

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam studi astronomi dan astrofisika dikenal terdapat beberapa jendela untuk melihat alam semesta, di antaranya yang paling lazim ialah gelombang elektromagnetik (Armus dkk., 2021) dengan berbagai interval frekuensinya seperti cahaya tampak, radio, sinar gamma, dan sinar-X yang dapat mendeteksi berbagai macam objek dan fenomena astrofisis seperti evolusi bintang, keberadaan sistem keplanetan luar tata surya, supernova, pulsar, bahkan *cosmic microwave background* (CMB) yang merupakan relik peninggalan peristiwa *big bang* (Middleton dkk., 2017). Walaupun demikian, gelombang elektromagnetik sangat bergantung pada partikel bermuatan (misalnya elektron) sedangkan sebagian alam semesta bahkan tidak diisi oleh materi bermuatan (Sathyaprakash & Schutz, 2009). Sehingga untuk dapat melihat alam semesta secara lebih jauh dan komprehensif dibutuhkan jendela lain yang tidak bergantung pada partikel bermuatan seperti gelombang gravitasi, di mana fenomena-fenomena eksotis dan katastrofe merupakan sumber utama gelombang ini, sehingga gelombang gravitasi memberikan ruang baru yang lebih luas dalam memetakan alam semesta (Cutler & Thorne, 2013).

Berbicara tentang gelombang gravitasi tentunya mengacu pada konsep gravitasi dalam konteks relativitas umum, di mana gravitasi tidak dipandang sebagai suatu medan gaya tarik-menarik antara dua benda, namun merupakan suatu gejala dari melengkungnya ruang-waktu di sekitar objek bermassa. Ketika objek tersebut bergerak secara periodik, maka kelengkungan yang ditimbulkannya juga akan berubah secara periodik sehingga akan menimbulkan gangguan dalam ruang-waktu yang merambat ke segala arah dengan kecepatan cahaya. Gangguan yang merambat merupakan definisi dari fenomena fisis yang disebut dengan gelombang. Maka dari itu, gangguan dalam ruang-waktu berupa perubahan kelengkungan secara periodik ini sering disebut sebagai gelombang gravitasi.

Gelombang gravitasi dapat dihasilkan dari suatu peristiwa astrofisis yang melibatkan sistem dua objek mampat seperti lubang hitam ganda, bintang neutron

ganda, maupun sistem lubang hitam-bintang neutron yang bergerak secara spiral saling mendekat hingga keduanya saling bertumbukan (Thorne, 2018). Dalam peristiwa tumbukan ini energi yang sangat besar dipancarkan dalam bentuk gelombang gravitasi dengan orde $\sim 10^{47}$ J (Clark dkk., 1979). Beberapa orang meragukan apakah peristiwa katastrofe ini dapat terjadi, namun pada tanggal 14 September 2015 sebuah sumber sinyal gelombang gravitasi yang diberi nama GW150914 untuk pertama kalinya dapat terdeteksi pada rentang frekuensi 35Hz – 250Hz (Abbott dkk., 2016a). Mereka menemukan bahwa sinyal ini dihasilkan dalam peristiwa tumbukan sistem lubang hitam ganda yang terletak pada jarak sekitar 410Mpc dengan massa komponen masing-masing sekitar $36M_{\odot}$ dan $29M_{\odot}$ dan massa akhir sekitar $62M_{\odot}$ yang memancarkan energi setara dengan $3M_{\odot}$, atau dengan prinsip kesetaraan massa-energi sekitar $5,36 \times 10^{47}$ J. Namun demikian, dikarenakan jarak yang terlampaui jauh antara bumi dengan sistem tersebut yakni dalam orde ratusan Megaparsek (Mpc), energi yang dapat terdeteksi ketika sampai ke bumi terlalu kecil, sehingga dalam studi gelombang gravitasi ini dibutuhkan suatu instrumen astronomi dengan sensitivitas yang sangat tinggi.

Hingga saat ini instrumen astronomi yang cukup sensitif untuk mendeteksi gelombang gravitasi di antaranya adalah LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) (Sigg, 2008), dengan dua interferometernya yang berada di negara bagian Washington dan Louisiana, Amerika Serikat yang dibangun sebagai hasil kerja sama dari NSF (*National Science Foundation*), Caltech (*The California Institute of Technology*) dan MIT (*The Massachusetts Institute of Technology*). Data yang didapatkan oleh interferometer ini biasanya akan diproses dengan metode yang disebut dengan *matched filtering* (Samuel Finn & Chernoff, 1993), di mana data tersebut akan dilakukan penyaringan (*filtering*) dari gangguan-gangguan (*noises*) untuk kemudian diekstrak sebagian data yang mengandung sinyal gelombang gravitasi, sehingga dapat diperoleh informasi-informasi mendasar terkait dengan gelombang gravitasi tersebut seperti waktu terjadinya tumbukan, massa primer dan sekunder, hingga jarak antara bumi dan sistem tersebut. Namun demikian, dalam perkembangan studi gelombang gravitasi ini metode *matched filtering* dalam penggunaannya memiliki beberapa kelemahan

karena metode ini tidak sensitif terhadap gangguan yang bersifat non-stasioner dan non-Gaussian (Allen, 2005). Dalam hal ini, gangguan non-stasioner merupakan tipe gangguan dengan parameter statistik (seperti rata-rata, variansi, dsb) yang berubah terhadap waktu dan biasanya disebabkan oleh beberapa faktor eksternal seperti aktivitas seismik, ataupun getaran mekanik pada instrumen (Galleani & Cohen, 2006). Di samping itu, gangguan non-Gaussian merupakan gangguan dengan parameter statistik yang tidak memenuhi distribusi normal (Gaussian) (Morisaki dkk., 2016). Sementara itu, metode standar yang digunakan untuk memperoleh informasi-informasi mendasar terkait parameter fisis sistem lubang hitam ganda sebagai sumber gelombang gravitasi adalah inferensi Bayesian dengan teknik sampling MCMC (*Markov Chain Monte Carlo*) atau *Nested Sampling*. Meskipun sebagai metode standar, metode ini membutuhkan sumber daya komputasi yang sangat besar, di mana implementasi metode ini membutuhkan waktu komputasi hingga berjam-jam bahkan berhari-hari hanya untuk satu sinyal gelombang gravitasi dan waktu komputasi tersebut meningkat untuk durasi sinyal yang lebih panjang (Hu & Veitch, 2025).

Oleh karena itu, beberapa peneliti mencoba untuk menggunakan pendekatan yang berbeda, di antaranya dengan menerapkan konsep *machine learning*. Misalnya, (Gabbard dkk., 2018) melakukan prediksi keberadaan sinyal menggunakan *machine learning* berbasis, di mana hasil prediksinya sangat bersesuaian jika dilakukan dengan metode *matched filtering*. Selain itu, (George & Huerta, 2016) menunjukkan bahwa *machine learning* berbasis *convolutional neural network* (dikenal sebagai CNN) yang mereka bangun juga mampu memberikan prediksi keberadaan sinyal gelombang gravitasi dalam data simulasi terganggu (*noisy*), serta mampu mengestimasi massa masing-masing komponen sistem lubang hitam ganda sebagai sumber sinyalnya. Di samping itu, (Chua & Vallisneri, 2020) menerapkan *machine learning* untuk memperoleh distribusi *posterior* yang memberikan estimasi nilai parameter-parameter fisis dari sumber gelombang gravitasi. Dan dengan tujuan yang sama (Green dkk., 2020) menerapkan *machine learning* dengan model *Autoregressive Normalizing Flows* dalam menentukan nilai parameter-parameter fisis tersebut. Kemudian, dalam upaya menghilangkan gangguan-gangguan dalam data (Bacon dkk., 2023) mengembangkan model

machine learning dengan algoritma *convolutional autoencoder*. Selain itu, (Schmidt dkk., 2021) memanfaatkan *machine learning* yang bertujuan untuk membangkitkan sinyal gelombang gravitasi buatan yang serupa dengan model simulasi numerik. Sementara itu, berbeda dengan penelitian-penelitian lain yang berfokus pada sinyal gelombang gravitasi (Powell dkk., 2015) memanfaatkan *machine learning* ini untuk mengelompokkan jenis-jenis gangguan berupa *glitch* yang disebut dengan *transient noise*, di mana gangguan ini sering kali dapat teridentifikasi melalui spektrogram.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini berupaya untuk mengembangkan suatu model *machine learning* dengan algoritma *convolutional neural network* yang dapat digunakan untuk mengestimasi parameter sistem lubang hitam ganda sebagai salah satu sumber sinyal gelombang gravitasi berdasarkan data hasil simulasi numerik dan data yang telah dikoleksi oleh LIGO. Adapun parameter-parameter yang akan diestimasi di antaranya ialah massa primer dan massa sekunder sistem lubang hitam ganda, serta jarak sistem tersebut terhadap bumi. Diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam bidang astrofisika terutama dalam hal ilmu gelombang gravitasi.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas diperoleh rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana memperoleh data latih yang tepat bagi CNN untuk mengestimasi parameter fisis lubang hitam ganda berdasarkan gelombang gravitasi ?
2. Bagaimana arsitektur CNN yang tepat dalam mengestimasi parameter sistem lubang hitam ganda ?
3. Bagaimana hasil estimasi parameter sistem lubang hitam ganda menggunakan CNN yang telah dikembangkan?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disampaikan di atas, tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh karakteristik data latih yang tepat bagi CNN untuk mengestimasi parameter fisis lubang hitam ganda berdasarkan gelombang gravitasi.
2. Untuk memperoleh arsitektur CNN yang tepat dalam mengestimasi parameter sistem lubang hitam berdasarkan gelombang gravitasi.
3. Untuk mengetahui hasil estimasi parameter sistem lubang hitam ganda menggunakan CNN.

1.4. Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disampaikan di atas, batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Parameter fisis lubang hitam ganda yang diestimasi dalam penelitian ini berupa massa primer dan sekunder sistem lubang hitam ganda serta jarak sistem tersebut terhadap bumi.
2. Interval massa masing-masing komponen dari sistem lubang hitam ganda yang akan diestimasi dalam rentang $5M_{\odot}$ hingga $45M_{\odot}$
3. Interval jarak sistem lubang hitam ganda terhadap bumi dalam rentang 600 hingga 1945Mpc.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan manfaat berupa:

1. Dapat mengetahui karakteristik data latih yang tepat bagi CNN untuk mengestimasi parameter fisis sistem lubang hitam ganda.
2. Dapat mengetahui efektivitas CNN dalam mengestimasi parameter sistem lubang hitam ganda berdasarkan gelombang gravitasi.
3. Dapat berkontribusi dalam memverifikasi hasil estimasi parameter sistem lubang hitam ganda oleh penelitian sebelumnya.
4. Dapat berkontribusi dalam implementasi CNN terhadap bidang astrofisika terutama ilmu gelombang gravitasi.