

Batasan Massa dan Radius Bintang Neutron pada Sistem SAX J1748.9-2021 Berdasarkan Metode *Touchdown Point*

M. Daud^{1*} dan K. Vierdayanti²

¹Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung, 40132, Indonesia

²Kelompok Keahlian Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung, 40132, Indonesia

*E-mail: muhammaddaud23@students.itb.ac.id

ABSTRAK

X-ray burst tipe-I (*burst*) merupakan fenomena ketidakstabilan termal yang terjadi di sekitar permukaan bintang neutron pada sistem *Low-Mass X-ray Binary* (LMXB). Pada kasus *burst* tertentu, fluks yang teramati mencapai nilai limit Eddington. Kasus tersebut dikenal sebagai *Photospheric Radius Expansion* (PRE *burst*) dan dapat dimanfaatkan untuk memberikan informasi properti intrinsik bintang neutron. Pada penelitian ini dilakukan penentuan batasan massa dan radius bintang neutron pada sistem LMXB SAX J1748.9-2021 yang terletak di gugus bola NGC 6440 menggunakan metode *touchdown point* dengan pendekatan Newtonian. Analisis *time-resolved spectroscopy* dilakukan terhadap sembilan data spektrum PRE *burst* yang diambil dari misi *Rossi X-ray Timing Explorer* (RXTE) dengan instrumen *Proportional Counter Array* (PCA) untuk mendapatkan parameter saat titik *touchdown*. Didapatkan batas nilai massa dan radius bintang neutron 0,60-1,88 massa Matahari dan 11,8-18,0 km berdasarkan data dan analisis yang dilakukan. Hasil tersebut memberikan batas massa yang relatif lebih kecil dan batas radius yang relatif lebih besar dibandingkan dengan penelitian sebelumnya melalui pendekatan relativistik dengan dua data PRE *burst*. Selain itu, didapatkan variasi nilai untuk setiap data PRE *burst* yang menunjukkan perbedaan keadaan sistem pada waktu yang berbeda sehingga pengukuran akan lebih baik dilakukan untuk jumlah data yang lebih banyak.

Kata Kunci: bintang neutron – *photospheric radius expansion* – *x-ray burst* tipe-I

1 PENDAHULUAN

X-ray burst tipe-I (*burst*) merupakan fenomena ketidakstabilan termal yang teramati pada sistem *Low-Mass X-ray Binary* (LMXB) dengan anggota sebuah bintang neutron dan sebuah bintang normal dengan massa $< 1 M_{\odot}$. Pada sistem tersebut terdapat mekanisme transfer materi dari bintang pasangan ke bintang neutron (Seward & Charles, 2010). Materi yang terakumulasi di permukaan bintang neutron membentuk lapisan tipis yang dapat mengalami perubahan keadaan temperatur dan densitas seiring waktu hingga memungkinkan terjadinya reaksi pembakaran nuklir. Pembakaran nuklir yang terjadi pada selubung yang relatif tipis dibandingkan ukuran bintang neutron tersebut berlangsung secara tidak stabil sehingga pembangkitan energi terjadi secara eksplosif yang dikenal sebagai *thermonuclear runaway* (lihat review Lewin, 1993).

Kurva cahaya *burst* memiliki peningkatan kecerlangan secara singkat, sedangkan peredupannya memiliki profil eksponensial (Galloway et al., 2008; Sharma et al. 2020). Berdasarkan pengamatan spektroskopi, *burst* memiliki profil benda hitam, walaupun ditemukan adanya deviasi (Worpel et al., 2013). Pada kasus *burst* tertentu, teramati nilai fluks yang mencapai

limit Eddington. Kasus tersebut dapat dideskripsikan melalui mekanisme *Photospheric Radius Expansion* (PRE). Mekanisme PRE melibatkan pengembangan fotosfer bintang neutron saat terjadi *burst*, kemudian kembali ke ukuran semula setelah terjadi *burst* dan diikuti dengan proses *cooling*. Peristiwa saat fotosfer kembali ke ukuran semula setelah terjadi *burst* disebut sebagai titik *touchdown*. Titik *touchdown* dapat diidentifikasi melalui parameter normalisasi benda hitam, K_{bb} , dan temperatur benda hitam, kT_{bb} , yang berada pada nilai ekstrem lokal (Galloway et al., 2008). Pada umumnya, fluks bolometrik saat titik *touchdown* diasumsikan bernilai sama dengan fluks Eddington sehingga dapat dimanfaatkan untuk menentukan batasan massa dan radius bintang neutron (Miller & Lamb, 2016; Li et al., 2017).

Identifikasi parameter K_{bb} dan kT_{bb} dilakukan melalui proses *spectral fitting* pada data spektrum PRE *burst*. Secara khusus, perlu dilakukan pengolahan *time-resolved spectroscopy* untuk mendapatkan parameter saat titik *touchdown*. *Time-resolved spectroscopy* dilakukan dengan membagi data spektrum suatu PRE *burst* menjadi beberapa segmen waktu sehingga diperoleh data spektrum sebanyak jumlah segmen yang dibuat. Setiap segmen spektrum kemudian dianalisis menggunakan metode *spectral fitting* sehingga didapat parameter K_{bb} dan kT_{bb} dari setiap segmen spektrum. Kedua

parameter tersebut kemudian divisualisasikan dalam dimensi waktu sehingga diperoleh informasi terkait titik *touchdown* (Miller & Lamb, 2016).

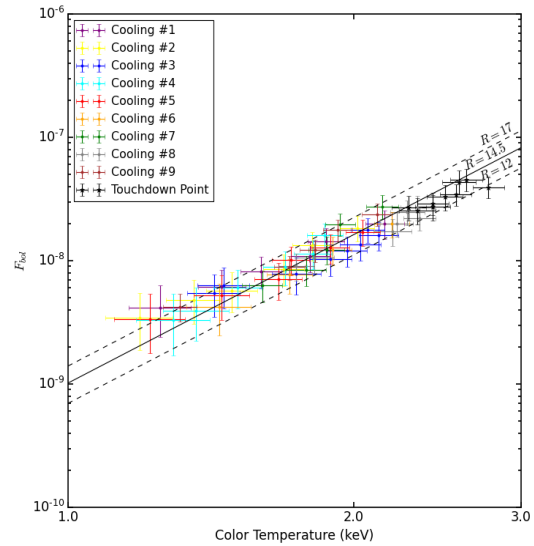
Pada penelitian ini, kami menentukan batasan massa dan radius bintang neutron pada sebuah sistem LMXB di gugus bola NGC 6440, yakni SAX J1748.9-2021. LMXB tersebut ditemukan pada tahun 1998 (in 't Zand et al., 1999) melalui misi BeppoSAX dan teridentifikasi sebagai salah satu sumber PRE *burst* (Galloway et al., 2020). Sistem tersebut terletak pada RA = 17^h48.9^m dan deklinasi *dec* = -20°21". Sistem SAX J1748.9-2021 juga memiliki karakteristik sebagai pulsar pada waktu tertentu. Objek dengan karakteristik tersebut dikenal sebagai *intermittent X-ray pulsar*. Identifikasi sistem ini telah dilakukan pada panjang gelombang sinar-X maupun optik (Cadelano et al., 2017). Nilai batas massa dan radius yang telah ditentukan dapat dimanfaatkan untuk memberikan syarat batas pada persamaan keadaan bintang neutron untuk memahami struktur dan partikel penyusun bintang neutron dengan lebih baik (Kim et al., 2021).

2 ASUMSI DAN PARAMETER PADA PERISTIWA PHOTOSPHERIC RADIUS EXPANSION

Asumsi yang umum digunakan pada penentuan batas nilai massa dan radius adalah nilai fluks saat titik *touchdown* bernilai sama dengan fluks Eddington. Selain itu, diasumsikan juga bahwa seluruh luas area permukaan bintang neutron terlibat dalam proses emisi PRE *burst*. Pada penelitian ini, kedua asumsi tersebut berlaku, efek rotasi bintang neutron diabaikan, dan pengukuran dilakukan dalam kerangka Newtonian. Pada penelitian ini juga dianggap bahwa radius fotosfer sama dengan radius permukaan bintang neutron $R_{ph} = R$. Jika foton pada atmosfer bintang neutron secara efektif mengalami hamburan elektron dan inti atom mengikuti elektron karena gaya elektrostatik, maka

Tabel 1. Data PRE *burst* yang diolah (Galloway et al., 2020).

No.	Obs-ID	Burst Start Time (MJD UT)
#1	60035-02-02-03	52190,46880
#2	60035-02-02-05	52192,26778
#3	60035-02-02-06	52193,32612
#4	60035-02-02-06	52193,40321
#5	60035-02-03-01	52195,32193
#6	94315-01-06-01	55218,95340
#7	94315-01-06-05	55221,80770
#8	94315-01-08-01	55233,50810
#9	94315-01-08-07	55238,17259



Gambar 1. Plot fluks bolometrik dan temperatur benda hitam pada daerah *cooling* dan titik *touchdown*.

bentuk fluks saat titik *touchdown* dapat dideskripsikan melalui persamaan (1)

$$F_{TD} = \frac{cGM}{\kappa d^2}, \quad (1)$$

dengan F_{TD} , c , G , M , κ , dan d berturut-turut menyatakan fluks bolometrik ketika *touchdown*, laju cahaya dalam vakum, konstanta gravitasi, massa bintang neutron, opasitas atmosfer, dan jarak bintang terhadap pengamat. Nilai opasitas atmosfer yang umum digunakan adalah $\kappa = 0.2(1 + X) \text{ cm}^{-2}$ (Li et al., 2017) dengan X adalah fraksi Hidrogen. Sementara itu, dari perbandingan antara fluks pada permukaan bintang neutron dengan fluks yang teramati, dapat ditentukan radius berdasarkan persamaan (2)

$$K_{bb} = \frac{1}{f_c^4} \frac{R^2}{d^2}, \quad (2)$$

dengan K_{bb} menyatakan normalisasi benda hitam, $f_c (= T_{bb}/T_{eff})$ adalah faktor koreksi warna, dan R menyatakan radius bintang neutron. Foton yang dihasilkan oleh fotosfer bintang neutron akan mengalami hamburan saat *burst* terjadi sehingga nilai temperatur yang teramati menjadi lebih besar dari temperatur efektif fotosfer. Faktor koreksi warna, f_c , digunakan untuk mengoreksi perbedaan temperatur tersebut.

Nilai parameter normalisasi benda hitam, K_{bb} , dan temperatur benda hitam, kT_{bb} , didapat melalui pengolahan *time-resolved spectroscopy*. Selanjutnya, nilai fluks bolometrik dapat ditentukan berdasarkan persamaan (3) (Galloway et al., 2008)

$$F_{bol} = 1,076 \times 10^{-11} \left(\frac{kT_{bb}}{1 \text{ keV}} \right) K_{bb} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}. \quad (3)$$

Perhatikan bahwa fluks bolometrik bergantung pada parameter K_{bb} dan kT_{bb} yang diperoleh dari *spectral fitting*.

3 DATA DAN ANALISIS

Data PRE *burst* diambil dari misi *Rossi X-Ray Timing Explorer* (RXTE) dan instrumen *Proportional Counter Array* (PCA). Data tersebut direduksi dan diolah menggunakan perangkat lunak Heasoft 6.28. Data PRE *burst* yang diolah dapat dilihat pada Tabel 1. *File Good Time Interval* (GTI) dibuat untuk mendapatkan interval data yang tidak terganggu oleh SAA berdasarkan kriteria objek *bright*. Data PRE *burst* yang diolah adalah data dengan mode *Event*.

Waktu awal pengolahan *burst* ditentukan berdasarkan parameter TSTART pada *file* dengan mode *Burst-Catcher*. Spektrum *burst* diekstrak menggunakan perintah **seextract** pada *file* mode *Event* dengan waktu eksposur kelipatan 0,25 detik yang bervariasi sedemikian sehingga didapatkan sekitar 1500-3000 *count* dalam kurun waktu eksposur tersebut. Spektrum yang diekstrak hanya berasal dari PCU 2 saja.

Spektrum *background* kemudian diekstrak dengan waktu eksposur 16 detik pada rentang waktu sebelum waktu awal *burst* dari *file Event*. Kriteria interval data yang digunakan sebagai spektrum *background* adalah sebagai berikut:

- 1 Memiliki jumlah *count* < 25% *count* puncak *burst*, F_{peak} ;
- 2 Memiliki jumlah *count* < $\mu \pm \sigma$, dengan σ adalah standar deviasi dari seluruh *count file* pengamatan yang bersesuaian setelah dikoreksi

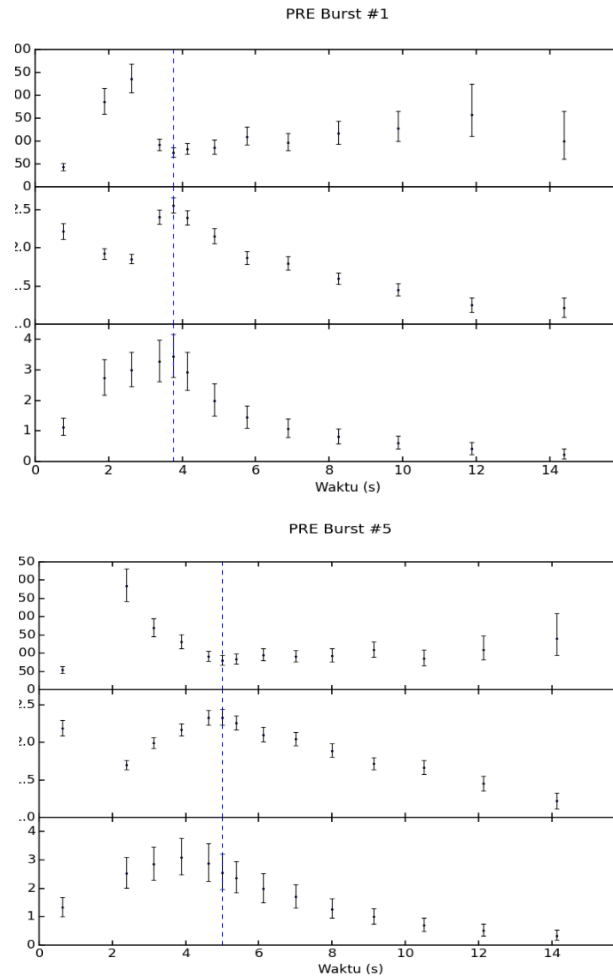
Tabel 2. Nilai parameter fotosfer bintang neutron pada titik *touchdown* dan daerah *cooling*.

No. <i>Burst</i>	F_{TD} ($10^{-8} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	kT_{TD} (keV)	$\bar{K}_{bb}$ ($\text{km } 10 \text{ kpc}^{-1}$) ²
#1	3,450	2,561	115,8
#2	3,296	2,493	119,9
#3	2,702	2,285	107,7
#4	2,726	2,420	89,80
#5	2,565	2,332	104,7
#6	2,915	2,423	85,44
#7	4,367	2,580	102,6
#8	4,558	2,628	80,83
#9	3,940	2,771	112,6

GTI.

Selanjutnya, *file* respon dibuat menggunakan perintah **pcarsp** dengan input sebuah *file* spektrum

yang diekstrak dari *file Event* pada interval PRE *burst*. Spektrum *background* dikurangi dari spektrum *burst* sehingga didapat spektrum dengan emisi yang hanya berasal dari *burst* saja. Proses reduksi tersebut umum dilakukan pada reduksi data *burst* (Worpel et al., 2013). Selanjutnya, *spectral fitting* dilakukan pada spektrum *burst* yang telah dikurangi *background* menggunakan model benda hitam terabsorpsi **tbabs×bbodyrad** pada rentang 3-22 keV menggunakan XSPEC. Nilai densitas kolom hidrogen netral n_H yang digunakan adalah $0,307 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (HI4PI Collaboration, 2016). Berdasarkan proses *spectral fitting* yang dilakukan pada spektrum *burst* yang telah dikurangi *background*, didapat parameter normalisasi, K_{bb} , dan temperatur benda hitam, kT_{bb} , pada titik *touchdown* dan daerah *cooling* yang disajikan pada Tabel 2 dengan nilai *chi-squared* tereduksi, χ_{red}^2 , berada pada rentang 0,399-1,771.



Gambar 2. PRE *burst* #1 (atas) dan PRE *burst* #5 (bawah).

Jika parameter kT_{bb} dan F_{bol} dari sembilan PRE *burst* pada daerah *cooling* diplot pada satu diagram, maka akan didapat *trend* yang cukup linier dalam skala logaritmik. Diagram tersebut dapat dilihat pada Gambar 1. Hal tersebut menunjukkan bahwa parameter radius fotosfer tidak berubah secara signifikan saat proses *cooling*. Data dapat didekati dengan model benda hitam tanpa koreksi *redshift*, yang menghasilkan rentang radius 12-17 km. Pada diagram tersebut juga disajikan data titik *touchdown* yang secara sistematis menempati daerah yang mendekati batas bawah radius yang diperoleh dari asumsi benda hitam.

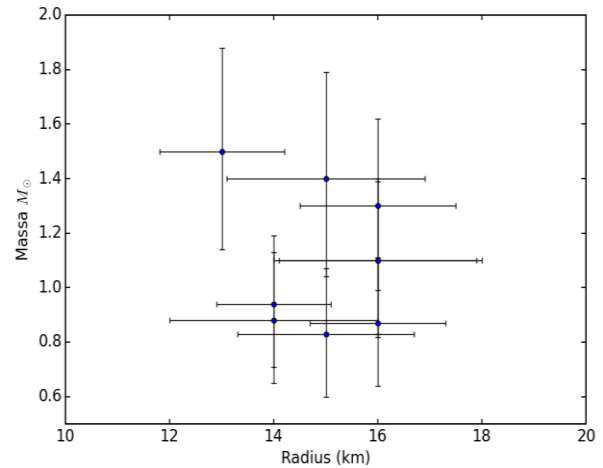
Pada Gambar 2 disajikan plot *time-resolved spectroscopy* dari parameter kT_{bb} , K_{bb} , dan F_{bol} dari *burst* #1 dan #5. Dari kedua diagram tersebut, dapat dilihat profil yang cukup seragam, yakni kenaikan K_{bb} yang bersesuaian dengan penurunan kT_{bb} , selanjutnya K_{bb} berkurang dan kT_{bb} meningkat hingga mencapai titik ekstrem lokalnya masing-masing bersesuaian dengan titik *touchdown*. Sementara itu, pada kurva cahaya fluks bolometrik didapat peningkatan yang cukup cepat dalam kurun waktu sekitar 5 detik, kemudian meredup secara perlahan dalam kurun waktu sekitar 10-15 detik. Garis biru menunjukkan letak titik *touchdown*. Nilai rerata luminositas Eddington dengan bobot seragam dari sembilan PRE *burst* adalah $L_{Edd} = (2,7 \pm 0,7) \times 10^{38} \text{ ergs s}^{-1}$.

Parameter $\bar{K}_{bb}$ didapat dari nilai rerata normalisasi benda hitam pada data dengan nilai F_{bol} pada rentang $0,1F_{TD}$ dan $0,7F_{TD}$. Nilai massa dan radius bintang neutron ditentukan melalui persamaan (1) dan (2). Hasilnya disajikan pada Gambar 3. Sementara itu, nilai faktor koreksi warna, f_c , yang digunakan adalah 1,35 dan fraksi hidrogen X yang digunakan adalah 0.

4 HASIL DAN KESIMPULAN

Batasan massa dan radius bintang neutron pada sistem SAX J1748.9-2021 telah diperoleh berdasarkan metode *touchdown point* dengan menggunakan data sembilan PRE *burst*. Nilai massa berada pada rentang $0,60\text{-}1,88 M_{\odot}$ dan nilai radius berada pada rentang $11,8\text{-}18,0 \text{ km}$. Nilai ini masih mencakup hasil dari Güver & Özel (2013) yang menggunakan dua data PRE *burst* dan pendekatan relativistik, namun dengan batas nilai radius yang lebih besar dan batas nilai massa yang lebih kecil.

Pada hasil yang didapatkan, terdapat perbedaan nilai massa dan radius yang cukup signifikan antara



Gambar 3. Nilai massa dan radius bintang neutron

satu *burst* dengan *burst* lainnya sehingga penentuan batasan massa dan radius akan lebih baik dengan data yang lebih banyak. Pengolahan *time-resolved spectroscopy* dengan lebih banyak segmen spektrum dengan jumlah *count* yang memadai untuk setiap segmen pada sebuah profil PRE *burst* akan memberikan akurasi yang lebih baik.

5 PUSTAKA

- Cadelano, M., et al. 2017, *The Astrophysical Journal* 844: 53
- Galloway, D. K., et al. 2008, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 179: 360-422
- Galloway, D. K., et al. 2020, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 249: 32
- Güver, T. & Özel, F. 2013, *The Astrophysical Journal Letters* 765: L1
- HI4PI Collaboration, N. Ben Bekhti, L. Floer, et al. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 594, A116, (HI4PI Map)
- in 't Zand, J. J. M., et al. 1999, *Astronomy & Astrophysics* 345: 100-108
- Kim, M., Kim, Y.-M., Sung, K. H., Lee, C.-H., & Kwak, K. 2021, *Astronomy & Astrophysics* 650, A139
- Lewin, G. H., van Paradijs, J., & Taam, R. E. 1993, *Space Science Reviews* 62: 223-389
- Li, Z., Falanga, M., Chen, L., Qu, J., & Xu, R. 2017, *The Astrophysical Journal* 845: 8
- Miller, M. C. & Lamb, F. K. 2016, *The European Physical Journal A* 52, 63
- Seward, F. D. & Charles, P. A. 2010, *Exploring the X-ray Universe 2nd ed.*, Cambridge University Press
- Sharma, R., Beri, A., Sanna, A., & Dutta A. 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 49: 4361-4368
- Worpel, H., Galloway, D. K., & Price, D. J. 2013, *The Astrophysical Journal* 772: 94