



## IMPLEMENTASI FIREFLY ALGORITMA PADA OPTIMISASI MULTIOBJEKTIF PORTOFOLIO SAHAM IDX–MES BUMN 17 DENGAN KENDALA CARDINALITY

Rosa Andriani<sup>\*1</sup>, Arsyelina Husni Johan<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Universitas Terbuka, Tangerang Selatan, Indonesia

\*Corresponding Author: [rosa.andriani@ecampus.ut.ac.id](mailto:rosa.andriani@ecampus.ut.ac.id)

<p><b>Info Article</b></p> <p>Received : 04 November 2025</p> <p>Revised : 02 Desember 2025</p> <p>Accepted : 03 Januari 2026</p> <p>Publication : 31 Januari 2026</p>	<p><b>Abstract:</b> <i>The Firefly Algorithm (FA) is used as an optimization tool to construct a stock portfolio based on the IDX–MES BUMN 17 index by balancing risk and return under a cardinality constraint on the number of investable stocks. The data consist of daily closing prices for 14 sharia-compliant state-owned enterprise stocks included in the IDX–MES BUMN 17 index over the period September 2019–September 2024, downloaded from Yahoo Finance and transformed into daily log-returns. The expected returns and covariance matrix are embedded into a weighted objective function <math>F(w)</math> that combines the reciprocal of portfolio return and portfolio variance, with a weight <math>\lambda=0.05</math> placing stronger emphasis on risk. The results show that FA attains stable solutions on a non-convex optimization landscape and produces an optimal portfolio that is highly concentrated in a single dominant stock, while other stocks contribute only marginally. These findings suggest that FA is effective as a technical engine for portfolio optimization, but additional constraints such as an upper bound on individual stock weights and a minimum number of stocks in the portfolio are still required to obtain a more practically diversified sharia portfolio.</i></p>
<p><b>Keywords:</b> Firefly Algorithm, IDX–MES BUMN 17, Cardinality Constraint, Mean Variance, Portfolio Optimization</p> <p><b>Kata Kunci:</b> Firefly Algorithm, IDX–MES BUMN 17, Kendala Cardinality, Mean–Variance, Optimisasi Portofolio</p>	<p><b>Abstrak:</b> Firefly Algorithm (FA) dimanfaatkan sebagai alat optimasi untuk menyusun portofolio saham berbasis indeks IDX–MES BUMN 17 dengan menyeimbangkan risiko dan return di bawah kendala jumlah saham yang dapat dipegang (cardinality). Data yang digunakan berupa harga penutupan harian 14 saham BUMN syariah anggota IDX–MES BUMN 17 periode September 2019–September 2024 yang diunduh dari Yahoo Finance dan diolah menjadi log-return harian. Return ekspektasian dan matriks kovarians kemudian dimasukkan ke dalam fungsi objektif berbobot <math>F(w)</math> yang menggabungkan kebalikan return portofolio dan varians portofolio, dengan bobot <math>\lambda=0,05</math> sehingga komponen risiko mendapat penekanan lebih besar. Hasil menunjukkan bahwa FA mampu mencapai solusi yang stabil pada landscape optimisasi non-konveks dan menghasilkan portofolio optimal yang sangat terkonsentrasi pada satu saham dengan kinerja paling dominan, sementara saham lain hanya memberikan kontribusi marginal. Temuan ini mengindikasikan bahwa FA efektif sebagai mesin optimisasi portofolio secara teknis, tetapi untuk memperoleh portofolio yang lebih terdiversifikasi secara praktis tetap diperlukan kendala tambahan seperti batas maksimum bobot per saham dan batas minimum jumlah saham yang wajib masuk portofolio.</p>
<p><i>Licensed Under a Creative Commons Attribution 4.0 International License</i></p> 	

## INTRODUCTION

Perkembangan pasar modal syariah di Indonesia berlangsung cukup pesat dalam satu dekade terakhir. Jumlah emiten yang memenuhi kriteria syariah meningkat, demikian pula variasi instrumen dan indeks yang tersedia bagi investor muslim. Salah satu indeks yang relatif baru dan mendapat perhatian adalah IDX–MES BUMN 17, yang beranggotakan saham-saham Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang telah lolos penyaringan syariah. Indeks ini menarik karena menggabungkan karakteristik perusahaan milik negara yang strategis dengan kepatuhan terhadap prinsip-prinsip syariah, sehingga relevan sebagai *benchmark* bagi investor syariah di Indonesia (Otoritas Jasa Keuangan, 2023).

Secara konseptual, sebuah indeks hanya mendefinisikan himpunan aset dan aturan perhitungan nilai indeks, bukan bobot optimal masing-masing saham dalam portofolio investor. Sejak karya klasik Markowitz (1952), masalah penentuan bobot portofolio diformalkan sebagai problem *mean–variance*: mencari kombinasi bobot aset yang memaksimalkan return ekspektasian dan secara simultan meminimalkan varians risiko. Model *mean–variance* menjadi fondasi teori portofolio modern dan melahirkan beragam pengembangan lanjutan, termasuk penambahan berbagai kendala praktis dan regulasi (Elton et al., 2014; Fabozzi et al., 2007; Kolm et al., 2014).

Dalam praktik, investor terutama investor ritel jarang memegang seluruh saham yang menjadi konstituen suatu indeks. Keterbatasan modal, biaya transaksi yang timbul setiap kali melakukan *rebalancing*, serta keterbatasan kapasitas pemantauan mendorong investor membatasi jumlah saham aktif yang dipegang dalam portofolio. Fenomena ini dimodelkan melalui kendala *cardinality*, yaitu pembatasan jumlah maksimum aset dengan bobot positif (Chang et al., 2000; Maringer & Kellerer, 2003). Penambahan kendala *cardinality* mengubah problem *mean variance* yang semula konveks menjadi non-konveks dan kombinatorial. Dalam kondisi ini, metode optimisasi deterministik berbasis program kuadratik standar menjadi kurang memadai karena mudah terjebak pada solusi lokal dan membutuhkan waktu komputasi besar untuk dimensi tinggi (Bertsimas et al., 2009; Kolm et al., 2014).

Perkembangan algoritma metaheuristik menyediakan alternatif untuk menyelesaikan problem optimisasi non-konveks dan berkendala kompleks. Berbagai pendekatan seperti *genetic algorithm*, *particle swarm optimization*, *simulated annealing*, dan Firefly Algorithm (FA) telah digunakan untuk problem portofolio, termasuk dengan kendala *cardinality*, batas posisi (*position limits*), dan biaya transaksi

(Blum & Roli, 2003; Chang et al., 2000; Lwin et al., 2014; Ramshe & Rafiee, 2021). FA sendiri merupakan algoritma yang terinspirasi dari perilaku kunang-kunang yang tertarik pada kunang-kunang lain yang lebih terang. Dalam kerangka optimisasi, solusi dengan nilai fungsi objektif lebih baik dipandang sebagai ‘lebih terang’ sehingga menjadi tujuan gerak solusi lain (Yang, 2009, 2010).

Berbagai studi menunjukkan bahwa algoritma metaheuristik mampu memberikan solusi portofolio yang kompetitif di bawah kendala dunia nyata (Lwin et al., 2014; DeMiguel et al., 2009; Jorion, 2003). Namun, kajian portofolio syariah dengan fokus khusus pada indeks IDX–MES BUMN 17 masih terbatas, padahal indeks ini merepresentasikan kombinasi unik antara eksposur BUMN, kepatuhan syariah, dan konteks pasar domestik Indonesia (Hakim & Rashidian, 2004; Majdoub & Mansour, 2014). Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini mengkaji implementasi FA untuk optimisasi multiobjektif portofolio saham IDX–MES BUMN 17 dalam kerangka *mean variance* dengan kendala *cardinality*. Fokus utama diletakkan pada pemodelan *trade-off* return–risiko melalui fungsi objektif berbobot dengan  $\lambda = 0,05$ , sehingga risiko relatif lebih ditekankan daripada return. Secara empiris, penelitian ini mengolah data harga penutupan harian 14 saham BUMN syariah anggota IDX–MES BUMN 17 yang diunduh dari *Yahoo Finance*, menyusun model portofolio dengan kendala realistis, mengimplementasikan FA di MATLAB, dan mengevaluasi karakteristik portofolio optimal yang dihasilkan, termasuk implikasinya bagi diversifikasi portofolio syariah.

## METHOD

Data yang digunakan berupa harga penutupan harian 14 saham BUMN syariah yang menjadi konstituen indeks IDX–MES BUMN 17, yaitu: ANTM, BRIS, ELSA, IPCC, KAEF, MTEL, PGAS, PTBA, PTPP, SMBR, SMGR, TINS, TLKM, dan WEGE. Periode observasi mencakup September 2019 hingga September 2024. Seluruh data diunduh dari laman *Yahoo Finance*, kemudian diselaraskan tanggal perdagangannya untuk memastikan tidak ada *mismatch* hari perdagangan antar saham. Prapemrosesan meliputi: (1) penghapusan observasi dengan *missing values* atau *suspicious outliers* yang berasal dari kesalahan pencatatan, dan (2) konversi harga penutupan menjadi *log-return* harian.

Untuk saham ke- $i$  pada hari ke- $t$ , *log-return* harian didefinisikan sebagai

$$r_{i,t} = \ln \left( \frac{P_{i,t}}{P_{i,t-1}} \right),$$

dengan  $P_{i,t}$  adalah harga penutupan saham ke- $i$  pada hari ke- $t$ . Return ekspektasian harian dihitung sebagai

$$\mu_i = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T r_{i,t}$$

dan kovarians antar saham sebagai

$$\Sigma_{ij} = \text{Cov}(r_i, r_j)$$

Dengan asumsi terdapat  $D = 21$  hari perdagangan per bulan, return ekspektasian bulanan dan risiko bulanan saham ke- $i$  diturunkan sebagai

$$R_{i,\text{bulan}} = \exp(\mu_i D) - 1, \sigma_{i,\text{bulan}} = \sqrt{\Sigma_{ii} D}$$

Ringkasan statistik return–risiko bulanan ke-14 saham disajikan pada Tabel 1 (diambil dari hasil komputasi atas data Yahoo Finance).

**Tabel 1. Return ekspektasian dan risiko bulanan saham IDX–MES BUMN 17**

Ticker	$R_{i,\text{bulan}}$	$\sigma_{i,\text{bulan}}$
ANTM	0,0039	0,1409
BRIS	0,0328	0,1708
ELSA	0,0063	0,1241
IPCC	-0,0096	0,1338
KAEF	-0,0236	0,2013
MTEL	-0,0044	0,1258
PGAS	0,0024	0,1199
PTBA	-0,0207	0,1546
PTPP	-0,0152	0,1652
SMBR	-0,0201	0,1158
SMGR	-0,0012	0,1532
TINS	-0,0057	0,0855
TLKM	-0,0219	0,1308
WEGE	-0,0226	0,1265

Tabel 1 memperlihatkan bahwa BRIS memiliki return ekspektasian bulanan tertinggi dengan risiko yang masih sebanding dengan beberapa saham lain. Sebaliknya, mayoritas saham lain justru memiliki return ekspektasian bulanan negatif.

Vektor bobot portofolio dinotasikan sebagai

$$\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_{14})^T$$

dengan kendala standar

$$w_i \geq 0 \forall i, \sum_{i=1}^{14} w_i = 1$$

Return ekspektasian dan varians harian portofolio adalah

$$R_p = \mathbf{w}^\top \boldsymbol{\mu}, \sigma_p^2 = \mathbf{w}^\top \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{w}$$

Return dan risiko bulanan portofolio:

$$R_{\text{bulan}} = \exp(R_p D) - 1, \sigma_{\text{bulan}} = \sqrt{\sigma_p^2 D}$$

Untuk menggabungkan dua tujuan—meminimalkan risiko dan memaksimalkan return digunakan fungsi objektif berbobot:

$$F(\mathbf{w}) = \lambda \frac{1}{R_{\text{bulan}}} + (1 - \lambda) \sigma_{\text{bulan}}^2, 0 < \lambda \leq 1$$

dengan  $\lambda = 0,05$ . Portofolio dengan  $R_{\text{bulan}} \leq 0$  diberi penalti besar sehingga tersisih dari solusi efisien.

Kendala *cardinality* dirumuskan sebagai

$$|\{i \mid w_i > 0\}| \leq K$$

dengan  $K = 5$ . Artinya, maksimal lima saham boleh memiliki bobot positif dalam portofolio.

Dalam FA, setiap kandidat portofolio  $\mathbf{w}$  dipandang sebagai kunang-kunang dengan tingkat kecerahan berbanding terbalik dengan nilai  $F(\mathbf{w})$ . Untuk dua kunang-kunang  $i$  dan  $j$  dengan bobot  $\mathbf{w}^{(i)}$  dan  $\mathbf{w}^{(j)}$ , jika

$$F(\mathbf{w}^{(j)}) < F(\mathbf{w}^{(i)})$$

maka kunang-kunang  $i$  bergerak menuju  $j$ . Jarak Euclidean di ruang bobot

$$r_{ij} = \|\mathbf{w}^{(i)} - \mathbf{w}^{(j)}\|_2$$

Aturan pergerakan umum:

$$\mathbf{w}_{\text{baru}}^{(i)} = \mathbf{w}^{(i)} + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{w}^{(j)} - \mathbf{w}^{(i)}) + \alpha \left( \boldsymbol{\varepsilon} - \frac{1}{2} \right)$$

dengan  $\beta_0$  ketertarikan awal,  $\gamma$  koefisien pelemahan,  $\alpha$  parameter randomisasi, dan  $\boldsymbol{\varepsilon}$  vektor acak *uniform* pada  $[0,1]$ . Setelah pergerakan, dilakukan fungsi perbaikan (*repair*):

1. Bobot negatif dipotong menjadi nol.
2. Hanya  $K$  bobot terbesar yang dipertahankan; sisanya diatur menjadi nol (kendala *cardinality*).
3. Bobot dinormalisasi sehingga  $\sum_i w_i = 1$

### Pseudocode sederhana FA untuk portofolio

1. Inisialisasi  $N$  kunang-kunang (portofolio)  $\mathbf{w}^{(i)}$  secara acak yang memenuhi kendala.
2. Hitung  $F(\mathbf{w}^{(i)})$ , simpan solusi terbaik global.
3. Untuk setiap iterasi  $t = 1, \dots, T_{\max}$ :
  - a. Untuk setiap pasangan  $(i, j)$ : bila  $F(\mathbf{w}^{(j)}) < F(\mathbf{w}^{(i)})$ , gerakkan  $i$  menuju  $j$  sesuai persamaan pergerakan.
  - b. Terapkan fungsi perbaikan (non-negativitas, normalisasi, *cardinality*).
  - c. Hitung kembali  $F(\mathbf{w}^{(i)})$  dan perbarui solusi terbaik global bila perlu.
4. Setelah iterasi selesai, keluarkan  $\mathbf{w}^*$  sebagai portofolio optimal.

Algoritma diimplementasikan di MATLAB. Parameter FA yang digunakan dirangkum pada Tabel 2.

**Tabel 2. Parameter Firefly Algorithm**

Parameter	Nilai
Ukuran populasi ( $N$ )	25
Iterasi maksimum ( $T_{\max}$ )	60
<i>Cardinality</i> maksimum ( $K$ )	5
Bobot fungsi objektif ( $\lambda$ )	0,05
Parameter randomisasi ( $\alpha$ )	0,20
Ketertarikan awal ( $\beta_0$ )	1,00
Koefisien pelemahan ( $\gamma$ )	1,00
Hari perdagangan per bulan ( $D$ )	21

Untuk menggambarkan frontier multiobjektif,  $\lambda$  juga divariasikan dari 0,05 hingga 1,00 dengan langkah 0,05. Untuk setiap  $\lambda$ , FA dijalankan portofolio terbaik  $\mathbf{w}^*(\lambda)$  direkam.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Result

Tabel 1 memperlihatkan ketimpangan return risiko antar saham. BRIS memiliki return ekspektasian bulanan tertinggi dengan risiko menengah–tinggi, sedangkan sebagian besar saham lain justru ber-return ekspektasian negatif. Dalam kerangka *mean variance*, profil tersebut membuat BRIS menjadi kandidat kuat portofolio optimal karena penambahan saham lain cenderung menurunkan return tanpa penurunan risiko yang sebanding. Variasi  $\lambda$  menghasilkan 21 portofolio terbaik yang, secara teoritis, membentuk frontier multiobjektif pada bidang risiko return. Tabel 3 merangkum risiko,

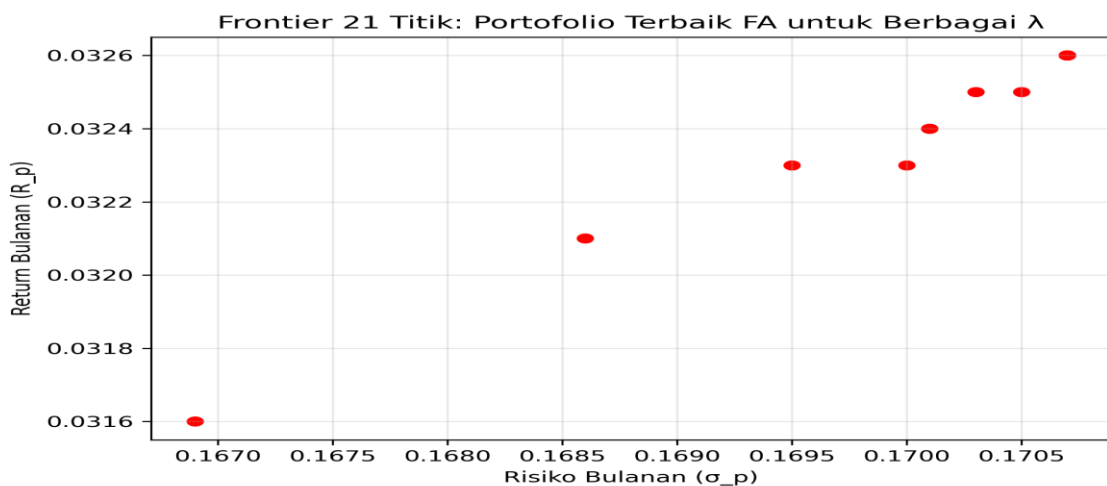
return, dan bobot beberapa saham kunci pada portofolio terbaik untuk setiap nilai  $\lambda$  (hasil running FA di MATLAB dengan dataset *Yahoo Finance*).

**Tabel 3. Portofolio optimal FA untuk 21 nilai  $\lambda$  (return & risiko bulanan, bobot BRIS–ELSA–PTPP)**

$\lambda$	Return	Risiko	$w_{BRIS}$	$w_{ELSA}$	$w_{PTPP}$
0,05	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,10	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,15	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,20	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,25	0,0323	0,1700	0,995	0,000	0,000
0,30	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,35	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,40	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,45	0,0325	0,1705	0,998	0,002	0,000
0,50	0,0325	0,1703	0,997	0,003	0,000
0,55	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,60	0,0316	0,1669	0,975	0,000	0,000
0,65	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,70	0,0321	0,1686	0,986	0,000	0,000
0,75	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,80	0,0324	0,1701	0,996	0,000	0,000
0,85	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
0,90	0,0324	0,1701	0,995	0,004	0,001
0,95	0,0326	0,1707	1,000	0,000	0,000
1,00	0,0323	0,1695	0,991	0,009	0,000

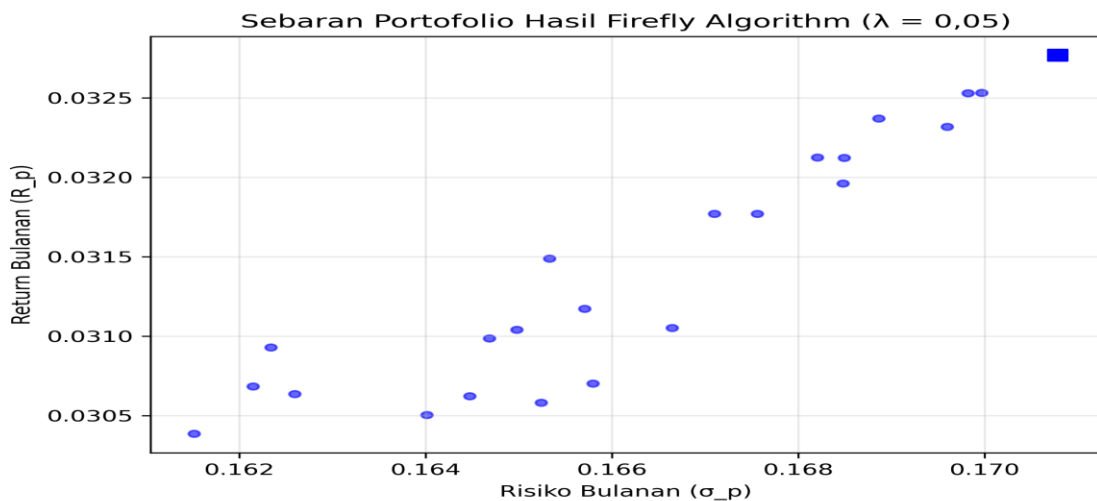
Tabel 3 menunjukkan bahwa, untuk seluruh nilai  $\lambda$ , portofolio optimal sangat didominasi oleh BRIS. Saham ELSA dan PTPP hanya muncul dengan bobot sangat kecil pada beberapa nilai  $\lambda$ . Return dan risiko bulanan portofolio optimal berada pada kisaran sempit di sekitar 3,2% dan 17%. Secara visual, frontier multiobjektif yang dihasilkan tampak sebagai kluster titik yang sangat rapat di sekitar satu koordinat.

**Gambar 1.** Frontier multiobjektif 21 titik portofolio terbaik Firefly Algorithm



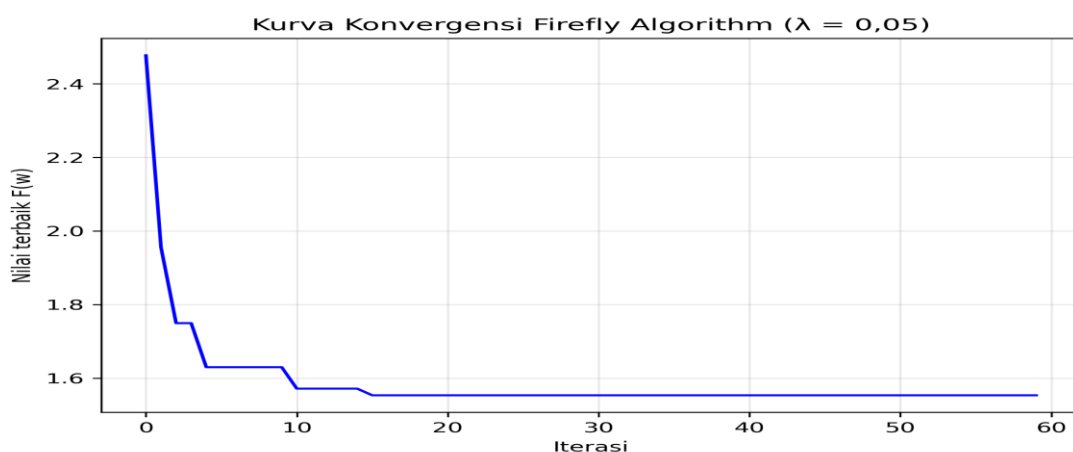
Gambar 1 menggambarkan frontier multiobjektif 21 titik portofolio terbaik untuk berbagai nilai  $\lambda$ . Titik-titik tersebut membentuk kluster yang sangat rapat di sekitar satu area, menunjukkan bahwa perubahan  $\lambda$  tidak menggeser solusi jauh dari portofolio BRIS. Untuk nilai  $\lambda = 0,05$  yang menekankan risiko, FA dijalankan dengan parameter pada Tabel 2. Pada iterasi terakhir, diperoleh sejumlah portofolio kandidat yang tersebar di sekitar satu area pada bidang risiko–return. Sebaran ini digambarkan pada Gambar 2.

**Gambar 2.** Sebaran portofolio kandidat dan portofolio terbaik (FA,  $\lambda = 0,05$ )



Gambar 2 menunjukkan sebaran portofolio kandidat pada iterasi terakhir Firefly Algorithm untuk  $\lambda = 0,05$ . Titik-titik biru merepresentasikan portofolio kandidat, sedangkan kotak biru menunjukkan portofolio terbaik. Hampir seluruh kandidat berkumpul di sekitar solusi terbaik yang sangat dekat dengan profil BRIS, mencerminkan landscape fungsi objektif yang memiliki lembah global yang jelas di sekitar aset tersebut.

**Gambar 3.** Kurva konvergensi nilai terbaik  $F(w)$  Firefly Algorithm



Gambar 3 menunjukkan nilai terbaik fungsi objektif  $F(\mathbf{w})$  pada setiap iterasi hingga  $T_{\max} = 60$ . Kurva konvergensi menurun tajam pada iterasi awal, menunjukkan fase eksplorasi ketika kunang-kunang masih tersebar di ruang solusi. Setelah sejumlah iterasi, penurunan melandai dan akhirnya mencapai plateau, mengindikasikan bahwa FA memasuki fase eksploitasi di sekitar solusi terbaik. Pola ini konsisten dengan sifat umum metaheuristik populasi (Blum & Roli, 2003; Yang, 2010) dan menunjukkan bahwa FA tidak mengalami *premature convergence* yang parah pada konfigurasi parameter ini.

Secara matematis, frontier multiobjektif 21 titik menggambarkan kompromi antara return dan risiko untuk berbagai bobot  $\lambda$ . Namun, pada data IDX–MES BUMN 17 yang digunakan, frontier tersebut secara empiris ‘kolaps’ di sekitar titik portofolio BRIS. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh:

1. **Dominasi return BRIS** dimana BRIS memiliki return ekspektasian bulanan tertinggi di antara 14 saham dengan risiko yang masih sebanding (Tabel 1).
2. **Return negatif saham lain** yaitu banyak saham lain memiliki return ekspektasian negatif, sehingga memasukkan saham-saham tersebut ke dalam portofolio cenderung memperburuk fungsi objektif berbasis kebalikan return.
3. **Tidak adanya kendala diversifikasi eksplisit** dimana model hanya menerapkan *cardinality* maksimum tanpa batas maksimum bobot per saham atau batas minimum bobot per aset. Dalam situasi seperti ini, solusi *mean variance* cenderung sangat terkonsentrasi pada satu atau dua aset dominan (Kolm et al., 2014; DeMiguel et al., 2009).

Dari sudut pandang teori optimisasi, solusi yang terkonsentrasi tersebut adalah sah karena benar-benar meminimalkan fungsi objektif. Namun dari perspektif manajemen risiko dan preferensi investor syariah, portofolio yang “all in” pada satu saham jelas tidak ideal karena menanggung risiko idiosinkratik yang besar. Untuk itu, banyak studi merekomendasikan penambahan kendala diversifikasi eksplisit, seperti batas maksimum bobot per saham (misalnya 20–30%), batas minimum jumlah saham aktif (misalnya  $K_{\min} = 5 - 10$ ), dan kendala *tracking error* terhadap indeks (Jorion, 2003; Lwin et al., 2014).

## CONCLUSION

Penelitian ini mengimplementasikan Firefly Algorithm untuk optimisasi multiobjektif portofolio saham IDX–MES BUMN 17 dalam kerangka *mean variance* dengan kendala *cardinality* maksimum lima saham aktif dan bobot fungsi objektif  $\lambda = 0,05$ . Berdasarkan data historis harga penutupan harian 14 saham BUMN syariah periode September 2019–September 2024 dari Yahoo Finance, beberapa kesimpulan utama dapat ditarik. Pertama, struktur return risiko saham IDX–MES BUMN 17 menampilkan dominasi saham BRIS yang memiliki return ekspektasian bulanan tertinggi dengan risiko yang masih sebanding, sementara banyak saham lain justru memiliki return ekspektasian negatif. Kedua, FA dengan fungsi objektif berbobot  $F(\mathbf{w})$  mampu menemukan solusi yang stabil pada *landscape* non-konveks, tercermin dari kurva konvergensi yang menurun tajam lalu melandai. Ketiga, variasi  $\lambda$  dari 0,05 hingga 1,00 menghasilkan frontier multiobjektif 21 titik yang secara empiris ‘kolaps’ di sekitar portofolio yang hampir seluruh bobotnya ditempatkan pada BRIS, dengan saham lain hanya berkontribusi sangat marginal. Hal ini menunjukkan bahwa, pada dataset dan pemodelan yang digunakan, optimalitas *mean variance* dicapai melalui portofolio yang sangat terkonsentrasi. Keempat, untuk tujuan diversifikasi portofolio syariah yang lebih realistis, model perlu diperkaya dengan kendala tambahan seperti batas maksimum bobot per saham, batas minimum jumlah saham aktif, dan mungkin kendala *tracking error* terhadap indeks. Penelitian lanjutan juga dapat membandingkan kinerja FA dengan metaheuristik lain seperti *genetic algorithm* atau *particle swarm optimization*, serta melakukan pengujian *out-of-sample* untuk menilai robustitas portofolio pada periode pasar yang berbeda.

## REFERENCES

- Bertsimas, D., Pachamanova, D., & Sim, M. (2009). ROBUST LINEAR OPTIMIZATION UNDER GENERAL NORMS. *Operations Research*, 52(1), 21–38.
- Blum, C., & Roli, A. (2003). METAHEURISTICS IN COMBINATORIAL OPTIMIZATION: OVERVIEW AND CONCEPTUAL COMPARISON. *ACM Computing Surveys*, 35(3), 268–308.
- Bodie, Z., Kane, A., & Marcus, A. J. (2014). INVESTMENTS (10th ed.). *McGraw-Hill*.

- Chang, T.-J., Meade, N., Beasley, J. E., & Sharaiha, Y. M. (2000). HEURISTICS FOR CARDINALITY CONSTRAINED PORTFOLIO OPTIMISATION. *Computers & Operations Research*, 27(13), 1271–1302.
- DeMiguel, V., Garlappi, L., & Uppal, R. (2009). OPTIMAL VERSUS NAIVE DIVERSIFICATION: HOW INEFFICIENT IS THE 1/N PORTFOLIO STRATEGY? *Review of Financial Studies*, 22(5), 1915–1953.
- Elton, E. J., Gruber, M. J., Brown, S. J., & Goetzmann, W. N. (2014). MODERN PORTFOLIO THEORY AND INVESTMENT ANALYSIS (9th ed.). *Wiley*.
- Fabozzi, F. J., Gupta, F., & Markowitz, H. M. (2007). THE LEGACY OF MODERN PORTFOLIO THEORY. *The Journal of Investing*, 16(3), 7–22.
- Hakim, S., & Rashidian, M. (2004). HOW COSTLY IS INVESTORS' COMPLIANCE WITH SHARIA? *Economic Research Forum Working Paper*.
- Jorion, P. (2003). PORTFOLIO OPTIMIZATION WITH TRACKING-ERROR CONSTRAINTS. *Financial Analysts Journal*, 59(5), 70–82.
- Kolm, P. N., Tütüncü, R., & Fabozzi, F. J. (2014). 60 YEARS OF PORTFOLIO OPTIMIZATION: PRACTICAL CHALLENGES AND CURRENT TRENDS. *European Journal of Operational Research*, 234(2), 356–371.
- Lwin, K. T., Qu, R., & Kendall, G. (2014). A LEARNING-GUIDED MULTI-OBJECTIVE EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR CONSTRAINED PORTFOLIO OPTIMIZATION. *Applied Soft Computing*, 24, 757–772.
- Majdoub, J., & Mansour, W. (2014). ISLAMIC EQUITY MARKET INTEGRATION AND VOLATILITY SPILLOVER BETWEEN EMERGING AND U.S. STOCK MARKETS. *North American Journal of Economics and Finance*, 29, 452–470.
- Maringer, D., & Kellerer, H. (2003). OPTIMIZATION OF CARDINALITY CONSTRAINED PORTFOLIOS WITH A HYBRID LOCAL SEARCH ALGORITHM. *OR Spectrum*, 25(4), 481–495.
- Markowitz, H. (1952). PORTFOLIO SELECTION. *The Journal of Finance*, 7(1), 77–91.
- Otoritas Jasa Keuangan. (2023). LAPORAN PERKEMBANGAN PASAR MODAL SYARIAH INDONESIA 2023. *Otoritas Jasa Keuangan*.
- Ramshe, N., & Rafiee, M. (2021). A FIREFLY ALGORITHM FOR PORTFOLIO OPTIMIZATION WITH REALISTIC CONSTRAINTS. *International Journal of Finance & Economics*.

- Yang, X.-S. (2009). FIREFLY ALGORITHMS FOR MULTIMODAL OPTIMIZATION. In O. Watanabe & T. Zeugmann (Eds.), *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications* (pp. 169–178). Springer.
- Yang, X.-S. (2010). NATURE-INSPIRED METAHEURISTIC ALGORITHMS (2nd ed.). *Luniver Press*.