

FEKUNDITAS DAN WAKTU PERKEMBANGAN *D. MELANOGASTER* STRAIN *WILDTYPE*, *WHITE*, DAN *EBONY* PADA LINGKUNGAN BERSUHU TINGGI DAN PEMANFAATANNYA SEBAGAI SUMBER BELAJAR PERKULIAHAN GENETIKA

Ika Sukmawati, Aloysius Duran Corebima, Siti Zubaidah
Pendidikan Biologi Pascasarjana-Universitas Negeri Malang
Jalan Semarang 5 Malang. E-mail: ikasukma06@gmail.com

Abstract: This research aim is to show the effect of high temperature (30°C) on the expression of *D. melanogaster* traits and it's use for learning resource in genetics lecture. This research was conducted in experimental design. Research result showed that high temperature could affect the fecundity and developmental time of *D. melanogaster* strains, including *wildtype*, *white*, and *ebony*. This result can be used as learning resource in genetics lecture, particularly in the basic competence 7.1: understanding regulation of gene expression in eukaryotes; and basic competence 13.1: understanding the application of some genetics theory through project research.

Keywords: learning resource, fecundity, developmental time, *D. melanogaster*, strain

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menunjukkan pemanfaatan hasil kajian pengaruh faktor lingkungan berupa suhu tinggi (30°C) terhadap ekspresi sifat *D. melanogaster* sebagai sumber belajar perkuliahan genetika. Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu tinggi berpengaruh terhadap fekunditas serta waktu perkembangan *D. melanogaster* strain *wild type*, *white*, dan *ebony*. Temuan dari penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber belajar yang memuat materi dan pedoman kegiatan praktikum pada perkuliahan Genetika di jenjang S1, khususnya yang berkaitan dengan KD. 7.1 yaitu memahami peristiwa regulasi ekspresi gen pada MH eukariot; dan KD. 13.1 yaitu memahami beberapa teori genetis melalui aplikasi praktik/penelitian proyek.

Kata kunci: sumber belajar, fekunditas, waktu perkembangan, *D. melanogaster*, strain

Matakuliah Genetika merupakan salah satu matakuliah yang wajib ditempuh oleh mahasiswa S1 jurusan Biologi. Berbagai perguruan tinggi memprogramkan matakuliah Genetika pada semester yang berbeda-beda, dengan sks dan jam per semester yang juga berbeda sesuai dengan kurikulum dan kebijakan jurusan pada perguruan tinggi tersebut, serta berdasarkan profil lulusan yang ingin dihasilkan. Profil lulusan jenjang S1 pada setiap perguruan tinggi telah disetarakan sesuai dengan Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia (KKNI) yang diatur pada PP No. 08 Tahun 2012. Berdasarkan level-level pada KKNI, mahasiswa di jenjang S1 berada pada level 6. Pada level tersebut, beberapa kriteria yang sudah harus dikuasai adalah mampu mengaplikasikan bidang keahliannya dan memanfaatkan IPTEK, menguasai konsep bidang pengetahuan secara umum dan konsep teoritis secara khusus secara mendalam serta menyelesaikan permasalahan prosedural. Berdasarkan kriteria-kriteria tersebut, jelaslah bahwa mahasiswa yang telah lulus dari suatu matakuliah di jenjang S1 termasuk juga matakuliah genetika, harus menguasai aspek teoritis (dalam ranah kognitif) maupun aplikasi dari teori-teori tersebut (dalam ranah keterampilan).

Pembelajaran yang ideal adalah pembelajaran yang memungkinkan mahasiswa terlibat secara aktif dalam pembelajaran, baik secara mental maupun fisik. Bukan hanya aspek kognitif yang dikembangkan, namun juga keterampilan dari pebelajar. Perkuliahan Genetika hendaknya dilaksanakan dengan mengkaji materi yang mengacu pada sumber belajar yang relevan, disertai dengan kegiatan praktikum yang sesuai untuk membantu mahasiswa menemukan sendiri konsep yang dipelajari. Melalui belajar penemuan, mahasiswa akan menguasai teori-teori dengan lebih baik karena konsep yang dipelajari menjadi semakin kuat. Kolb (1984) juga mengemukakan proses belajar yang berdasarkan pada pengalaman (*experiential learning*). Berdasarkan teori ini, pengalaman (yang dapat berupa keterampilan-keterampilan tertentu) merupakan sumber dari belajar dan perkembangan seseorang. Selain itu, dalam belajar juga lebih ditekankan pada proses yang dilakukan dalam kegiatan belajar itu, bukan hanya dinilai berdasarkan hasil belajar yang dikuasai.

Berdasarkan observasi yang dilakukan di sejumlah perguruan tinggi Kota Malang, kegiatan praktikum Genetika yang memanfaatkan *D. melanogaster* belum banyak dilakukan. Praktikum yang memanfaatkan *D. melanogaster* untuk mempelajari konsep-konsep genetika baru dilaksanakan di Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang. Di Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang, praktikum Genetika dibagi menjadi praktikum yang dilakukan secara klasikal dan 16 macam praktikum proyek. Praktikum proyek dilakukan dengan melibatkan kelompok kecil beranggotakan dua mahasiswa. Pengerjaan praktikum proyek memerlukan waktu satu semester dan dilakukan secara mandiri oleh mahasiswa melalui konsultasi dengan dosen/asisten mulai dari penyusunan prosedur, pelaksanaan penelitian, pengambilan data, penyusunan laporan, hingga seminar hasil penelitian di depan kelas. Namun demikian, tampaknya pelaksanaan praktikum proyek dengan menggunakan *D. melanogaster* masih belum dapat dilaksanakan di perguruan tinggi lain di Kota Malang karena beberapa keterbatasan. Keterbatasan tersebut ada yang berkaitan dengan tidak adanya kegiatan praktikum pada kurikulum maupun karena tidak adanya sumber belajar yang mendukung pelaksanaan praktikum tersebut.

Tidak adanya kegiatan praktikum yang memanfaatkan *D. melanogaster* dalam perkuliahan Genetika tentu sangat disayangkan, karena *D. melanogaster* merupakan organisme model Genetika yang sangat besar potensinya untuk mengkaji konsep-konsep genetika. *D. melanogaster* telah banyak diteliti sehingga informasi mengenai keadaan genetik, perkembangan, perilaku, fisiologi, maupun ekologiinya sangat mudah didapatkan (Markow dan Grady, 2006). *D. melanogaster* memiliki bermacam-macam strain mutan selain *wild type*, misalnya mutan *white* (warna mata putih) dan *ebony* (warna tubuh hitam) yang mudah diidentifikasi (Chyb dan Gompel, 2012). *D. melanogaster* juga cepat berkembang biak, mudah dipelihara dalam media kultur yang sederhana, dan menghasilkan banyak keturunan dalam sekali bereproduksi sehingga sangat cocok dijadikan organisme untuk kajian genetik (Demerec dan Kaufman, 1996). Hasil atau temuan penelitian eksperimental yang memanfaatkan *D. melanogaster* oleh sebab itu sangat berguna untuk memperkaya suatu sumber belajar pada teori-teori yang berkaitan.

Sebagaimana makhluk hidup lain, ekspresi sifat pada *D. melanogaster* selain ditentukan oleh faktor genotip juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan (Vieria, dkk., 1999; Mackay dan Anholt, 2007). Terkait dengan faktor lingkungan yang memengaruhi ekspresi sifat pada *D. melanogaster*, suhu tinggi telah dilaporkan berkaitan dengan ekspresi sifat fekunditas maupun waktu perkembangan *D. melanogaster*. Fekunditas merupakan kemampuan individu betina untuk menghasilkan telur yang dapat bertahan hidup hingga fase dewasa (Lazzaro dkk., 2008). Penurunan fekunditas telah dilaporkan terjadi pada *D. melanogaster* yang dibiakkan pada lingkungan bersuhu ekstrem (Krebs dan Loeschcke, 1994; Huey, dkk., 1995; Dillon, dkk., 2007).

D. melanogaster memiliki siklus hidup yang terdiri dari fase telur, larva, pupa, hingga imago (Demerec dan Kaufman, 1996). Waktu yang diperlukan untuk melengkapi satu siklus hidup didefinisikan sebagai waktu perkembangan. Chyb dan Gompel (2012) menyatakan bahwa waktu perkembangan *D. melanogaster* dapat bervariasi hingga beberapa hari karena pengaruh suhu lingkungan. Waktu perkembangan *D. melanogaster* telah dilaporkan terjadi lebih cepat pada lingkungan bersuhu tinggi (Dillon dkk., 2007). Paparan suhu tinggi pada *D. melanogaster* dapat diberikan selama beberapa generasi untuk mengetahui pengaruhnya secara lebih jelas dan juga untuk mengetahui adanya kecenderungan adaptasi termal (Huang dkk., 2007; Gilchrist dkk., 1996; Dillon dkk., 2007).

Temuan yang terungkap dari penelitian pengaruh faktor lingkungan berupa suhu tinggi terhadap ekspresi sifat pada *D. melanogaster* dapat dikaitkan dengan salah satu materi perkuliahan Genetika yaitu Regulasi Ekspresi Gen pada Makhluk Hidup Eukariot. Mengacu pada silabus dan RPS perkuliahan Genetika II di Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang, materi Regulasi Ekspresi Gen pada Makhluk Hidup Eukariot dipelajari untuk mencapai Kompetensi Dasar (KD) 7.1 yaitu memahami peristiwa regulasi ekspresi gen pada makhluk hidup eukariot. Indikator yang dituju dari penurunan KD 7.1 ini adalah mahasiswa mampu menjelaskan peranan faktor lingkungan dalam proses regulasi ekspresi gen pada eukariot. Hasil penelitian juga berkaitan dengan KD pada ranah keterampilan yaitu KD 13.1 memahami beberapa teori genetis melalui aplikasi praktik/penelitian proyek. Hasil penelitian pengaruh suhu tinggi terhadap ekspresi sifat fekunditas dan waktu perkembangan pada *D. melanogaster* dengan demikian dapat dijadikan dasar untuk penyusunan sumber belajar yang menunjang perkembangan aspek kognitif maupun keterampilan mahasiswa.

Sumber belajar atau *learning resource* merupakan segala sesuatu yang dapat digunakan untuk belajar. Sumber belajar tidak terbatas pada buku, melainkan meliputi segala informasi yang terdapat pada berbagai bentuk media. Sumber belajar juga dapat berupa orang, benda, pesan, bahan, teknik, dan latar (Liandiani, 2008). Menurut Wisdom dan Gibbs (1994) sumber belajar dibagi menjadi empat macam, meliputi sumber belajar yang mengajarkan isi pelajaran, sumber belajar yang sifatnya membangun sumber lain, sumber belajar yang mendukung aktivitas belajar, dan sumber belajar yang mendukung proses belajar. Di antara macam-macam sumber belajar tersebut, sumber belajar yang sifatnya membangun sumber lain juga mencakup *course guide* (pedoman pembelajaran). Struktur *course guide* ini juga memungkinkan untuk disisipi aktivitas-aktivitas laboratoris. Pada bagian ini hasil penelitian eksperimental dapat dikaitkan dengan materi pembelajaran, dengan dilengkapi petunjuk pelaksanaan aktivitas laboratorium atau praktikum tersebut.

Dengan demikian, penelitian eksperimental yang memanfaatkan *D. melanogaster* khususnya pada topik pengaruh suhu lingkungan terhadap ekspresi sifat *D. melanogaster* dapat dimanfaatkan sebagai dasar penyusunan sumber belajar perkuliahan Genetika di perguruan tinggi. Dengan adanya sumber-sumber belajar berbasis hasil penelitian, perguruan tinggi yang masih membutuhkan bahan ajar Genetika yang dilengkapi dengan panduan aktivitas praktikum juga akan semakin terbantu.

METODE

Penelitian ini dilakukan dengan desain eksperimental. Penelitian ini menggunakan *D.melanogaster* strain wild type, white, dan ebony yang diperoleh dari biakan *D. melanogaster* laboratorium genetika Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang. Individu virgin *D. melanogaster* disilangkan dalam botol selai bervolume 200 ml yang berisi medium. Medium dibuat dari bahan dasar pisang, tape singkong, dan gula merah dengan perbandingan berat 7:2:1 yang ditambah dengan fermipan (*yeast*). Persilangan yang dilakukan adalah tipe persilangan homogami yaitu ♂*wildtype*×♀*wildtype*, ♂*white*×♀*white*, dan ♂*ebony*×♀*ebony*.

D. melanogaster yang disilangkan dipaparkan pada suhu konstan 30°C di dalam sebuah inkubator. Sementara itu, satu kelompok *D.melanogaster* disilangkan pada suhu normal yang berfluktuasi mengikuti kondisi suhu lingkungan sekitar (25-30°C) dengan tipe persilangan yang sama. Data yang diukur meliputi fekunditas dan waktu perkembangan. Fekunditas diukur melalui penghitungan jumlah keturunan dalam fase dewasa yang menetas pada setiap persilangan. Waktu perkembangan ditentukan berdasarkan waktu yang diperlukan *D. melanogaster* untuk berkembang sejak fase telur hingga penetasan pupa menjadi dewasa yang pertama, yang dinyatakan dalam satuan hari. Data yang berhasil dikumpulkan pada persilangan *D. melanogaster* di lingkungan bersuhu tinggi diperbandingkan dengan data hasil persilangan *D. melanogaster* pada suhu normal dan dideskripsikan.

Keterkaitan hasil penelitian dengan perkuliahan Genetika dilakukan dengan menganalisis kurikulum pada matakuliah Genetika di sejumlah perguruan tinggi Kota Malang. Analisis kurikulum dilakukan dengan mencermati Kompetensi Dasar pada silabus dan Rencana Perkuliahan Semester (RPS) Genetika. Setelah ditemukan KD yang sesuai, dilakukan telaah pada indikator kompetensi dan materi ajar. Setelah analisis komponen-komponen pada kurikulum tersebut dilakukan, maka dapat dilakukan integrasi hasil penelitian dalam materi ajar maupun sebagai dasar penyusunan kegiatan praktikum mahasiswa.

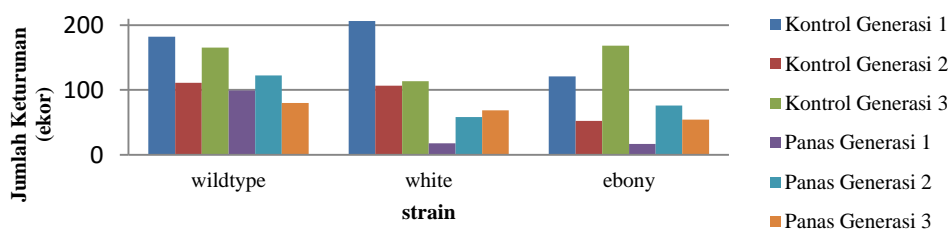
HASIL

Berdasarkan persilangan yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa fekunditas dan waktu perkembangan *D. melanogaster* dipengaruhi oleh suhu lingkungan. Dibandingkan pada lingkungan bersuhu normal, jumlah keturunan yang menggambarkan fekunditas *D. melanogaster* cenderung mengalami penurunan pada lingkungan bersuhu 30°C. Tabel 1 menunjukkan rerata jumlah keturunan *D. melanogaster* selama 3 generasi pada lingkungan dengan suhu yang berbeda.

Tabel 1. Rerata Jumlah Keturunan *D. melanogaster* Pada Lingkungan Bersuhu Tinggi (30°C) dan Kontrol

Strain	Generasi	Rerata Jumlah Keturunan (ekor)	
		Suhu Normal	Suhu Tinggi
<i>wild type</i>	1	182,33	99,33
	2	111,00	122,33
	3	165,33	79,67
<i>white</i>	1	206,33	17,33
	2	106,33	58,33
	3	113,33	68,33
<i>ebony</i>	1	121,00	16,67
	2	52,00	75,67
	3	168,33	54,00

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa pada lingkungan bersuhu tinggi strain *wildtype* memiliki rerata jumlah keturunan yang lebih tinggi dibandingkan strain *white* maupun *ebony*. Pada generasi pertama yang dipaparkan dengan suhu tinggi, terlihat bahwa strain *wildtype*, *white*, maupun *ebony* mengalami penurunan dibandingkan generasi pertama pada lingkungan bersuhu normal, dengan persentase penurunan secara berturut-turut 45,52%, 91,6%, dan 86,23%. Namun demikian, pada generasi ke dua dari masing-masing strain, mulai terjadi peningkatan jumlah keturunan hingga ke generasi ke tiga. Kecenderungan jumlah keturunan *D. melanogaster* pada suhu tinggi dan kontrol dapat dilihat pada Gambar 1.



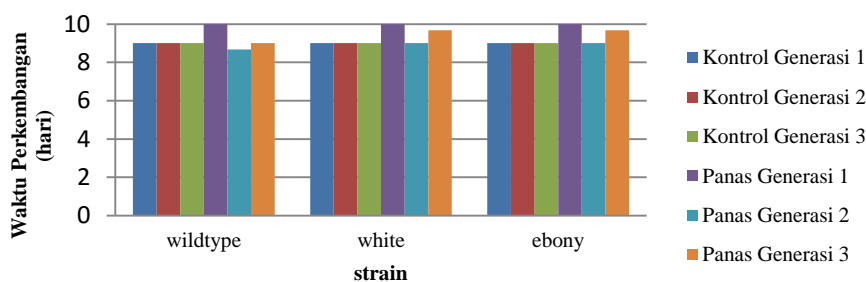
Gambar 1. Grafik Jumlah Keturunan *D. melanogaster* Strain *wildtype*, *white*, dan *ebony* pada Lingkungan Bersuhu Normal dan Panas pada Tiga Generasi

Sementara itu, waktu perkembangan *D. melanogaster* juga menunjukkan perubahan antara lingkungan yang bersuhu normal dan lingkungan bersuhu tinggi. Pada ketiga strain yang digunakan, rerata waktu perkembangan generasi pertama pada lingkungan bersuhu tinggi menjadi lebih lambat dibandingkan lingkungan bersuhu normal. Waktu perkembangan pada generasi ke dua dan ke tiga mulai menunjukkan percepatan, hingga menyamai waktu perkembangan pada kelompok kontrol. Tabel 2 menunjukkan rerata waktu perkembangan *D. melanogaster* pada suhu lingkungan yang berbeda.

Tabel 2. Rerata Waktu Perkembangan *D. melanogaster* Pada Lingkungan Bersuhu Tinggi (30°C) dan Kontrol

Strain	Generasi	Rerata Waktu Perkembangan (hari)	
		Suhu Normal	Suhu Tinggi
<i>wild type</i>	1	9	10
	2	9	8,67
	3	9	9
<i>White</i>	1	9	10
	2	9	9
	3	9	9,67
<i>Ebony</i>	1	9	10
	2	9	9
	3	9	9,67

Berdasarkan Tabel 2, perlambatan waktu perkembangan pada generasi 1 strain *wildtype*, *white*, dan *ebony* adalah sebesar 11,11%, pada generasi-generasi berikutnya rerata waktu perkembangan mulai mengalami percepatan dengan strain *wildtype* sebesar 3,67%, sedangkan pada strain *white* dan *ebony* memiliki rerata waktu perkembangan yang sama dengan kontrol. Namun waktu perkembangan mengalami perlambatan kembali pada generasi ke tiga, yaitu strain *wildtype* sebesar 3,67%, dan 7,4% pada strain *white* dan *ebony*. Kecenderungan rerata waktu perkembangan ketiga strain pada tiga generasi persilangan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Waktu Perkembangan *D. melanogaster* Strain *wildtype*, *white*, dan *ebony* pada Lingkungan Bersuhu Normal dan Panas pada Tiga Generasi

Hasil telaah pada kurikulum yang dilakukan terhadap Silabus Perkuliahan Genetika II Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang menunjukkan bahwa pada matakuliah Genetika II, terdapat dua KD yang berkaitan dengan hasil penelitian yang telah diperoleh. Kedua KD tersebut salah satunya berkaitan dengan aspek kognitif dan salah satu yang lainnya berkaitan dengan aspek keterampilan. KD yang berkenaan dengan aspek kognitif yaitu KD 7.1. Jika KD 7.1 ini diturunkan menjadi indikator-indikator kompetensi dan materi pembelajaran, hasil penelitian secara spesifik terkait dengan salah satu indikator yaitu menjelaskan peranan faktor lingkungan dalam proses regulasi ekspresi gen makhluk hidup eukariot. Hasil penelitian tentang pengaruh faktor lingkungan berupa suhu tinggi terhadap ekspresi sifat fekunditas dan waktu perkembangan *D. melanogaster* dapat dijadikan dasar penyusunan materi pembelajaran untuk membantu mahasiswa mencapai indikator tersebut.

KD yang berkaitan dengan aspek keterampilan yaitu KD 13.1. Pada KD ini, teori-teori genetika yang berkaitan dengan regulasi ekspresi gen makhluk hidup eukariot dapat diterapkan mahasiswa pada kegiatan praktikum atau penelitian proyek. Prosedur kerja penelitian yang telah dilakukan dapat menjadi dasar untuk pedoman pelaksanaan praktikum yang dapat dimasukkan dalam sumber belajar sehingga pelaksana perkuliahan Genetika dapat terbantu dalam melaksanakan kerja praktikum atau penelitian.

PEMBAHASAN

Suhu lingkungan merupakan salah satu faktor abiotik yang berperan besar dalam kehidupan serangga, termasuk *D. melanogaster*. Suhu lingkungan berkaitan dengan kelimpahan spesies dan distribusi serangga, serta berperan sebagai faktor penyeleksi variasi genetik pada populasi alaminya (Bouletreau-Merle dan Sillans, 1996; Ayrinhac dkk. (2004). Berkaitan dengan hal tersebut, *hotspot* keanekaragaman serangga ditemukan pada daerah tropis, dan semakin ke daerah kutub jumlah spesies serangga mengalami penurunan (Feldmeyer, 2009).

D. melanogaster memiliki preferensi suhu tertentu untuk bertahan hidup. Tingkat toleransi suhu tertinggi pada *D. melanogaster* yang dipaparkan secara konstan dilaporkan sebesar 30°C (Demerec dan Kaufman, 1996). Hasil-hasil penelitian yang lain menunjukkan bahwa paparan suhu 29°C sudah bersifat *stressful* bagi *D. melanogaster* (D'Avila dkk., 2008; Gilchrist dan Huey, 2010; Sambucetti, dkk., 2013; Chen, dkk., 2015; Pedersen, dkk., 2011a). Namun, paparan pada suhu yang lebih ekstrem dapat memberikan efek yang lebih negatif pada sifat-sifat yang dipengaruhi (Dillon dkk., 2007), sehingga paparan pada suhu 30°C akan menunjukkan pengaruh yang lebih nyata. Suhu tinggi yang dipaparkan secara terus-menerus dapat memengaruhi berbagai sifat pada *D. melanogaster*. Di antara sifat-sifat tersebut, ada pula sifat yang berkaitan dengan *life history* serta penentu *fitness*. Sifat-sifat tersebut meliputi banyaknya keturunan, waktu perkembangan, dan pola aktivitas (Feldmeyer, 2009).

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, dapat diketahui bahwa pada suhu tinggi fekunditas *D. melanogaster* strain *wildtype*, *white*, dan *ebony* cenderung mengalami penurunan. Penurunan fekunditas pada suhu tinggi ditunjukkan dengan jumlah keturunan generasi pertama yang berkurang dibandingkan dengan jumlah keturunan pada kondisi normal. Penurunan fekunditas dapat dijelaskan melalui beberapa sebab. Salah satu di antaranya adalah gangguan pematangan telur yang dihasilkan pada persilangan pada lingkungan bersuhu tinggi. Pematangan telur serangga memiliki ketergantungan pada temperatur, begitu juga dengan peletakan telur oleh betina yang memerhatikan rentang suhu tertentu (Berger dkk., 2008). Pada lingkungan bersuhu panas, kerusakan dapat terjadi pada individu yang sedang berkembang, yang berkaitan dengan kejadian denaturasi protein, perubahan transisi fase, serta perubahan potensial membran (Marshall dan Sinclair, 2009). Kerusakan yang terjadi menyebabkan perkembangan telur terhenti dan mati sebelum dapat berkembang menjadi dewasa.

Penurunan fekunditas betina dan kemampuan kawin pada jantan juga dapat menjelaskan penurunan jumlah keturunan *D. melanogaster* pada lingkungan bersuhu tinggi. Krebs dan Loeschcke (1994) melaporkan bahwa paparan jangka pendek terhadap suhu tinggi saja telah dapat berpengaruh pada komponen *fitness D. melanogaster* yang di antaranya meliputi penurunan frekuensi perkawinan dan fekunditas betina. Pada penelitian ini *D. melanogaster* kelompok perlakuan dipelihara sejak telur hingga dewasa dan melakukan perkawinan pada lingkungan bersuhu panas, dengan kata lain paparan stress termal diberlakukan dalam jangka panjang. Huey dkk. (1995) mengemukakan bahwa tingkat fekunditas calon *Drosophila* betina dapat dipengaruhi sejak awal perkembangannya oleh suhu, yaitu sejak fase telur diletakkan oleh induk. Betina yang berkembang dalam suhu ekstrem biasanya lebih rendah fekunditasnya karena tingkat oogenesis yang rendah. Rendahnya tingkat oogenesis dipengaruhi oleh aktivitas gen *heat shock* yang berkaitan dengan reproduksi dan fekunditas, yaitu *Hsp83*. *Hsp83* berperan penting dalam proses oogenesis maupun spermatogenesis. Gen *Hsp83* mengatur jalur molekuler oogenesis melalui protein-protein yang dihasilkannya. Selain itu, RNA *Hsp83* merupakan komponen dari posterior polar plasm. Penurunan tingkat spermatogenesis juga dapat berakibat pada penurunan kemampuan kawin hingga sterilitas pada jantan (Demerec dan Kaufman, 1996; Pedersen dkk., 2011).

Namun demikian, berdasarkan data yang didapatkan dari generasi ke dua dan ke tiga, baik pada strain *wildtype* maupun *white* dan *ebony* pada lingkungan bersuhu 30°C, mulai terlihat adanya penyesuaian atau adaptasi yang ditunjukkan dengan peningkatan jumlah keturunan. Adaptasi termal yang berkaitan dengan jumlah keturunan dilakukan oleh *D. melanogaster* pada lingkungan yang kurang menguntungkan, seperti yang dikemukakan oleh Dillon dkk. (2007).

Waktu perkembangan generasi pertama *D. melanogaster* pada suhu tinggi menunjukkan perlambatan 1 hari dibandingkan dengan kelompok kontrol. Rerata waktu perkembangan yang terjadi pada *D. melanogaster* adalah sekitar 10 hari, dengan rincian tahap embrio dilalui selama 1 hari, larva instar 1 dan 2 selama masing-masing 1 hari, larva instar 3 selama 3 hari, pupa selama 4 hari, dan kemudian fase dewasa (Chyb dan Gompel, 2013). Namun, waktu perkembangan tersebut adalah waktu perkembangan yang terjadi pada suhu ruang 25°C. Waktu perkembangan dapat berubah akibat dari perubahan suhu lingkungan.

Perubahan rerata waktu perkembangan pada lingkungan bersuhu tinggi menunjukkan bahwa waktu perkembangan yang telah terprogram oleh individu *D. melanogaster* dapat pula dipengaruhi oleh faktor lingkungan berupa temperatur. Sebagai suatu sifat yang terekspresi, waktu perkembangan tentu memiliki dasar pengontrolan genetik. Pengontrolan lama perkembangan telah terjadi sejak tahap perkembangan embrionik (do Nascimento dkk., 2002), serta berkaitan dengan seberapa cepat penuaan datang dan *longevity* suatu individu (Paaby dan Schmidt, 2009). Namun demikian, sejalan dengan pernyataan Allis dkk. (2007), stimulus lingkungan yang tepat dapat memprogram ulang perkembangan organisme.

Perlambatan rerata waktu perkembangan pada lingkungan bersuhu tinggi yang didapatkan tampak bertentangan dengan hasil sejumlah penelitian, seperti yang dilakukan oleh Dillon dkk. (2007) serta Paaby dan Schmidt (2009). Umumnya, perkembangan lebih lambat akan terjadi pada *D. melanogaster* yang dipaparkan pada suhu dingin (Demerec dan Kaufman, 1996). Perbedaan hasil ini diduga terjadi akibat jumlah ulangan yang kurang, kurang banyaknya data generasi sehingga kecenderungan waktu perkembangan tidak teramati, atau akibat skala pencatatan waktu perkembangan yang dinyatakan dalam satuan hari sehingga didapatkan akurasi yang kurang. Namun demikian, berdasarkan data generasi ke dua dan tiga, mulai terjadi

percepatan rerata waktu perkembangan hingga hampir menyamai rerata waktu perkembangan pada kondisi normal. Adanya percepatan tersebut dapat terjadi sebagai suatu mekanisme adaptasi dan regulasi termal pada lingkungan yang tidak menguntungkan, seperti yang diindikasikan oleh Huang dkk. (2007) Gilchrist dkk., (1996) Dillon dkk. (2007).

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, diperoleh gambaran bahwa faktor lingkungan termasuk juga suhu tinggi dapat menjadi faktor yang mengatur ekspresi sifat makhluk hidup. Dengan demikian, tidak hanya faktor genotip yang menentukan ekspresi sifat pada suatu individu, melainkan interaksi antara faktor genotip dan faktor lingkungan (Mackay dan Anholt, 2007). Faktor lingkungan dapat menjadi suatu faktor yang berperan dalam pengaturan atau regulasi ekspresi gen pada makhluk hidup eukariot di samping faktor biologis atau hormonal (Snustad dan Simmons, 2012). Pada perkuliahan Genetika, materi Regulasi Ekspresi Gen pada Makhluk Hidup Eukariot dipelajari dalam membantu mahasiswa mencapai Kompetensi Dasar yang telah ditetapkan dalam kurikulum, yaitu KD 7.1: Memahami peristiwa regulasi ekspresi gen pada makhluk hidup eukariot. Selain KD 7.1, kompetensi dasar lain di ranah keterampilan juga berkaitan dengan topik ini, yaitu KD 13.1: Memahami beberapa teori genetis melalui aplikasi praktik/penelitian proyek.

Berkaitan dengan pelaksanaan praktikum atau penelitian proyek, aktivitas praktikum proyek yang memanfaatkan *D. melanogaster* untuk mengaplikasikan teori-teori atau konsep genetika telah dilaksanakan di Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang. Namun, pada beberapa perguruan tinggi lain di Kota Malang yang telah diobservasi, belum ada aktivitas praktikum mahasiswa untuk matakuliah Genetika yang memanfaatkan *D. melanogaster*, khususnya pada Materi Regulasi Ekspresi Gen pada Makhluk Hidup Eukariot. Ketiadaan aktivitas praktikum sangat disayangkan, karena aktivitas praktikum dapat mengembangkan aspek psikomotor atau keterampilan mahasiswa dalam merancang, melaksanakan, maupun melaporkan hasil penelitian yang berkaitan dengan konsep Genetika. Tidak adanya aktivitas praktikum pada beberapa perguruan tinggi tersebut juga disebabkan karena keterbatasan sumber belajar yang memuat panduan aktivitas praktikum atau proyek. Dengan demikian, sumber belajar yang lengkap dan operasional sangat dibutuhkan dalam perbaikan pelaksanaan perkuliahan Genetika di beberapa perguruan tinggi tersebut.

Hasil penelitian yang telah dilaksanakan dapat dijadikan dasar untuk penyusunan sumber belajar yang dibutuhkan. Pengertian sumber belajar bukanlah sebatas pada buku pelajaran saja. Liandiani (2008) telah menyebutkan bahwa segala bentuk sumber informasi yang dapat digunakan siswa untuk membantu kegiatan belajarnya dapat dikategorikan sebagai sumber belajar; baik itu berupa orang, benda, pesan, bahan, teknik, dan latar. Wisdom dan Gibbs (1994) mengategorikan sumber belajar menjadi empat macam, yaitu sumber belajar yang mengajarkan isi pelajaran, sumber belajar yang sifatnya membangun sumber lain, sumber belajar yang mendukung aktivitas belajar, dan sumber belajar yang mendukung proses belajar.

Matakuliah Genetika di berbagai perguruan tinggi termasuk juga Universitas Negeri Malang telah menggunakan sumber berupa buku teks dalam aktivitas perkuliahan. Macam-macam sumber belajar yang digunakan telah mengandung sejumlah konsep genetika yang dapat membantu mahasiswa menguasai KD-KD yang ditentukan. Namun, seringkali dalam pembelajaran diperlukan pula suatu sumber belajar yang sifatnya menguatkan sumber belajar yang telah digunakan. Di antara macam-macam sumber belajar yang dikemukakan oleh Wisdom dan Gibbs (1994), salah satu sumber belajar yang sifatnya membangun sumber lain adalah *course guide* (pedoman pembelajaran). *Course guide* yang juga disebut sebagai *study guide* berperan sebagai kerangka komprehensif yang membimbing siswa menjalani pembelajaran. Struktur *course guide* menurut Wisdom dan Gibbs (1994) mencakup unsur-unsur berikut:

1. tujuan dan hasil pembelajaran yang akan dicapai;
2. rangkuman dari isi materi pembelajaran;
3. petunjuk yang mengaitkan materi pembelajaran dengan materi-materi lain;
4. deskripsi tentang bagaimana pembelajaran disusun dan dilakukan, lengkap dengan informasi alokasi waktu yang disediakan;
5. mengandung sejumlah deskripsi tentang berbagai aktivitas pembelajaran mencakup perkuliahan, presentasi (seminar), *workshop*, ataupun kerja laboratoris;
6. informasi tentang sejumlah sumber lain yang dapat digunakan yang mencakup sumber cetak ataupun elektronik;
7. informasi tentang penilaian;
8. pedoman belajar.

Hasil penelitian yang telah dilakukan tentang pengaruh faktor lingkungan terhadap ekspresi sifat pada *D. melanogaster* tentunya akan sangat bermanfaat jika diintegrasikan ke dalam sumber belajar dengan karakteristik semacam *course guide* ini. Informasi tentang mekanisme regulasi ekspresi gen yang berkaitan dengan fekunditas dan waktu perkembangan oleh suhu tinggi dapat memperkaya informasi pada bagian isi materi pembelajaran, sedangkan metode penelitian dan hasil penelitian dapat dimanfaatkan sebagai dasar panduan kerja laboratoris mahasiswa. Pada bagian ini, mahasiswa dapat dibimbing untuk merumuskan topik penelitian, memperinci alat dan bahan yang diperlukan, menyusun prosedur kerja, mengumpulkan data, hingga menyusun laporan penelitian dan mempresentasikannya.

Adanya kerja penelitian semacam praktikum proyek yang sudah dilaksanakan di Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang penting untuk digiatkan pada perguruan tinggi yang belum melaksanakannya. Kerja praktikum proyek biasanya dilaksanakan dalam pembelajaran berbasis proyek (PjBL). Partnership for 21st Century Skills (2003) menyatakan bahwa pada masa kini, siswa harus sudah terbiasa dengan tanggung jawab, pengambilan keputusan, kerja tim, pemecahan masalah, dan juga pekerjaan berbasis proyek. Sejalan dengan tuntutan-tuntutan ini, Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia (KKNI) untuk level 6 (S1) juga menegaskan agar mahasiswa pada tingkatan ini telah dapat bertanggung jawab pada pekerjaan sendiri dan dapat diberi

tanggung jawab atas capaian hasil kerja kelompok atau organisasi. Guna tercapainya tujuan-tujuan ini, kerja praktikum yang diintegrasikan dalam perkuliahan untuk membangun konsep-konsep Genetika harus mulai dibudayakan. Pemanfaatan hasil penelitian menjadi dasar penyusunan sumber belajar dapat menjadi suatu langkah awal untuk memfasilitasi tercapainya perkuliahan Genetika yang lebih baik.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, ekspresi sifat fekunditas dan waktu perkembangan *D. melanogaster* berkaitan dengan faktor lingkungan, yaitu suhu tinggi (30°C). Pada suhu tinggi, fekunditas ketiga strain *D. melanogaster* yang disilangkan, yaitu *wildtype*, *white*, dan *ebony* menunjukkan penurunan dibandingkan pada suhu normal, secara berturut-turut 45,52%, 91,6%, dan 86,23%. Fekunditas tertinggi dimiliki oleh strain *wildtype*, sedangkan yang terendah dimiliki oleh strain *white*. Peningkatan fekunditas sebagai suatu bentuk penyesuaian mulai terjadi pada generasi 2 hingga 3. Sedangkan, waktu perkembangan generasi 1 dari *D. melanogaster* yang disilangkan pada suhu tinggi menunjukkan perlambatan sebesar 11,11% dari kontrol untuk ketiga strain, dan mengalami percepatan kembali hingga hampir menyamai kelompok kontrol pada generasi 2 dan 3.

Hasil penelitian dapat dimanfaatkan sebagai dasar penyusunan sumber belajar Genetika di jenjang S1 Jurusan Biologi. Hasil penelitian berkaitan dengan KD 7.1 dan 13.1 yang tercantum pada Silabus Perkuliahan Genetika II Jurusan Biologi Universitas Negeri Malang. Hasil penelitian dapat memperkaya informasi pada materi Regulasi Ekspresi Gen pada Makhluk Hidup Eukariot khususnya yang berkaitan dengan peranan faktor lingkungan dalam proses regulasi ekspresi gen eukariot. Hasil penelitian juga bermanfaat dalam penyusunan pedoman aktivitas praktikum atau penelitian proyek yang terintegrasi dalam sumber belajar yang dapat membantu mahasiswa mengembangkan keterampilan dalam merancang dan melaksanakan penelitian proyek.

Saran

Melalui hasil penelitian yang diperoleh, pemeliharaan biakan strain *wildtype* maupun mutan *D. melanogaster* hendaknya dilakukan dengan memerhatikan kondisi suhu lingkungan agar didapatkan kondisi biakan yang paling baik. Kondisi suhu lingkungan yang memungkinkan fekunditas tertinggi dalam penelitian ini adalah pada suhu ruangan (25-30°C). Selain itu, pemeliharaan mutan *D. melanogaster* hendaknya dilakukan lebih intensif dibandingkan *wildtype* karena lebih rentan pada pengaruh suhu tinggi. Berkaitan perkuliahan Genetika, penelitian-penelitian lain yang memanfaatkan *D. melanogaster* hendaknya digalakkan sehingga dapat memperkaya informasi dalam sumber belajar dan juga aktivitas mahasiswa.

DAFTAR RUJUKAN

- Allis, C.D., Jenuwein, T., dan Reinberg, D. 2007. *Overview and Concepts, Epigenetics*. Cold Spring Harbor Laboratory Press: 23—62.
- Ayrinhac, A., Debat, V., Gilbert, P., Kister, A. G., Legout, H., Moreteau, B., Vergilino, R., dan David, J. R. 2004. Cold Adaptation in Geographical Populations of *Drosophila melanogaster*: Phenotypic Plasticity is More Important than Genetic Variability. *Functional Ecology* 18: 700—706.
- Berger, D., Walters, R., dan Gotthard, K. 2008. What Limits Insect Fecundity? Body Size and Temperature-Dependent Egg Maturation and Oviposition in a Butterfly. *Functional Ecology* 22: 523—529.
- Bouletreau-Merle, J. dan Sillans, D. 1996. Effects of Interaction Between Temperature and CO₂ on Life-History Traits of Two *Drosophila* Species (Diptera: Drosophilidae). *Eur. J. Entomol.* 93: 451—459.
- Chen, J., Nolte, V., dan Schlotterer, C. 2015. *Temperature Related Reaction Norms of Gene Expression: Regulatory Architecture and Functional Implications*. (Online). <http://mbe.oxfordjournals.org/>, diakses 23 Juli 2015.
- Chyb, S. dan Gompel, N. 2013. *Atlas of Drosophila Morphology: Wild-type and Classical Mutants*. London: Elsevier Inc.
- D'Avila, M. F. D., Garcia, R. N., Loreto, E. L., dan da S. Valente, V. L. 2008. Analysis of Phenotypes Altered by Temperature Stress and Hypermutability in *Drosophila willistoni*. *Iheringia, Sér. Zool., Porto Alegre*, 98(3):345-354.
- Demerec, M. dan Kaufman, B. P. 1996. *Drosophila Guide: Introduction to The Genetics and Cytology of Drosophila melanogaster, Tenth Edition*. Washington D. C: Carnegie Institution of Washington.
- Dillon, M. E., Cahn, L. R. Y, dan Huey, R. B. 2007. Life History Consequences of Temperature Transients in *Drosophila melanogaster*. *The Journal of Experimental Biology* 210: 2897—2904.
- do Nascimento, J. C., da Cruz, I. B. M., Monjelo, L. A., dan Oliveira, A. K. 2002. Genetic Components Affecting Embryonic Developmental Time of *Drosophila melanogaster*. *Genetics and Molecular Biology* Vol.25 (2): 157—160.
- Feldmeyer, B. V. 2009. *The Effect of Temperature on Sex Determination*. PhD Thesis dipublikasikan (Online). http://www.rug.nl/research/institute-evolutionary-life-sciences/tres/_pdf/thesis_feldmeyer_09.pdf, diakses 8 November 2015.

- Gilchrist, G. W., dan Huey, R. B. 2010. Parental and Developmental Temperature Effects on The Thermal Dependence of Fitness in *Drosophila melanogaster*. *Evolution* 55 (1): 209—214.
- Huang, L.B., Chen, B., dan Kang, L. 2007. Impact of Mild Temperature Hardening on Thermotolerance, Fecundity, and Hsp Gene Expression in *Liriomyza huidobrensis*. *Journal of Insect Physiology* 53: 1199—1205 .
- Huey, R. B., Wakefield, T., Crill, W. D., dan Gilchrist, G. W. 1995. Within-and Between-Generation Effects of Temperature on Early Fecundity of *Drosophila melanogaster*. *Heredity* 74 (1995): 216—223.
- Kolb, D.A. 1984. *Experiential Learning: Experience as The Source of Learning and Development*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Krebs, R.A. dan Loeschcke, V. 1994. Effects of Exposure to Short-Term Heat Stress on Fitness Components in *Drosophila melanogaster*. *J. Evol. Biol* 7 (1994):39-49.
- Lazzaro, B. P., Flores, H. A., Lorigan, J. G., dan Yourth, C. P. 2008. *Genotype-by-Environment Interactions and Adaptation to Local Temperature Affect Immunity and Fecundity in Drosophila melanogaster*. *PLoS Pathog* 4(3): e1000025. doi:10.1371/journal.ppat.1000025.
- Liandiani. 2008. *Pengembangan Sumber Belajar*. (Online). (<https://sumsel.kemenag.go.id/file/dokumen/pengembangansumberbelajar.pdf>). diakses 4 Juni 2016.
- Mackay, T. F. C. dan Anholt, R. R. H. 2007. Ain't Misbehavin'? Genotype-Environment Interactions and The Genetics of Behavior. *TRENDS in Genetics* Vol. 23 No. 27.
- Marshall, K. E. dan Sinclair, B. J. 2009. Repeated Stress Exposure Results in a Survival-Reproduction Trade-Off in *Drosophila melanogaster*. *Proceedings of The Royal Society B* (2010) 277: 963—969.
- Paaby, A. B. dan Schmidt, P. S. 2009. *Dissecting the Genetics of Longevity in Drosophila melanogaster*. (Online). <http://www.landesbioscience.com/journals/fly/article/7771>. Diakses tanggal 8 November 2015.
- Partnership for 21st Century Skills. 2003. *Learning for the 21st Century*. (Online). <http://www.smlcs.org/publications/21stcenturyeducation.pdf>. Diakses tanggal 4 Juni 2016.
- Pedersen, L. D., Pedersen, A. R., Bijlsma, R., dan Bundgaard, J. 2011. The Effects of Inbreeding and Heat Stress on Male Sterility in *Drosophila melanogaster*. *Biological Journal of the Linnean Society*, 104: 432—442.
- Sambucetti, P., Scannapieco, A. C., Loeschcke, V., dan Norry, F. M. 2013. Heat-Stress Survival in The Pre-Adult Stage of The Life Cycle in an Intercontinental Set of Recombinant Inbred Lines of *Drosophila melanogaster*. *The Journal of Experimental Biology* 216: 2953—2959.
- Sinclair, B. J. 2001. Field Ecology of Freeze Tolerance: Inter Annual Variation in Cooling Rates, Freeze-thaw and Thermal Stress in the Microhabitat of the Alpine Cockroach *Celatoblatta quinque-maculata*. *Oikos* 93, 286—293.
- Snustad, D. P. dan Simmons, M. J. 2012. *Principles of Genetics Sixth Edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Wisdom, J. dan Gibbs, G. 1994. *Course Design for Resource Based Learning in The Humanities*. Oxford: Oxford Centre for Staff Development.