

BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Teori Relativitas Umum atau *general relativity* (GR) adalah teori fisika yang dikembangkan oleh Albert Einstein pada tahun 1915. Teori GR dijelaskan melalui persamaan medan Einstein yang diperoleh dari prinsip aksi Lagrangian Einstein-Hilbert. Persamaan ini menggambarkan bagaimana materi dan energi mempengaruhi perubahan geometri ruang-waktu serta menggambarkan bagaimana geometri ruang-waktu mempengaruhi pergerakan materi dan energi. GR telah digunakan dalam memahami perilaku alam semesta seperti pemodelan kosmologi (Peebles P. , 1993), peristiwa lubang hitam (Thorne, 1995), peristiwa bintang kompak (Glendenning, Compact stars: Nuclear physics, particle physics and general relativity, 2012) dan peristiwa gelombang gravitasi (Schilling, 2017). GR juga telah menghasilkan berbagai prediksi yang telah diuji dan dibuktikan dengan pengamatan eksperimental seperti pergeseran perihelion Merkurius (Turyshev, Shao, Nordtvedt, & Hellings, 2007), defleksi cahaya bintang saat gerhana matahari total (Dyson, Eddington, & Davidson), pengamatan gelombang gravitasi dari *Laser Interferometer Gravitational (LIGO)* (Abbott, et al., 2017) dan pengukuran *redshift* (pergeseran merah) gravitasi (Vessot, et al., 1980). Meskipun GR telah berhasil melewati sebagian besar pengujian pengamatan dan eksperimental, tetapi ada beberapa skenario dimana prediksi GR tidak konsisten dengan pengamatan atau dugaan eksperimen seperti paradoks informasi dan singularitas dalam lubang hitam (Mathur, 2009), rotasi galaksi (Tian & Hsia), energi gelap dan percepatan kosmik (Riess, et al., 1998; Perlmutter, et al., 1999).

Bukti pengamatan supernova tipe Ia dengan pergeseran merah tinggi, menyatakan bahwa ekspansi alam semesta sebenarnya dipercepat (Riess, et al., 1998; Perlmutter, et al., 1999). Salah satu upaya dalam menjelaskan percepatan ini adalah dengan memperkenalkan konsep energi gelap (Peebles, James, & Ratra, 2003). Energi gelap diwakili oleh konstanta kosmologi Λ pada teori kosmologi Λ -CDM (*Cosmological Constant - Cold Dark Matter*). Konstanta kosmologi

menghasilkan tekanan negatif yang mendorong alam semesta untuk mengalami percepatan ekspansi. Meskipun energi gelap dapat menjelaskan percepatan alam semesta, sumber pasti dari energi gelap masih belum dipahami. Oleh karena itu, peran dari teori gravitasi termodifikasi diharapkan mampu menghilangkan ketidakpastian dalam memahami sumber energi gelap. Beberapa teori gravitasi termodifikasi telah diajukan seperti : 1) Teori gravitasi Brane yang menganggap alam semesta adalah permukaan yang terperangkap dalam dimensi yang lebih tinggi yang disebut *bulk* (Randall, 2002). 2) Teori gravitasi skalar-tensor yang memasukkan medan skalar dan tensor kedalam persamaan medan gravitasi (Fujii & Maeda, 2003). 3) Teori gravitasi $F(R)$ yang mengubah Lagrangian Einstein-Hilbert menjadi fungsi matematika tertentu dari skalar Ricci (R) (Kerner, 1982). 4) Serta teori gravitasi Rastall yang mengusulkan ketidakkekalan energi dan momentum dalam lingkungan gravitasi yang kuat seperti pada gravitasi objek kompak (Rastall, 1972).

Di antara teori modifikasi, teori gravitasi Rastall telah menarik perhatian para peneliti selama beberapa dekade terakhir karena fitur-fiturnya yang menarik pada tingkat kosmologi maupun astrofisika. Rastall mengajukan teori gravitasi termodifikasi dengan energi dan momentum yang tidak kekal dimana divergensi tensor energi momentum ($T_{\mu\nu}$) tidak nol ($\nabla_\nu T^\nu_{;\mu} \neq 0$) atau $\nabla_\nu T^\nu_{;\mu} = \zeta T_{;\mu}$ dengan ζ adalah parameter Rastall. Teori Rastall dapat dikatakan sebagai bentuk umum dari teori GR dimana teori ini akan kembali menjadi bentuk GR ketika $\zeta = 0$. Baru-baru ini, Cruz menemukan bahwa teori Rastall dinilai kompatibel dengan pengamatan Dicke dimana konstanta kosmologi menunjukkan penurunan nilai seiring waktu (Cruz, Lepe, & Morales-Navarrete, 2019). Teori Rastall juga telah diinvestigasi di berbagai aspek ilmu, seperti pada lubang hitam (Heydarzade, Moradpour, & Darabi, 2017), kosmologi (Singh & Mishra, 2020) dan bintang kompak (Abbas & Shahzad, 2020).

Baru-baru ini, Hansraj dkk. mempelajari pengaruh parameter Rastall pada pemodelan bola fluida isotropik yang statis dan simetris bola. Mereka menganalisa kondisi energi dari solusi analitik profil tekanan dan densitas bintang (Hansraj, Banerjee, & Channuie, 2019). Mereka menyimpulkan kondisi energi tetap

terpenuhi untuk kasus Rastall dengan $\zeta = 0.25$. Disisi lain, Haris telah menganalisa kondisi energi dari bintang isotropik dalam kerangka gravitasi Rastall dan mendapatkan rentang parameter Rastall yaitu $0 \leq \zeta \leq 0.5$. Kondisi energi sendiri merupakan kriteria yang secara fisis dapat diterima oleh materi. Kriteria ini cukup kuat untuk mengesampingkan solusi non-fisis dari persamaan medan gravitasi. Ide bahwa energi mesti memiliki nilai yang positif dan bahwa gravitasi bersifat atraktif dijelaskan melalui kriteria ini. Pada penelitian ini dilakukan analisa kondisi energi pada bintang quark anisotropi dalam kerangka gravitasi Rastall. Analisa ini menghasilkan suatu rentang parameter Rastall yang digunakan sebagai acuan dalam pemilihan parameter Rastall.

Bintang quark adalah jenis bintang hipotesis yang terbentuk dari materi quark. Materi quark berasal dari partikel dasar yang disebut quark yang merupakan konstituen utama hadron (seperti proton dan neutron). Quark biasanya terkunci dalam partikel hadron karena interaksi kuat dari gaya nuklir. Namun dalam kondisi densitas tinggi seperti pada inti bintang neutron, ada kemungkinan tekanan dan suhu yang tinggi dapat membebaskan quark dari ikatan hadron dan membentuk materi quark (Haensel, Zdunik, & Schaefer, 1986). Meskipun statusnya sebagai bintang hipotesis, terdapat beberapa kandidat bintang quark seperti PSR J1416-2230, PSR J1903+327, 4U 1820-30, Cen X-3 dan EXO 1785-248 (Errehymy, Mustafa, Khedif, & Daoud, 2022). Xu Qiao berargumen bahwa aktifitas magnetosfer dari radio pulsar dapat dijadikan sebagai petunjuk keberadaan bintang quark (Ren-xin & Guo-jun, 1998). Selain itu, perbedaan hubungan massa-radius antara bintang neutron dengan bintang quark dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan bintang quark yang bermassa ringan (Li, Bombaci, Dey, Dey, & Van Den Heuvel, 1999).

Kompleksitas interaksi kuat pada quark khususnya dibidang superfluiditas dan superkonduktivitas menunjukkan bahwa materi quark mungkin bersifat anisotropik (Ruderman, 1972). Anisotropik merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan sifat atau kondisi ketidakseragaman suatu sistem atau bahan terhadap arah tertentu. Dalam konteks bintang quark anisotropik, anisotropik mengacu pada distribusi tekanan dalam bintang quark yang tidak merata dalam arah

radial dan tangensial. Beberapa model anisotropik telah diusulkan seperti model Horvat (Horvat, Ilijic, & Marunovic, 2010) dan model Bowers Liang (Bowers & Liang, 1974). Model Horvat didasarkan pada asumsi bahwa efek anisotropi bergantung secara linear pada tekanan radial dan efeknya akan hilang saat di permukaan bintang. Sedangkan model Bowers didasarkan pada asumsi bahwa efek anisotropi bergantung secara nonlinear pada tekanan radial dan efeknya akan hilang secara kuadrat dipusat bintang. Beberapa penelitian telah menjelaskan efek anisotropik pada besaran makroskopik pada objek kompak seperti massa, radius, momen inersia, deformabilitas tidal dan osilasi radial (Das, 2022). Deb mengklaim bahwa dengan meningkatnya anisotropi, bintang dengan medan magnet yang transversal menjadi lebih masif dibandingkan dengan bintang dengan medan magnet radial (Deb, Mukhopadhyay, & Weber, 2021). Selain itu, Andri mengamati bahwa tidak hanya model Bowers Liang, model Horvat juga konsisten dengan beberapa data pengamatan terbaru (Rahmansyah & Sulaksono, 2021). Pada penelitian ini, model Horvat digunakan sebagai faktor anisotropi karena model ini didasarkan pada pendekatan fenomenologis dimana efek anisotropi akan hilang dalam limit non-relativistik (Horvat, Ilijic, & Marunovic, 2010).

Persamaan keadaan bintang quark merupakan persamaan matematis yang menghubungkan tekanan, kerapatan dan sifat fisik lainnya dari bintang quark. Ini adalah persamaan yang mencoba menggambarkan bagaimana quark berperilaku di dalam bintang quark yang sangat padat. Kompleksitas dan ketidakpastian dalam memahami sifat internal bintang quark, mengakibatkan persamaan keadaan bintang dapat memiliki bentuk yang bervariasi tergantung pada pendekatan teoritis yang digunakan. Beberapa model persamaan keadaan telah didiskusikan seperti ; 1) model *Dense Quantum Chromodynamics* (QCD), yang mana materi quark terdegenerasi dalam teori perturbasi *hard dense loop* (HDL) (Andersen & Strickland, 2002). 2) Model MIT Bag, yang mana partikel quark digambarkan terkurung dalam suatu wilayah tertentu yang disebut kantong (*Bag*) (Chodos, Jafee, Johnson, Thorn, & Weisskopf, 1974). 3) Serta model CFL yang mana partikel quark digambarkan terkurung dalam kantong serta membentuk pasangan antara quark *up* (u), quark *down* (d) dan quark *strange* (s) dan menghasilkan interaksi yang terbatas

diantara mereka (Alford, Rajagopal, & Wilczek, Color-flavor locking and chiral symmetry breaking in high density QCD, 1999). Dalam penelitian ini, digunakan model MIT Bag dan CFL sebagai model persamaan keadaan karena model ini dinilai telah cukup menggambarkan interaksi dasar yang dimiliki oleh materi quark (Glendenning, Compact stars: Nuclear physics, particle physics and general relativity, 2012).

Studi osilasi radial pada bintang memberikan berbagai informasi mengenai struktur internal, evolusi, dan stabilitas bintang (Aerts, 2021). Osilasi radial merupakan jenis osilasi yang terjadi di dalam bintang ketika permukaan bintang mengalami perubahan dalam jarak terhadap pusat bintang secara periodik. Osilasi radial pada bintang biasanya terjadi sebagai hasil dari fluktuasi tekanan dan suhu dalam bintang. Osilasi radial memiliki kaitan erat dengan stabilitas. Studi stabilitas pada bintang quark isotropik dalam kerangka gravitasi Rastall terhadap osilasi radial telah dipelajari oleh Haris (Maulana & Sulaksono, 2019). Haris menyimpulkan bahwa bintang quark isotropik cenderung lebih stabil terhadap osilasi radial jika divergensi tensor energi momentum bernilai lebih kecil atau sama dengan nol ($\nabla_{\nu} T^{\nu}_{;\mu} \leq 0$). Pretel juga telah mempelajari stabilitas objek kompak dalam gravitasi Rastall terhadap osilasi radial dan menyimpulkan bahwa terdapat pergeseran stabilitas dalam pengaruh gravitasi Rastall (Zarate Pretel & Mota, 2023). Penelitian ini mempelajari stabilitas bintang quark anisotropik terhadap osilasi radial dalam kerangka gravitasi Rastall.

Terdapat penyimpangan yang besar antara data pengamatan dan data perhitungan dari massa-radius bintang (Yagi & Yunes, I-Love-Q: Unexpected universal relations for neutron stars and quark stars, 2013). Cara mengatasinya adalah dengan mencari besaran atau hubungan universal antar besaran yang secara sensitif tidak bergantung pada materi bintang. Pencarian hubungan universal ini bukanlah hal yang baru pada fisika nuklir dan gravitasi. Salah satunya adalah Kent Yagi (Yagi & Yunes, I-Love-Q relations in neutron stars and their applications to astrophysics, gravitational waves, and fundamental physics, 2013; Yagi & Yunes, I-Love-Q: Unexpected universal relations for neutron stars and quark stars, 2013) yang menemukan hubungan antara momen inersia \bar{I} , momen quadrupol \bar{Q} dan

deformabilitas tidal (bilangan Love) $\bar{\Lambda}$ yang dikenal sebagai hubungan universal I-Love-Q. Keuntungan dari adanya hubungan I-Love-Q adalah jika kita dapat mengukur dua dari tiga besaran ini maka kita dapat mengetahui besaran ketiga meskipun secara observasi tidak dapat diamati. Selain itu, relasi antara \bar{I} dan \bar{Q} dapat digunakan untuk mengeliminasi degenerasi antara momen inersia dan momen quadrupol pada profil pulsa sinar-X dari bintang panas dalam permukaan objek kompak (Psaltis, Özel, & Chakrabarty, 2014; Bauböck, Berti, Psaltis, & Özel, 2013). Contoh lain adalah hubungan antara \bar{I} dan $\bar{\Lambda}$ digunakan untuk menguji teori gravitasi dengan pengamatan gelombang gravitasi (GW) (Yagi & Yunes, I-Love-Q relations in neutron stars and their applications to astrophysics, gravitational waves, and fundamental physics, 2013; Yagi & Yunes, I-Love-Q: Unexpected universal relations for neutron stars and quark stars, 2013). Pada penelitian ini dibahas hubungan universal I-Love-Q pada bintang quark anisotropi dalam kerangka gravitasi Rastall.

I.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Membatasi rentang parameter Rastall yang diperbolehkan melalui analisa kondisi energi bintang quark anisotropik.
2. Menganalisa bagaimana stabilitas bintang quark anisotropik terhadap osilasi radial dalam kerangka kerja gravitasi Rastall.
3. Mengetahui bagaimana hubungan universal *I-Love-Q* pada bintang quark anisotropi dalam kerangka kerja gravitasi Rastall.

I.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berupa menambah wawasan kepada penulis dan menyumbangkan pemikiran tentang bagaimana gravitasi Rastall mempengaruhi kestabilan dan relasi universal bintang quark anisotropi.

I.4 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengasumsikan bintang quark memiliki materi yang anisotropik dengan menggunakan model Horvat sebagai faktor anisotropik.
2. Menggunakan model MIT Bag dan CFL untuk menjelaskan persamaan keadaan bintang quark.
3. Menggunakan gravitasi Rastall sebagai gravitasi modifikasi dari relativitas umum.

