



## Implementasi Algoritma Minimum Spanning Tree dalam Investigasi Segregasi Massa Gugus Bintang Berusia Muda

Rendy Darma<sup>1\*</sup>, Rizky Maulana Nurhidayat<sup>1</sup>, Wulandari<sup>1</sup>, dan Hendra Agus Prasetyo<sup>1</sup>

Institut Teknologi Bandung, Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Bandung, Indonesia 40132  
darmarendy@gmail.com

### ABSTRAK

Beberapa pengamatan memberikan petunjuk awal bahwa gugus bintang muda mengalami segregasi massa. Perdebatan mengenai apakah segregasi massa pada gugus bintang muda terjadi *primordial* atau *dynamical*, masih terus berlangsung hingga saat ini. Karena sulitnya mengamati gugus muda yang masih tertutup oleh awan gas, banyak studi yang berusaha mempelajari segregasi massa pada awal pembentukan gugus bintang secara numerik. Dalam penelitian ini, kami melakukan analisis segregasi massa gugus bintang muda, yaitu M 42, NGC 2244, NGC 2264, NGC 6611, dan Trumpler 14 dengan menerapkan algoritma *Minimum Spanning Tree* dan menggunakan data pengamatan terbaru. Hasil kami menunjukkan bahwa segregasi massa pada gugus bintang muda dapat berupa *primordial* atau *dynamical*, bergantung pada struktur awal dan kondisi dinamik gugus tersebut pada awal pembentukannya. Segregasi massa terbalik juga dapat terjadi pada gugus bintang sebagai konsekuensi dari proses dinamik yang dialami bintang-bintang dalam gugus untuk mencapai tahap relaksasinya.

**Kata Kunci:** Gugus Bintang Muda, *Minimum Spanning Tree*, Segregasi Massa.

### 1. Pendahuluan

Bintang-bintang yang terbentuk dari awan molekul hampir seluruhnya terikat secara gravitasi dalam sebuah gugus (Allison dkk. 2009a dan Lada & Lada 2003). Pada beberapa gugus bintang, teramati adanya segregasi massa terutama pada gugus bintang berusia muda yang menunjukkan bintang-bintang masif cenderung lebih terkonsentrasi di pusat gugus dibandingkan bintang-bintang yang massanya lebih rendah. Informasi segregasi massa memberikan petunjuk mengenai proses pembentukan dan evolusi dinamik gugus bintang (Allison dkk. 2009b). Oleh karena itu, gugus bintang muda menjadi objek yang sesuai dan menarik untuk dipelajari lebih dalam. Menurut McMillan dkk. (2008), gugus bintang terlahir dengan kondisi massa yang sudah mengalami segregasi, yang disebut sebagai *primordial mass segregation*. Hasil pekerjaan McMillan dkk. (2008) sesuai dengan beberapa studi yang menyatakan bahwa bintang-bintang masif terbentuk secara istimewa di pusat daerah pembentukan bintang (McMillan dkk. 2008, Bonnell & Bate 2006, dan Stanke dkk. 2006). Akan tetapi, mekanisme terjadinya

*primordial mass segregation* masih diperdebatkan dan memerlukan penelitian lebih lanjut (lihat McMillan dkk. 2008 dan Bonnell & Bate 2006).

Pengamatan terbaru dari gugus bintang muda yang masih terselubung oleh awan gas menunjukkan kondisi awal gugus dengan kesetimbangan dinamik yang rendah (*dynamically cool*) dan struktur tidak homogeny (*clumpy*) (Carpenter & Hodapp 2008). Selain itu, Allison dkk. (2009a) mempelajari segregasi massa gugus bintang muda dengan menggunakan simulasi N-benda dan menemukan bahwa sebagian besar bintang-bintang masif tidak secara langsung terbentuk di pusat gugus pada awal pembentukannya. Bintang-bintang masif cenderung bergerak ke pusat gugus dan akan terkonsentrasi setelah beberapa juta tahun dikarenakan oleh masalah stabilitas pada gugus tersebut saat berusia muda (lihat Darma 2018 dan Yu dkk. 2011). Proses ini disebut sebagai *dynamical mass segregation*. Semakin *clumpy* dan dingin bintang pada gugus, semakin tinggi derajat massa segregasi yang terjadi dalam gugus (Allison dkk. 2009a). Akan tetapi, asal terjadinya massa segregasi (*primordial* atau

*dinamical*) masih belum jelas dan memerlukan penelitian lebih lanjut.

Berbagai pengamatan dan simulasi segregasi massa gugus bintang berusia muda memberikan hasil yang beragam. Pengamatan gugus bintang berusia muda yang masih terselubung oleh awan gas (dikenal dengan *embedded star cluster*) untuk mempelajari segregasi massa secara langsung sangat sulit akibat besarnya ekstingsi pada arah gugus tersebut. Dalam pekerjaan ini, kami menyelidiki segregasi massa pada beberapa gugus bintang berusia muda (< 5 juta tahun) yang berada di Bima Sakti, dengan menggunakan beberapa parameter dari data katalog terbaru. Pekerjaan ini bertujuan untuk mempelajari asal proses segregasi massa (*primordial* atau *dinamical*) dari gugus bintang berusia muda di dalam galaksi Bima Sakti.

## 2. Metode

### Data

**Tabel 1.** Nilai skala *cut-off* ( $\lambda_c$ ) dan ukuran minimum gugus ( $N_c$ ) dari kelima gugus berusia muda saat dilakukan proses *clustering*.

| Gugus Bintang | $\lambda_c$ | $N_c$ |
|---------------|-------------|-------|
| M 42          | 0,04        | 100   |
| NGC 2264      | 0,043       | 100   |
| NGC 6611      | 0,031       | 100   |
| NGC 2244      | 0,047       | 100   |
| Trumpler 14   | 0,025       | 100   |

### Proses Clustering

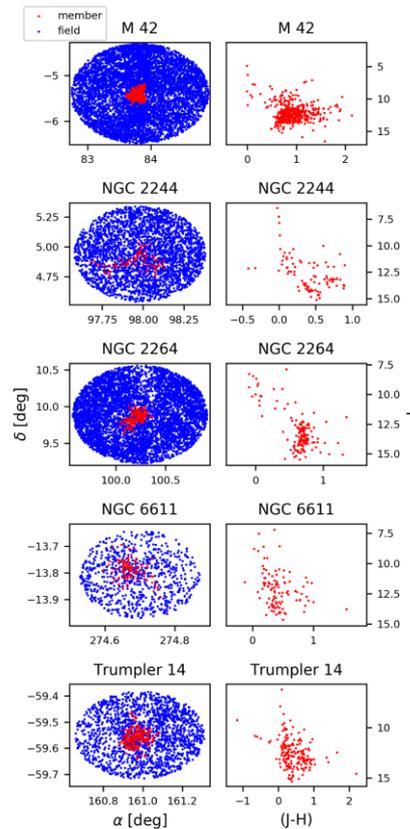
Sebelum menghitung segregasi massa kelima gugus berusia muda tersebut, dilakukan terlebih dahulu proses *clustering* untuk membedakan bintang mana saja yang merupakan anggota gugus dengan bintang latar belakang dan latar depan. Proses *clustering* yang digunakan dalam pekerjaan ini menggunakan algoritma *Minimum Spanning Tree* (MST). Pada prinsipnya, algoritma MST mengadopsi teori grafik dan menerapkannya untuk menghitung panjang total minimum antara suatu titik dengan titik lain yang diketahui (lihat Aldiwijaya 2018, Romadhonia 2015, Campana dkk. 2013, dan Prim 1957 untuk lebih detail). Reduksi panjang antara dua titik dibutuhkan untuk mendapatkan pengelompokan bintang-

Dalam pekerjaan ini, digunakan lima gugus bintang berusia muda, yaitu M 42, NGC 2244, NGC 2264, NGC 6611, dan Trumpler 14. Parameter fisis dari kelima gugus tersebut dapat dilihat pada Tabel 1, yang diadopsi dari beberapa penelitian sebelumnya (Beccariet dkk. 2015, Scandariato dkk. 2011, Selim dkk. 2016, Da Rio dkk. 2010, Sana dkk. 2010, Bonatto & Bica 2009, Dahm 2008, D'orazi dkk. 2007, Jeffreces 2007a, Dahm & Simon 2005, Carraro dkk. 2004, Tadross 2003, Hensberge dkk. 2000, Park & Sung 2002, Park dkk. 2000, dan Hillenbrand 1993). Parameter astrometri (asensio rekta, deklinasi, dan paralaks) dan fotometri inframerah (magnitudo JHK) diadopsi dari katalog *Gaia Data Release 2* (Gaia DR2) dan *Two Micron All Sky Survey* (2MASS). Untuk mendapatkan nilai parameter gugus dengan kualitas yang baik, kami menggunakan data dengan galat paralaks relatif kurang dari 15%.

bintang dalam gugus, dengan mengatur nilai parameter skala *cut-off* ( $\lambda_c$ ) dan ukuran minimum gugus ( $N_c$ ), seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Tahapan reduksi panjang tersebut dikenal sebagai tahap MST-Tereduksi. Parameter astrometri digunakan untuk mendapatkan pengelompokan dalam ruang 3 dimensi. Ketika bintang anggota gugus dan bintang latar sudah dapat dibedakan, kami melakukan interpolasi model *isochrone* setiap bintang anggota gugus untuk mendapatkan massa dari setiap bintang tersebut. *Isochrone* yang digunakan berasal dari Girardi dkk. (2000) dengan parameter fisis setiap gugus bintang ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Parameter fisik yang digunakan untuk kelima gugus berusia muda. Parameter  $Z$ ,  $A_v$ , and  $d$  berturut-turut adalah metalisitas, ekstingsi, dan jarak gugus ke Matahari.

| Gugus Bintang | Usia (juta tahun) | $Z$    | $A_v$ | $d$ (kpc) |
|---------------|-------------------|--------|-------|-----------|
| M 42          | 2,63              | 0,04   | 6,0   | 0,44      |
| NGC 2264      | 3,0               | 0,0152 | 0,71  | 0,76      |
| NGC 6611      | 3,6               | 0,019  | 3,2   | 0,22      |
| NGC 2244      | 2,3               | 0,0002 | 1,457 | 1,39      |
| Trumpler 14   | 1,0               | 0,0142 | 2,0   | 2,90      |



**Gambar 1.** Hasil proses *clustering* untuk kelima gugus bintang dengan mengimplementasikan algoritma MST (panel kiri). Panel kanan adalah diagram HR bintang-bintang anggota untuk setiap gugus bintang.

**Perhitungan Segregasi Massa**

Perhitungan segregasi massa yang dalam pekerjaan ini mengadopsi metode dari Allison dkk. (2010), di mana derajat kuantifikasi dari segregasi massa ( $\Lambda$ ) dihitung dengan menggunakan algoritma MST (tanpa melakukan tahap MST-Tereduksi).

Derajat segregasi massa dihitung dengan menggunakan Persamaan (1), dengan  $l_{massive}$  adalah panjang total minimum dari N-bintang paling masif di dalam gugus dan  $\langle l_{norm} \rangle$  adalah panjang total minimum rata-rata dari N-bintang di

dalam gugus yang dipilih secara acak. Kami melakukan 5000 iterasi untuk mendapatkan nilai  $\langle l_{norm} \rangle$  dengan standar deviasi  $\sigma_{norm}$ .

$$\Lambda = \frac{\langle l_{norm} \rangle}{l_{massive}} \pm \frac{\sigma_{norm}}{l_{massive}} \tag{1}$$

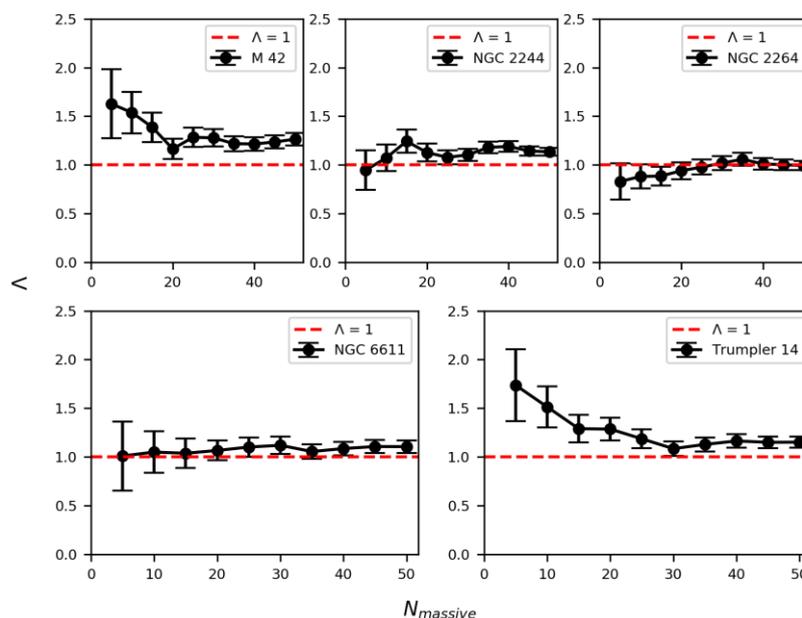
Untuk  $\Lambda = 1$ , tidak ada segregasi massa yang terjadi di dalam gugus dan seluruh bintang terdistribusi secara homogen. Segregasi massa terjadi ketika  $\Lambda > 1$ , dan terjadi segregasi massa terbalik

(*inverse-mass segregation*) untuk  $\Lambda < 1$  (Allison dkk. 2009b). *Inverse-mass segregation* merupakan kondisi saat bintang-bintang masif bergerak menuju ke arah luar gugus karena adanya reaksi dari proses keruntuhan pusat gugus yang besar. Bintang-bintang masif tersebut kemudian akan kembali menuju pusat gugus dalam rentang waktu relaksasi gugus tersebut. Namun, beberapa bintang masif berpeluang akan meledak dalam perjalanan evolusinya sebelum kembali mencapai pusat gugus.

### 3. Hasil dan Analisis

Proses *clustering* telah dilakukan untuk gugus bintang M42, NGC 2244, NGC 2264, NGC 6611, dan Trumpler 14, dengan menerapkan algoritma MST-Tereduksi. Dengan algoritma ini, bintang-bintang anggota gugus-gugus tersebut dapat ditentukan dengan baik. Selain itu, struktur

gugus-gugus tersebut tampak menyerupai *clumpy*, daripada seperti bentuk bola (lihat panel kiri pada Gambar 1). Hal ini mendukung argumen-argumen sebelumnya yang menyatakan bahwa gugus bintang berusia muda memiliki kondisi *dynamically cool* (Carpenter & Hodapp 2008). Struktur *clumpy* yang tampak di awal pembentukan gugus ternyata mirip seperti yang diusulkan oleh studi-studi sebelumnya (e.g. Darma dkk. 2019, Arnold dkk. 2017, dan Goodwin & Whitworth 2004). Selain itu, diagram HR untuk bintang-bintang anggota dari masing-masing gugus menunjukkan bahwa sebagian besar bintang-bintang tersebut masih berada di tahap deret utama (lihat panel kanan pada Gambar 1). Hal ini dapat dipahami dengan baik dikarenakan usia gugus-gugus bintang tersebut yang kurang dari 5 juta tahun.



**Gambar 2.** Derajat segregasi massa (dalam rentang ketidakpastian  $1\sigma$ ) untuk kelima gugus bintang, dengan jumlah bintang masif yang semakin banyak. Garis putus-putus merah menunjukkan batas dimana segregasi massa tidak akan terjadi di sebuah gugus.

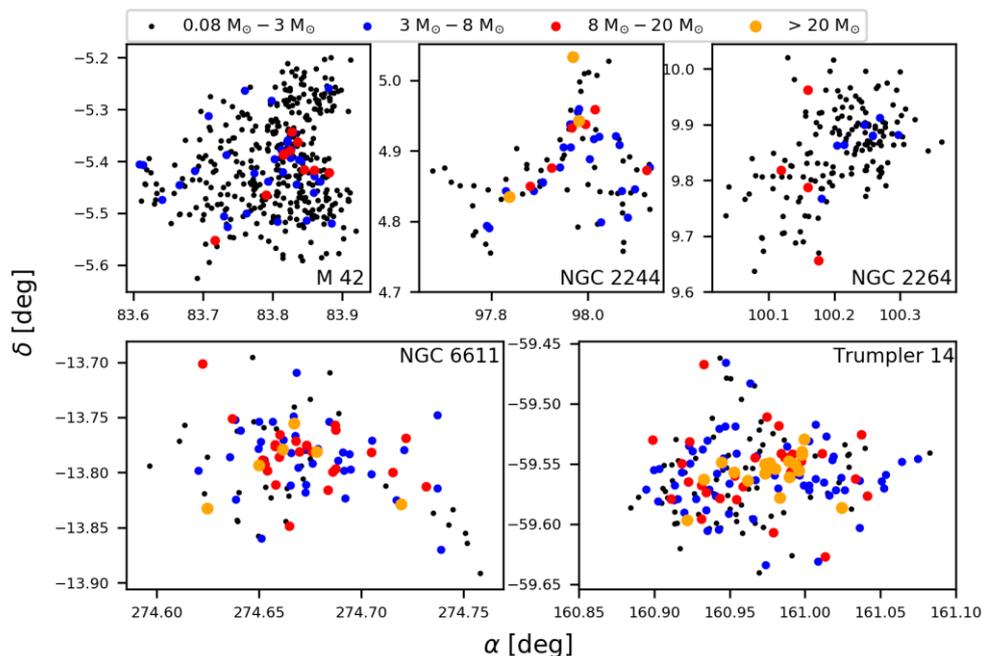
Derajat segregasi massa dari kelima gugus bintang berusia muda tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Gugus M 42 dan Trumpler 14 memiliki derajat segregasi massa yang tinggi daripada ketiga gugus lainnya. Perilaku segregasi massa pada kedua gugus tersebut tampak mirip, yaitu terjadi penurunan derajat segregasi massa,

yang kemudian diikuti oleh derajat segregasi massa yang cenderung konstan untuk jumlah bintang masif yang semakin besar. Seperti yang tampak pada Gambar 3, gugus M 42 dan Trumpler 14 memiliki bintang-bintang dengan  $M \geq 3 M_{\odot}$  yang terkonsentrasi di sekitar pusat gugus. Hal ini mengindikasikan bahwa segregasi massa

pada kedua gugus tersebut cenderung memenuhi tipe *primordial mass segregation*, daripada *dynamical mass segregation*.

Jika dibandingkan dengan gugus M 42 dan Trumpler 14, gugus bintang NGC 2244 dan NGC 6611 memiliki derajat segregasi massa yang lebih rendah (lihat Gambar 2). Bintang-bintang dengan  $M \geq 3 M_{\odot}$  di gugus NGC 2244 tidak terlalu terkonsentrasi di sekitar pusat gugus (lihat Gambar 3), melainkan tersebar tidak homogen di sepanjang gugus tersebut. Selain itu, meskipun jumlah bintang masif di gugus NGC 6611 cukup banyak, derajat segregasi massa pada gugus ini tidak sebesar gugus M 42 dan Trumpler 14. Hal ini disebabkan

oleh bintang-bintang paling masif ( $M > 20 M_{\odot}$ ) pada gugus ini tidak terdistribusi di sekitar pusat gugus, melainkan tersebar ke arah luar gugus (lihat Gambar 3). Distribusi bintang-bintang bermassa menengah dan bintang-bintang masif yang tidak homogen, membutuhkan waktu beberapa juta tahun (dalam rentang waktu relaksasi gugus) agar bintang-bintang tersebut bergerak ke arah pusat dan memicu terjadinya segregasi massa dalam skala besar. Hal ini mengindikasikan bahwa segregasi massa yang terjadi pada gugus NGC 2244 dan NGC 6611 cenderung berwujud *dynamical mass segregation*, daripada *primordial mass segregation*.



**Gambar 3.** Distribusi spasial bintang-bintang anggota dari kelima gugus bintang. Titik-titik hitam dan biru masing-masing menunjukkan bintang-bintang bermassa rendah dan menengah. Sedangkan titik-titik merah dan jingga menunjukkan bintang-bintang masif dengan rentang massa yang berbeda.

Hasil lainnya yang berbeda dengan penjelasan di atas, ditemukan pada gugus NGC 2264. Daripada mengalami segregasi massa yang tinggi, gugus ini tampak berada dalam kondisi *inverse-mass segregation* untuk jumlah bintang masif yang semakin banyak (lihat Gambar 2). Selain itu, bintang-bintang dengan  $M \geq 3 M_{\odot}$  tidak terkonsentrasi di sekitar pusat gugus, melainkan terdistribusi ke arah luar dari

pusat gugus (lihat Gambar 3). Keruntuhan yang besar pada pusat gugus bintang di awal pembentukannya, diyakini telah memicu terjadinya proses dinamik bintang-bintang di dalam gugus dalam skala yang cepat dan luas. Dengan demikian, bintang-bintang masif dapat bergerak ke arah luar pusat gugus. Namun, untuk mencapai tahap relaksasinya, bintang-bintang ini beberapa kali akan melewati pusat gugus, hingga

bintang-bintang mencapai kondisi dinamik yang stabil di sekitar pusat gugus. Meskipun, beberapa di antaranya akan meledak terlebih dahulu karena masa hidupnya yang pendek.

Kami juga telah menghitung jumlah bintang bermassa rendah, bintang bermassa menengah, dan bintang masif untuk setiap gugus, seperti yang dicantumkan pada Tabel 3, untuk dapat memahami peran massa bintang yang berbeda-beda pada proses segregasi massa yang terjadi. Gugus NGC 6611 dan Trumpler 14 memiliki jumlah bintang massif paling banyak daripada gugus-gugus lainnya. Namun, perbedaan tipe segregasi massa terjadi pada kedua gugus tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah bintang masif tidak memiliki kontribusi yang signifikan pada segregasi massa gugus-gugus berusia muda. Asal mula proses segregasi massa pada gugus-gugus bintang muda lebih tepatnya bergantung pada sebaran kecepatan dan struktur *clumpy* yang terbentuk di awal pembentukan gugus. Semakin *clumpy* struktur dan semakin besar sebaran kecepatan bintang-bintang dalam gugus,

maka akan semakin besar keruntuhan pusat gugus yang terjadi di awal pembentukannya. Hal inilah yang akan memicu segregasi massa pada skala yang besar untuk gugus-gugus bintang berusia muda (Darma 2018 dan Darma dkk. 2019).

Sebagai informasi tambahan, gugus Trumpler 14 memiliki jumlah bintang masif paling banyak daripada gugus lainnya dalam pekerjaan ini. Interpolasi massa bintang yang dilakukan dalam pekerjaan ini, menunjukkan bahwa Trumpler 14 memiliki beberapa bintang masif yang memiliki massa lebih dari 100 massa Matahari. Keberadaan bintang dengan massa sebesar ini akan sangat mungkin memicu peningkatan atau penurunan segregasi massa akibat masa hidupnya yang singkat dan meledak menjadi supernova. Selain itu, keberadaan bintang-bintang yang sangat masif dalam sebuah gugus bintang dapat memicu terbentuknya lubang hitam, yang diperkirakan akan berkontribusi pada perilaku segregasi massa gugus yang berbeda.

**Tabel 3.** Jumlah bintang-bintang bermassa rendah, bintang-bintang bermassa menengah, dan bintang-bintang masif untuk kelima gugus bintang berusia muda.

| Gugus Bintang | Jumlah bintang bermassa rendah | Jumlah bintang bermassa menengah | Jumlah bintang masif |
|---------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------|
| M 42          | 372                            | 34                               | 11                   |
| NGC 2244      | 56                             | 24                               | 9                    |
| NGC 2264      | 150                            | 8                                | 4                    |
| NGC 6611      | 37                             | 37                               | 30                   |
| Trumpler 14   | 72                             | 62                               | 47                   |

#### 4. Simpulan

Kami telah melakukan investigasi segregasi massa pada kelima gugus bintang berusia muda, yaitu M 42, NGC 2244, NGC 2264, NGC 6611, dan Trumpler 14, dengan menerapkan algoritma MST pada proses *clustering* dan dalam proses menghitung derajat segregasi massa. Hasil analisis menunjukkan bahwa gugus M 42 dan Trumpler 14 memiliki segregasi massa yang besar pada usianya saat ini, yang diperkirakan menyerupai *primordial mass segregation*. Selain itu, gugus NGC 2244 dan NGC 6611 memiliki cenderung

memenuhi *dynamical mass segregation* akibat dari bintang-bintang bermassa menengah dan bintang-bintang massif yang tidak terkonsentrasi di sekitar pusat gugus. Sedangkan gugus NGC 2264 memiliki kondisi segregasi massa yang berbeda, yaitu *inverse-mass segregation*. Hal ini diperkirakan terjadi akibat bintang-bintang bermassa menengah dan bintang-bintang masif terdistribusi tidak homogen dan bergerak ke arah luar pusat gugus.

Berdasarkan usia dari kelima gugus bintang tersebut (kurang dari 5 juta tahun), segregasi massa gugus-gugus bintang

berusia muda dapat berupa *primordial* dan *dynamical*, bergantung pada distribusi bintang-bintangnya di awal pembentukan gugus. Selain itu, *inverse-mass segregation* kemungkinan besar dapat disebabkan oleh proses dinamik bintang-bintang di dalam gugus yang berlangsung sangat cepat dan meluas, untuk mencapai tahap relaksasi dari gugus tersebut.

### Ucapan Terima Kasih

Seluruh simulasi dalam pekerjaan ini telah dilakukan dengan menggunakan Chalawan High Performance Computing (HPC) di National Astronomical Research Institute of Thailand (NARIT), Chiang Mai, Thailand.

### Daftar Pustaka

- Aldiwijaya, C. 2018. *Penentuan Anggota Gugus Terbuka dengan Metode Pohon Merentang Minimum Tereduksi*, Tugas Akhir Program Studi Sarjana Astronomi, Institut Teknologi Bandung.
- Allison, R. J. dkk. 2009a. *Dynamical Mass Segregation on a Very Short Timescale*. *The Astrophysical Journal*, 700, 99 – 103.
- Allison, R. J. dkk. 2009b. *Using the Minimum Spanning Tree to Trace Mass Segregation*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 395, 1449 – 1454.
- Allison, R. J. dkk. 2010. *The Early Dynamical Evolution of Cool, Clumpy Star Clusters*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407, 1098-1107.
- Arnold, B., Goodwin, S.P., Griffiths, D.W., & Parker, R.J. 2017. *How do Binary Clusters Form?* *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471, 2498 – 2507.
- Bonatto, C. & Bica, E. 2009. *Probing the Age and Structure of the Nearby Very Young Open Clusters NGC 2244 and 2239*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 394, 2127 – 2140.
- Bonnell, I. A. & Bate, M. R. 2006. *Star Formation through Gravitational Collapse and Competitive Accretion*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 370, 488 – 494.
- Beccari, G., De Marchi, G., Panagia, N., Valenti, E., Carraro, G., Romaniello, M., Zoccali, M., & Weidner, C. 2015. *Mass Accretion Rates from Multi-Band Photometry in the Carina Nebula: the Case of Trumpler 14*. *Astronomy & Astrophysics*, 574, A44, 12pp.
- Campana, R., Bernieri, E., Massaro, E., Tinebra, F., Tosti, G. 2013. *Minimal Spanning Tree Algorithm for  $\gamma$ -ray Source Detection in Sparse Photon Images: Cluster Parameters and Selection Strategies*. *Astrophysics and Space Science*, 347, 169 – 182.
- Carpenter, J., Hodapp, K. 2008. In Reipurth, B., ed., *Handbook of Star Forming Regions*, Volume 1: The Northern Sky. *Astronomical Society of the Pacific*, San Fransisco, p. 899.
- Carraro, G., Romaniello, M., Ventura, P., & Patat, F. 2004. *The Star Collinder 232 in the Carina Complex and Its Relation to Trumpler 14/16*. *Astronomy & Astrophysics*, 418, 525 – 537.
- Dahm, S. E., Simon, T. 2005. *The T-Tauri Star Population of the Young Cluster NGC 2264*. *The Astronomical Journal*, 129:2, 829 – 855.
- Dahm, S. E. 2008. *The Young Cluster and Star Forming Region NGC 2264*. *Handbook of Star Forming Regions*, Volume I: The Northern Sky ASP, 1 – 43.
- Da Rio, N., Dimitrios, A., Gouliermis, & Gennaro, M. 2010. *A New Method for the Assessment of Age and Age-Spread of the Pre-Main-Sequence Stars in Young Stellar Associations of the Magellanic Clouds*. *Astrophysical Journal*, 723, 166 – 183.
- Darma, R. 2018. *Evolusi Dinamik Pembentukan Gugus Ganda di Bimasakti dan Awan Magellan Besar dengan Model Fraktal*, Tesis Program Studi Pascasarjana

- Astronomi, Institut Teknologi Bandung.
- Darma, R., Arifyanto, M.I., & Kouwenhoven, M.B.N. 2019. *The Formation of Binary Star Cluster in Our Galaxy from Fractal Stellar Distribution*, Journal of Physics: Conference Series, 1231, 1742 – 6596.
- D’Orazi, V., Randich, S., Palla, F., Flaccomio, E., & Pallavicini, R. 2007. *Metallicity of Low-Mass Members of the Orion Nebula Cluster*. Memorie della Societa Astronomica Italiana, 78, p.656.
- Girardi, L., Bressan, A., Bertelli, G., & Chiosi, C. 2000. Evolutionary Tracks and Isochrones for Low- and Intermediate-Mass Stars: from 0.15 to 7  $M_{\odot}$ , and from  $Z = 0.0004$  to 0.03. Astronomy & Astrophysics Supplement Series, 141, 371 – 383.
- Goodwin, S.P. & Whitworth, A.P. 2004. *The Dynamical Evolution of Fractal Star Clusters: the Survival of Substructure*. Astronomy & Astrophysics, 413, 929 – 937.
- Hensberge, H., Pavlovski, K., & Verschueren, W. 2000. *The Eclipsing Binary V578 Mon in the Rosette Nebula: Age and Distance to NGC 2244 Using Fourier Disentangled Component Spectra*. Astronomy and Astrophysics, 358, 553 – 571.
- Hillenbrand, Lynne A., Massey, P., Strom, Stephen E., Merrill, K. Michael. 1993. *NGC 6611: A Cluster Caught in the Act*. The Astronomical Journal, 106:5, 1906 – 2190.
- Jeffreces, R.D. 2007a. *The Distance to the Orion Nebula Cluster*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 376, 1109 – 1119.
- Lada, C. J. & Lada, E. A. 2003. *Embedded Clusters in Molecular Clouds*. Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 41, 57 – 115.
- McMillan, S., Vesperini, E., & Zwart, S. P. 2008. *A Dynamical Origin for Early Mass Segregation in Young Star Clusters*. International Astronomical Union, 246, 41 – 45.
- Park, B. G., Sung, H., Bessell, M. S., Kang, Y. H., 2000. *The Pre-Main-Sequence Stars and Initial Mass Function of NGC 2264*. The Astronomical Journal, 120:2, 894-908.
- Park, B. G. & Sung, H. 2002. *UBVI and H $\alpha$  Photometry of the Young Open Cluster NGC 2244*. The Astronomical Journal, 123, 892 – 904.
- Prim, R. C. 1957. *Shortest Connection Networks and Some Generalizations*. Bell System Technical Journal, 36, 1389 – 1401.
- Romadhonia, R. W. 2015. *Studi Substruktur Gugus Terbuka Muda*, Tugas Akhir Program Studi Sarjana Astronomi, Institut Teknologi Bandung.
- Sana, H. dkk. 2010. *A MAD View of Trumpler 14*. Astronomy & Astrophysics, 515, 26 – 39.
- Scandariato, G., Robberto, M., Pagano, I., & Hillenbrand, L.A. 2011. *The Extinction Map of the OMC-1 Molecular Cloud behind the Orion Nebula*. Astronomy & Astrophysics, 533, A38, 11pp.
- Selim, I. M., Essam, A., Hendy, Y. H. M., & Bendary, R. 2016. *A Comprehensive Study of the Young Open Star Cluster NGC 6611 based on Deep VRI CCD Images and 2MASS Data*. NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics, 5:1, 16 – 22.
- Stanke, T., Smith, M. D., Gredel, R., & Khanzadyan, T. 2006. *An Unbiased Search for the Signatures of Protostars in the  $\rho$  Ophiuchi Molecular Cloud*. Astronomy & Astrophysics, 447, 609 – 622.
- Tadross, A. L. 2003. *Metallicity Distribution on the Galactic Disk*. New Astronomy, 8, 737 – 747.
- Yu, J.L., De Grijs, R., & Chen, L. 2011. *Rapid Dynamical Mass Segregation and Properties of Fractal Star Clusters*, Astrophysical Journal, 732, 16, 6pp.