombinasi, sedangkan elemen yang lain menggunakan garis terlarang. Secara umum penentuan kelimpahan total masing-masing elemen dapat dituliskan dengan formula berikut,

$$\frac{N(X)}{N(H)} = \frac{N(X^0) + N(X^+) + N(X^{+2}) + \dots}{N(H^+)}. \quad (1)$$

Untuk mengakomodasi tidak teridentifikasinya ion di tingkat ionisasi tertentu maka diperlukan suatu konstanta koreksi untuk memperkirakan nilai kelimpahannya dengan kelimpahan ion yang bisa diamati dan memiliki potensial ionisasi yang hampir sama. Metode ini dikenal dengan metode ICF dan telah dibuktikan secara empiris oleh Torres-Peimbert dan Peimbert (1977) dan Barker (1978).

Nilai kelimpahan untuk ion dari garis terlarang (N, O, Ne, S, Ar, Cl) dihitung dengan menggunakan bantuan dari paket *STSDAS/IRAF* dengan menggunakan sub rutin ionic. Sedangkan ion He dan C dihitung dengan menggunakan rumusan penentuan kelimpahan dari garis rekombinasi yang ditunjukkan pada persamaan 2,

$$\frac{N(He^{+2/+})}{N(H^+)} = \frac{\alpha_{4,2}(H^0)}{\alpha_{nm}(He^{+1/0})} \frac{\lambda_{nm}}{\lambda 4861} \frac{I(\lambda)_{rec}}{I(H\beta)}, \quad (2)$$

di mana  $\alpha$  adalah koefisien rekombinasi yang nilainya diambil dari Osterbrock (1989) untuk asumsi kasus B. Hubungan yang serupa seperti persamaan 2 juga digunakan untuk mendapatkan kelimpahan C. Tabel 4 menunjukkan hasil kelimpahan total masing-masing elemen beserta nilai konstanta ICF yang digunakan dalam pekerjaan ini. Di mana kelimpahan total dinyatakan relatif terhadap kelimpahan Hidrogen.

Tabel 4. Kelimpahan total 8 elemen dengan metode ICF.

Elemen	NGC 2440		IC 2501	
	ICF	N(X)/N(H)	ICF	N(X)/N(H)
He	-	0.13	-	0.11
C	1.2	6.29 x 10 <sup>-4</sup>	1.3	1.34 x 10 <sup>-3</sup>
N	6.1	1.85 x 10 <sup>-3</sup>	4.6	2 x 10 <sup>-4</sup>
O	1.6	1.39 x 10 <sup>-3</sup>	1	1.12 x 10 <sup>-3</sup>
Ne	1.2	5.52 x 10 <sup>-4</sup>	1.3	1.73 x 10 <sup>-4</sup>
S	5.4	2.19 x 10 <sup>-5</sup>	4.6	1.87 x 10 <sup>-5</sup>
Ar	1	1.11 x 10 <sup>-5</sup>	2	6.04 x 10 <sup>-6</sup>
Cl	1	2.52 x 10 <sup>-7</sup>	1	1.38 x 10 <sup>-7</sup>

#### 3.2 Model Fotoionisasi

Model fotoionisasi NGC 2440 dan IC 2501 dibangun untuk memperoleh gambaran fisis PN dengan detail sehingga diharapkan kelimpahan yang dihasilkan akan lebih akurat. *Code* yang digunakan untuk pembuatan model adalah *CLOUDY C08*. Perangkat lunak ini dapat digunakan untuk mensintesis garis-garis spektral pada objek nebula gas dengan memecahkan persamaan transfer radiasi, kesetimbangan ionisasi, dan kesetimbangan energi secara simultan dan melalui proses iterasi.

PN adalah sebuah nebula gas yang memiliki dua komponen utama, yaitu bintang pusat dan nebula gas. Untuk merekonstruksinya diperlukan informasi dari dua komponen tersebut. Beberapa asumsi digunakan dalam pembuatan model fotoionisasi karena keterbatasan code yang digunakan.

Informasi yang diperlukan dari bintang pusat PN adalah distribusi energi spektral bintang (SED/ *Spectral Energy Distribution*). SED bintang pusat PN dapat dihitung dengan menggunakan model atmosfer. Dalam pekerjaan ini digunakan model atmosfer Rauch (1997 & 2003) yang merupakan model NLTE (*non-Local Thermodynamic Equilibrium*) untuk bintang dengan temperatur tinggi sehingga sesuai dengan bintang pusat yang dimodelkan. Temperatur bintang pusat yang digunakan sebagai masukan awal model adalah temperatur yang dihitung menggunakan metode Zanstra dengan menggunakan garis He ( $T_Z$  (He)). Geometri PN diasumsikan sebagai simetri bola dan radius paling luar nebula diperoleh dari diameter sudut yang diperoleh dari pengamatan Zhang (1995). Jarak kedua PN juga diadopsi dari kompilasi oleh Zhang (1995). Komposisi dan ukuran bulir debu dalam PN diasumsikan sesuai dengan ukuran dan distribusi bulir debu di materi antar bintang, dengan perbandingan  $M_{debu}/M_{gas} \sim 0.005$ . Kelimpahan awal yang digunakan untuk model adalah kelimpahan dari hasil perhitungan menggunakan metode ICF. Fraksi total volume yang dihuni oleh gas yang terionisasi atau dikenal dengan *filling factor* diasumsikan konstan untuk model PN yang ditinjau kali ini. Kerapatan Hidrogen ( $n_H$ ) juga diasumsikan homogen pada kedua PN. Detil parameter untuk NGC 2440 dan IC 2501 diberikan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Detil model NGC 2440.

Parameter	Nilai
<i>Bintang Pusat</i>	
Model Atm	Rauch (1997)
$T_{eff}$	205 000 K ( $T_Z$ (He))
Log $g$	8
Luminositas	2020 $L_{\odot}$
Radius ( $r_*$ )	9.39 (log cm)
<i>Nebula</i>	
Kerapatan H ( $n_H$ )	$6.8 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$
Ukuran PN	18.4" (diameter)
Jarak PN	1.57 kpc
$M_{debu}/M_{gas}$	0.005
<i>Filling factor</i>	1

Dalam pekerjaan ini kami menggunakan metode optimasi garis untuk melakukan *fitting* antara model dengan hasil observasi. Beberapa garis emisi dari hasil observasi yang dipilih sebagai *constraint* model adalah garis He II  $\lambda 4686$ , [O III]  $\lambda 5007$ , [N II]  $\lambda 6584$ , He I  $\lambda 5876$ , [Ne III]  $\lambda 3869$ , [S II]  $\lambda 6731$ , dan [Ar III]  $\lambda 7136$ . Tujuh fluks intensitas garis dari observasi dipilih karena

Tabel 6. Detil model IC 2501.

Parameter	Nilai
<i>Bintang Pusat</i>	
Model Atm	Rauch (2003)
$T_{eff}$	60 000 K ( $T_Z$ (He))
Log $g$	6
Luminositas	742 $L_{\odot}$
Radius ( $r_*$ )	10.24 (log cm)
<i>Nebula</i>	
Kerapatan H ( $n_H$ )	$5.2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$
Ukuran PN	2" (diameter)
Jarak PN	3.21 kpc
$M_{debu}/M_{gas}$	16 (log cm)
<i>Filling factor</i>	16.68 (log cm)

garis tersebut relatif kuat dengan *error* intensitas garis dari observasi  $\sim 0.06$ . *Fitting* model dengan observasi dilakukan dengan menggunakan metode optimasi *subspace-searching simplex* (subplex). Setelah mencapai 70 kali iterasi, model terbaik diperoleh untuk masing-masing PN. Model terbaik diberikan pada Tabel 7 di mana fluks intensitas garis hasil model dapat dibandingkan terhadap fluks intensitas garis hasil observasi. Semua intensitas garis dinyatakan relatif terhadap  $H\beta = 100$ .

Dari model PN yang terbaik, delapan kelimpahan PN diharapkan dapat lebih akurat nilainya. Agar mengetahui perbandingan nilai

Tabel 7 Fluks garis emisi hasil model.

Ion	$\lambda$ (Å)	NGC 2440		IC 2501	
		Obs.	Mod.	Obs.	Mod.
[OII]	3727	100	35.7	38	17.6
[NeIII]	3869	140	127	68	55.5
H $\delta$	4101	26	25.9	24	25.8
H $\gamma$	4340	46	46.9	45	46.7
[OIII]	4363	29	12.2	4.9	4.7
HeI	4471	4	3.3	5.6	7.2
HeII	4686	60	82.4	-	-
[ArIV]	4740	8.1	13.7	0.3	1.1
[OIII]	5007	1500	1496.9	880	1062.6
[NI]	5200	5.2	1.1	0.14	0.03
[CIII]	5518	0.63	0.34	0.32	0.09
[CIII]	5538	0.84	0.53	0.57	0.29
[NII]	5755	18	5.1	1.4	1.9
HeI	5876	12	9.7	17	21.7
[OI]	6300	22	4.7	4.6	5.9
[SIII]	6312	2.1	2.1	1.3	2.5
Ha	6563	300	285.9	300	285.7
[NII]	6584	550	493.6	60	51.9
HeI	6678	3.2	2.6	4.4	5.6
[SII]	6717	7.1	6.4	1.9	1.5
[SII]	6731	11	12	3.8	3.4
[ArIII]	7136	28	29.8	17	14

kelimpahan dari dua metode yang berbeda, pada Tabel 8 ditunjukkan hasil kelimpahan 8 elemen PN dari dua cara tersebut. Kelimpahan pada Tabel 8 dinyatakan dengan  $\epsilon \equiv 12 + \log N(X)/N(H)$ .

**Tabel 8.** Perbandingan nilai kelimpahan pada NGC 2440 dan IC 2501.

Elemen	NGC 2440		IC 2501	
	ICF	Model	ICF	Model
He	11.12	11.09	11.06	11.12
C	8.79	9.21	9.13	9.79
N	9.27	9.27	8.3	8.3
O	9.14	9.14	9.05	8.97
Ne	8.74	8.51	8.24	8.11
S	7.34	7.29	7.27	7.26
Ar	7.04	6.93	6.78	6.39
Cl	5.4	5.4	5.14	5.14

## 4 DISKUSI

### 4.1 Perbandingan Spektrum Model dengan Observasi

Model NGC 2440 dan IC 2501 berhasil di-fit dengan spektrum hasil observasi dengan kualitas yang relatif baik. Apabila dikuantisasi dengan rumusan pada persamaan 3, maka nilai  $rms^2$ -nya diberikan pada Tabel 7.

$$rms^2 = \frac{1}{N} \sum W_i \frac{(O_i - M_i)^2}{O_i^2}, \quad (3)$$

di mana  $N$  adalah jumlah garis yang dimasukkan dalam perhitungan,  $W_i$  merupakan pembobotan garis dengan nilai 1 apabila  $O_i/H\beta > 0.5$ , 0.5 jika  $0.1 < O_i/H\beta < 0.5$ , dan 0.25 bila  $0.01 < O_i/H\beta < 0.1$ .  $O_i$  adalah intensitas garis dari pengamatan dan  $M_i$  merupakan intensitas garis dari model. Akan tetapi dari Tabel 7 dapat dilihat pula beberapa intensitas garis model menyimpang jauh dari intensitas garis hasil pengamatan diantaranya adalah garis [N I]  $\lambda 5200$  dan [O I]  $\lambda 6300$ . Hal ini kemungkinan terjadi karena kompleksnya proses fisis di daerah dekat *ionization front*, sehingga *code* tidak bisa mewakilinya dengan baik. Pembahasan lebih detail diberikan oleh Bohigas (2008).

### 4.2 Perbandingan Kelimpahan Hasil Model dengan Penentuan secara Empiris

Kelimpahan NGC 2440 dan IC 2501 dengan dua metode dapat dibandingkan pada Tabel 8. Dari delapan elemen yang dihitung kelimpahannya terdapat beberapa elemen yang konstanta ICF-nya mampu mengoreksi kelimpahan dari ion yang tidak dapat diidentifikasi, yaitu N dan Cl. Sedangkan konstanta ICF untuk elemen yang lain masih perlu dikoreksi. Untuk menguji keakuratan dua metode tersebut, kami memakai kriteria Quireza *et al.* (2007) dalam pembagian kelas Peimbert PN. Dengan memakai kriteria tersebut, kelimpahan yang diperoleh dari model dapat memenuhi semua kriterianya sehingga NGC 2440 dapat dimasukkan dalam kelas IIa. Begitu pula dengan IC 2501 termasuk dalam kelas IIa dalam pembagian kelas Peimbert PN. Sedangkan kelimpahan dengan metode ICF tidak dapat memisahkan keduanya dengan tegas karena sebagian kelimpahan memenuhi kriteria kelas I dan sebagian lainnya kelas II.

Penggunaan model fotoionisasi selain dapat menentukan kelimpahan dengan akurat juga dapat menentukan kelimpahan elemen yang lebih berat yang tidak dapat dihitung dengan metode empiris.

Perbaikan kualitas model dapat dilakukan dengan menggunakan asumsi yang lebih tepat sesuai dengan objek yang ditinjau. Konstran yang lebih lengkap dari observasi merupakan faktor yang penting pula untuk menghasilkan model yang lebih baik.

## 5 PUSTAKA

- Bohigas, J., 2008, *AJ*, 674, 954-975  
 Ferland, G. J., 1998, *Hazy: A Brief Introduction to CLOUDY*, Lexington, Univ. Kentucky Dep. Physc. Astron Internal Rep.  
 Osterbrock, D. E. 1989, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and AGN*, California, Univ. Science Books  
 Peimbert, M., 1990, *RpPhy*, 53, 1559-1619  
 Peimbert, S. T. & Peimbert, M., 1977, *RMxAA*, 2, 181T  
 Quireza, C., et al., 2007, *A&A*, 475, 217-231  
 Rauch, T., 1997, *A&A*, 320, 237  
 Rauch, T., 2003, *A&A*, 403, 709  
 Sharpee, B., et al., 2007, *ApJ*, 659, 1265-1290  
 Zhang, C. Y., 1995, *ApJSS*, 98, 659Z