



GENETIKA BENTUK BUAH CABAI

Penulis:

Prof. Dr. Ir. Estri Laras Arumingtyas, MSc.St.

ISBN 978-621-8438-04-0

Copyright© (2025)

All rights reserved.

No part of this book may be reproduced or used in any manner without the prior written permission of the copyright owner, except for the use of brief quotations. To request permissions, contact the publisher at (editor.ijmaber@futuresciencepress.com)

ISBN : 978-621-8438-04-0
PDF (downloadable)

Published by:
FSH-PH Publications
Block 4 Lot 6, Lumina Homes,
Pamatawan, Subic, Zambales

<https://fsh-publication.com/>

 **FSH - PH PUBLICATIONS**



Genetika Bentuk Buah Cabai

Penulis:

Prof. Dr. Ir. Estri Laras Arumingtyas, MSc.St.

Editor:

Naqiyah Afifah Mulachelah, S.Si., M.Si.

Desain cover:

Danil Eka Fahrudin, S.P.

Prakata

Cabai (*Capsicum* spp.) termasuk dalam famili Solanaceae dan menunjukkan keanekaragaman bentuk buah yang beragam. Awalnya, varietas cabai liar ini menghasilkan buah berbentuk bulat kecil. Namun, melalui domestikasi dan pemuliaan tanaman, beragam bentuk dan ukuran buah telah dikembangkan. Keanekaragaman morfologi buah ini sangat menguntungkan bagi pemulia, karena dapat menjadi sumber variasi yang berharga untuk perbaikan tanaman. Dari sudut pandang ekonomi, bentuk buah merupakan karakteristik penting dalam tanaman hortikultura, yang secara signifikan mempengaruhi nilai komersial dan preferensi konsumen terhadap buah-buahan. Dalam kasus cabai, bentuk buah tidak hanya mempengaruhi daya tarik estetika, tetapi juga berdampak pada efisiensi penanganan, penyimpanan, dan transportasi. Misalnya, buah-buahan yang memanjang atau bentuknya seragam lebih mudah dipanen secara mekanis, diproses di industri, dan dikemas untuk dikirim, sehingga lebih cocok untuk produksi komersial skala besar.

Dari sudut pandang konsumen, bentuk buah dapat menjadi faktor penentu dalam keputusan pembelian, karena bentuk tertentu sering dikaitkan dengan kualitas atau kegunaan tertentu. Misalnya, cabai kecil dan keras sesuai untuk acar dan lalapan, sementara cabai besar dan berdaging tebal seperti paprika sesuai untuk dimasak, sementara cabai besar panjang lebih sesuai untuk bumbu masakan. Selain itu, bentuk buah dapat memengaruhi kandungan nutrisi dan profil rasa buah. Bentuk buah diatur oleh mekanisme molekuler genetik yang juga dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Mekanisme genetik yang mendasari bentuk buah bersifat kompleks dan merupakan sifat kuantitatif khas yang dikendalikan oleh banyak gen.

Memahami dasar genetik bentuk buah sangatlah penting untuk mengembangkan kultivar yang memenuhi berbagai kebutuhan

petani dan konsumen. Kemajuan dalam penelitian genetik, termasuk identifikasi gen kunci seperti *OVATE*, *SUN*, *FAS*, dan *LC*, memungkinkan program pemuliaan yang ditargetkan untuk memodifikasi bentuk buah guna meningkatkan daya jual dan fungsionalitas. Manipulasi genetik ini memiliki potensi yang signifikan untuk meningkatkan kelayakan ekonomi tanaman hortikultura dan meningkatkan kepuasan konsumen. Perkembangan ini tidak hanya memperdalam pemahaman tentang perkembangan tanaman, tetapi juga mendorong strategi pemuliaan baru untuk mengoptimalkan bentuk, ukuran, dan kualitas buah. Seiring dengan kemajuan penelitian, kami berharap dapat menemukan gen baru dan jalur regulasi yang akan menyempurnakan kapasitas kami untuk merekayasa tanaman dengan karakteristik buah yang diinginkan.

Sampai saat ini, belum ada buku yang secara khusus membahas aspek genetik bentuk buah pada cabai. Meskipun terdapat banyak penelitian mengenai topik ini, namun penelitian tersebut seringkali tersebar di berbagai jurnal ilmiah dan majalah pertanian. Orang-orang yang tidak memiliki keahlian di bidang tersebut mungkin mengabaikan informasi berharga ini. Oleh karena itu, sebuah buku komprehensif yang menggabungkan semua informasi relevan sangat penting untuk memfasilitasi mereka yang tertarik mempelajari dan memanfaatkan pengetahuan tentang genetika bentuk buah pada cabai.

Buku “Genetika Bentuk Buah Cabai” terutama menekankan faktor penentu genetik bentuk buah pada cabai, mengeksplorasi berbagai faktor yang mempengaruhi sifat ini, dan apakah pengaruhnya langsung atau tidak langsung. Oleh karena itu, isi buku ini tidak hanya membahas variasi bentuk buah cabai yang ada, tetapi juga menguraikan unsur morfologi yang mempengaruhi bentuk tersebut, penanda molekuler yang terkait dengannya, serta lokus sifat kuantitatif yang telah teridentifikasi dalam kaitannya dengan bentuk buah. Jadi, buku ini fokus mengungkap faktor genetik dan unsur pendukung yang mempengaruhi bentuk buah yang teridentifikasi. Tujuan dari buku ini adalah untuk menjadi referensi penting bagi para peneliti, pendidik, mahasiswa, dan siapa pun yang tertarik dengan subjek ini, serta memfasilitasi akses terhadap informasi mengenai

mekanisme genetik dan molekuler yang mendasari penentuan bentuk buah pada cabai.

Penulis

Daftar Isi

| | |
|---|-------------|
| Prakata | i |
| Daftar Isi | iv |
| Daftar Gambar..... | vi |
| Daftar Tabel..... | viii |
| BAB I Variasi Bentuk Buah Pada Cabai..... | 1 |
| 1.1 Bentuk Buah Cabai berdasarkan <i>Descriptor of Capsicum</i> ... | 2 |
| 1.2 Berbagai Pengolongan buah Cabai oleh Peneliti | 3 |
| 1.3 Pengolongan Bentuk Buah Cabai di Daerah Amerika Latin | 9 |
| BAB II Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Bentuk Buah Cabai | 16 |
| 2.1 Faktor Genetik..... | 16 |
| 2.2 Faktor Fisiologi | 18 |
| 2.3 Pengaruh Lingkungan | 23 |
| BAB III Penanda Molekuler untuk Bentuk Buah Cabai 24 | |
| 3.1 Hubungan antara Fenotipik Bentuk Buah Cabai dan Profil Genotipiknya | 25 |
| 3.2 Penanda Mikrosatelit untuk Bentuk Buah Cabai | 26 |
| 3.3 SNP terkait Bentuk Buah | 27 |
| 3.4 Penanda-penanda lain terkait bentuk buah..... | 29 |
| BAB IV Quantitative Trait Locus untuk Bentuk Buah Cabai | 31 |
| 4.1 Hubungan antara QTL ukuran dan bentuk buah pada cabai..... | 33 |
| 4.2 QTL terkait Panjang Buah | 33 |
| 4.3 QTL yang berkaitan dengan berat buah | 34 |
| 4.4 QTL yang berkaitan dengan jumlah Lokulus..... | 35 |
| BAB V Genetika Bentuk Buah Cabai | 37 |
| 5.1 Gen <i>Ovate</i> | 40 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2 Lokus <i>SUN</i> | 45 |
| 5.3 <i>FAS</i> (<i>Fasciated</i>) dan <i>LC</i> (<i>Nomor Locule</i>) | 46 |
| 5.4 Lokus <i>fs</i> | 49 |
| 5.5 Lokus <i>WUSCHEL</i> | 50 |
| 5.6 Gen <i>CLAVATA</i> (<i>CLV</i>) | 50 |
| Daftar Pustaka..... | 52 |
| Biografi Penulis | 61 |

Daftar Gambar

| | |
|--|----|
| Gambar 1. Bentuk Buah Cabai berdasar <i>Descriptor of Capsicum</i> | 2 |
| Gambar 2. Variasi Bentuk Buah Cabai | 3 |
| Gambar 3. Variasi Penggolongan Bentuk Buah Cabai..... | 6 |
| Gambar 4. Penggolongan bentuk buah Cabai di Sri lanka | 7 |
| Gambar 5. Contoh jenis buah matang yang dipanen dari ras lokal dan dari galur pemuliaan saat ini | 8 |
| Gambar 6. Cabai Pisang atau Lilin Hongaria..... | 9 |
| Gambar 7. Sebagian Jenis Pepperoncini | 10 |
| Gambar 8. Pimento..... | 11 |
| Gambar 9. Poblano | 11 |
| Gambar 10. Anaheim | 12 |
| Gambar 11. Habanero..... | 13 |
| Gambar 12. Serrano..... | 14 |
| Gambar 13. Jalapeño | 14 |
| Gambar 14. Skema jalur umpan balik yang melibatkan CLV-WUS pada meristem pucuk. | 19 |
| Gambar 15. Variasi bentuk buah cabai yang berkorelasi dengan SNP | 27 |
| Gambar 16. Pengelompokan berdasarkan SNP dan analisis STRUCTURE | 28 |
| Gambar 17 Pemetaan kandidat daerah yang mengontrol bentuk ujung buah cabai. | 30 |
| Gambar 18. Perbedaan morfologi tanaman dan buah cabai Chiltepin dan Puya..... | 32 |
| Gambar 19. Distribusi frekuensi F2 (Qiemen × 129–1)..... | 38 |
| Gambar 21. Perubahan ekspresi gen CaOFP20 setelah dilakukan <i>silencing</i> dengan VIGS | 44 |
| Gambar 22. Representasi skematis mekanisme pengaturan gen <i>SUN</i> dalam konteks pemanjangan buah. | 46 |

| | |
|--|----|
| Gambar 23. Representasi skematis mekanisme pengaturan gen <i>LC</i> dan <i>FAS</i> dalam pengembangan lokus buah. | 47 |
| Gambar 24. Representasi skematis <i>clv1</i> mutan yang meningkatkan jumlah lokus dalam buah. | 51 |

Daftar Tabel

Tabel 1. OFP pada berbagai tanaman 41

BAB I

Variasi Bentuk Buah Pada Cabai

Tanaman Cabai (*Capsicum sp.*) termasuk dalam famili Solanaceae (terong-terongan). Secara umum, buah-buahan dari keluarga Solanaceae sangat penting karena kontribusinya yang besar dalam memenuhi kebutuhan makanan dan nutrisi manusia (van der Knaap & Østergaard, 2018). Selain memberikan nutrisi penting, buah dari tanaman kelompok Solanaceae seperti tomat (*Solanum lycopersicum*), terong (*Solanum melongena*), dan cabai (*Capsicum spp.*) umumnya merupakan komponen penting dalam berbagai resep dan hidangan kuliner internasional (Samuels, 2015).

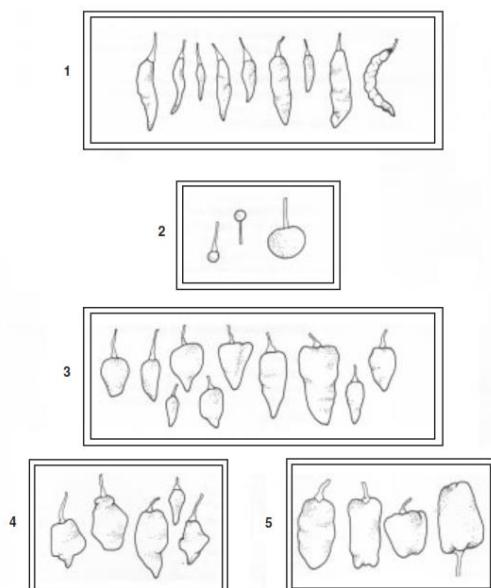
Salah satu ciri menarik dari buah-buahan dalam keluarga Solanaceae adalah keanekaragaman bentuk dan ukuran tanaman yang luar biasa (Paran & Van Der Knaap, 2007a; Khokhar *et al.*, 2022). Pemuliaan intensif setelah domestikasi telah menghasilkan keragaman ukuran dan bentuk yang sangat beragam (Cao *et al.*, 2022; Khokhar *et al.*, 2022). Dari segi ekonomi, ukuran buah di antara berbagai spesies tanaman berbunga, termasuk tanaman dalam spesies yang sama, sering kali menjadi pertimbangan komersial yang signifikan (Li *et al.*, 2023). Ukuran buah merupakan atribut penting yang mempengaruhi penerimaan pelanggan, dengan buah berukuran sedang hingga besar umumnya disukai. Preferensi ini penting untuk menentukan hasil penjualan pasar (Nimmakayala *et al.*, 2021). Buah yang lebih besar cenderung lebih padat nutrisi karena meningkatnya proporsi daging buah yang dapat dimakan (Liu *et al.*, 2024a).

Sebagai anggota famili Solanaceae, tanaman cabai mempunyai bentuk buah yang sangat bervariasi, mulai dari yang pendek dan berbentuk kotak seperti kubus, hingga yang panjang, ramping, dan meruncing. Tercatat lebih dari 30 jenis cabai

berdasarkan bentuknya. Bentuk cabai sangat berkaitan dengan preferensi dari masyarakat dalam pemanfaatannya, yang pada kemudian akan menentukan status konservasinya. Bentuk cabai yang disukai masyarakat akan banyak dibudidayakan, sehingga dengan sendirinya akan terkonservasi. Selanjutnya, banyaknya pembudidayaan menentukan produk dari cabai, sehingga nantinya akan menentukan harga dari cabai tersebut. Hal ini akan menentukan nilai ekonomi cabai.

1.1 Bentuk Buah Cabai berdasarkan *Descriptor of Capsicum*

Menurut *Descriptor of Capsicum* yang dikeluarkan oleh *International Plant Genetic Resources* (IPGRI, 1995), buah cabai berbentuk berbentuk memanjang (*elongate*), hampir bulat (*almost round*), segitiga (*triangular*), lonceng (*campanulate*), balok (*blocky*), dan lain-lain (Gambar 1).



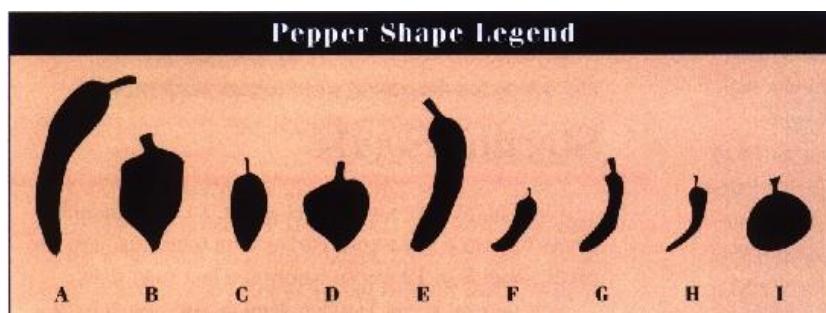
Sumber: IPGRI, 1995

Gambar 1. Bentuk Buah Cabai berdasarkan *Descriptor of Capsicum*. (1) memanjang, (2) hampir bulat, (3) segitiga, (4) lonceng, dan (5) balok.

Penggolongan bentuk buah oleh IPGRI tersebut dimaksudkan untuk mewadahi berbagai variasi yang ada pada bentuk buah cabai di seluruh dunia. Namun demikian, dengan semakin berkembangnya eksplorasi plasmanutfah cabai serta semakin mendalamnya penelitian tentang cabai, maka berkembang pula variasi bentuk buah cabai maupun cara penggolongannya.

1.2 Berbagai Penggolongan buah Cabai oleh Peneliti

Variasi dari penggolongan bentuk buah banyak ditemukan. Variasi ini terjadi karena kegiatan pemuliaan yang dilakukan oleh para peneliti maupun petani cabai. Menurut pengamatan *National Garden Bureau Texas*, bentuk buah cabai bisa dikelompokkan menjadi 11 (Gambar 2) (NGB, Classifying Chile Peppers, 2007).



Sumber: NGB, Classifying Chile Peppers, 2007

Gambar 2. Variasi Bentuk Buah Cabai

Buah cabai yang tergolong dalam bentuk A mempunyai bentuk panjang dan meruncing, dengan dinding cukup tipis dan rongga di dalam buah terpisah menjadi dua kompartemen. Buah muda berwarna hijau dan buah masak berwarna merah. Jenis cabai yang termasuk dalam bentuk buah ini adalah cabai Chile atau Anaheim. Cabai Indonesia yang termasuk golongan ini adalah cabai besar.

Kelompok bentuk ini serupa dengan bentuk memanjang (*elongate*) pada *Descriptor of Capsicum* (IPGRI, 1995).

Bentuk buah B adalah bentuk pangkal buah datar dan bulat, dengan ujung buah agak meruncing dengan ujung tumpul, dinding buah tipis, dan rongga buah terdiri dari tiga kompartemen. Buah muda berwarna hijau tua, buah masaknya berwarna merah. Tingkat kepedasan sedang (1.000 hingga lebih dari 5.000 unit Scoville). Yang tergolong dalam bentuk ini adalah Poblano. Kelompok bentuk ini serupa dengan bentuk segitiga (*triangular*) pada *Descriptor of Capsicum* (IPGRI, 1995).

Bentuk buah C adalah bentuk pendek dan gemuk dengan dinding berdaging tebal. Buah muda berwarna hijau tua, warna buah masak bervariasi dari merah, kuning, atau ungu. Tingkat kepedasan sedang hingga tinggi (5.000 hingga lebih dari 60.000 unit Scoville). Yang tergolong buah bentuk C ini adalah cabai Jalapeño. Untuk bentuk buah C ini tidak mempunyai padanan pada *Descriptor of Capsicum* (IPGRI, 1995).

Bentuk buah D adalah bentuk lentera atau lonceng kecil berdinding tipis. Warna buah muda adalah hijau muda, ketika masak berwarna kuning, orange, atau merah. Tingkat kepedasan tergolong sangat pedas (8.000 hingga lebih dari 60.000 unit Scoville). Yang termasuk bentuk buah D ini adalah Habanero, Katokon, Bhut Jolokia, dan Moruga. Bentuk buah D ini sepadan dengan tipe buah lonceng (*campanulate*) atau balok (*blocky*) pada *Descriptor of Capsicum* (IPGRI, 1995).

Bentuk buah E adalah panjang mengerucut, ujung meruncing, dan dinding buah sedang. Warna buah mudanya adalah hijau, dan warna saat masak adalah kuning hingga merah. Tingkat kepedasan sedang (1.000 hingga lebih dari 5.000 unit Scoville). Contoh buah berbentuk E ini adalah cabai Lilin Hongaria, dan cabai Pisang. Pada *Descriptor of Capsicum* bentuk ini tergolong bentuk memanjang (*elongate*) tetapi dengan ukuran yang besar (IPGRI, 1995).

Bentuk buah F adalah ramping, agak berbentuk gada dengan dinding agak tebal. Warna buah muda adalah hijau. Tingkat

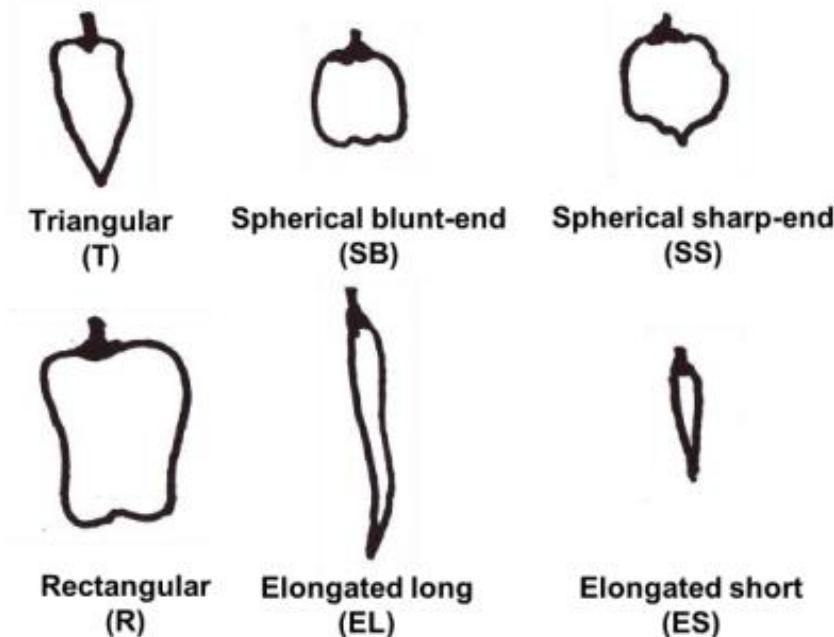
kepedasannya sedang hingga tinggi (5.000 hingga lebih dari 60.000 unit Scoville). Yang tergolong dalam bentuk ini adalah cabai Serrano, dan beberapa jenis cabai rawit. Bentuk buah F ini serupa dengan tipe buah memanjang (*elongate*) tapi dengan ukuran yang kecil pada *Descriptor of Capsicum* (IPGRI, 1995).

Bentuk buah G adalah panjang melengkung dengan dua kompartemen dan kulit tipis keriput. Buah muda berwarna hijau, dan berubah menjadi merah, kuning, atau ungu ketika masak. Tingkat kepedasan sedang hingga tinggi (5.000 hingga lebih dari 60.000 unit Scoville). Yang tergolong dalam kelompok bentuk ini adalah Cayenne, dan cabai kriting. Bentuk buah F ini serupa dengan tipe buah memanjang (*elongate*) tapi dengan diameter sedang pada *Descriptor of Capsicum* (IPGRI, 1995).

Bentuk buah H adalah kecil ramping dan berdinding tipis. Buah muda berwarna hijau, saat masak menjadi merah. Tingkat kepedasan tinggi hingga ekstrem (8.000 hingga lebih dari 60.000 unit Scoville). Yang tergolong dalam kelompok ini adalah cabai rawit, Thai pepper, dan Peperoncini. Bentuk buah H ini serupa dengan tipe buah memanjang (*elongate*), tetapi dengan ukuran kecil, ramping, dan pendek pada *Descriptor of Capsicum* (IPGRI, 1995).

Bentuk buah I adalah berbentuk bulat dan berdinding tebal. Buah muda berwarna hijau dan menjadi merah saat masak. Tingkat kepedasan sedang (5.000 hingga lebih dari 8.000 unit Scoville). Yang tergolong bentuk buah ini adalah cabai Pimento dan Guyana Chili. Berdasarkan *Descriptor of Capsicum* (IPGRI, 1995), bentuk ini serupa dengan hampir bulat (*almost round*).

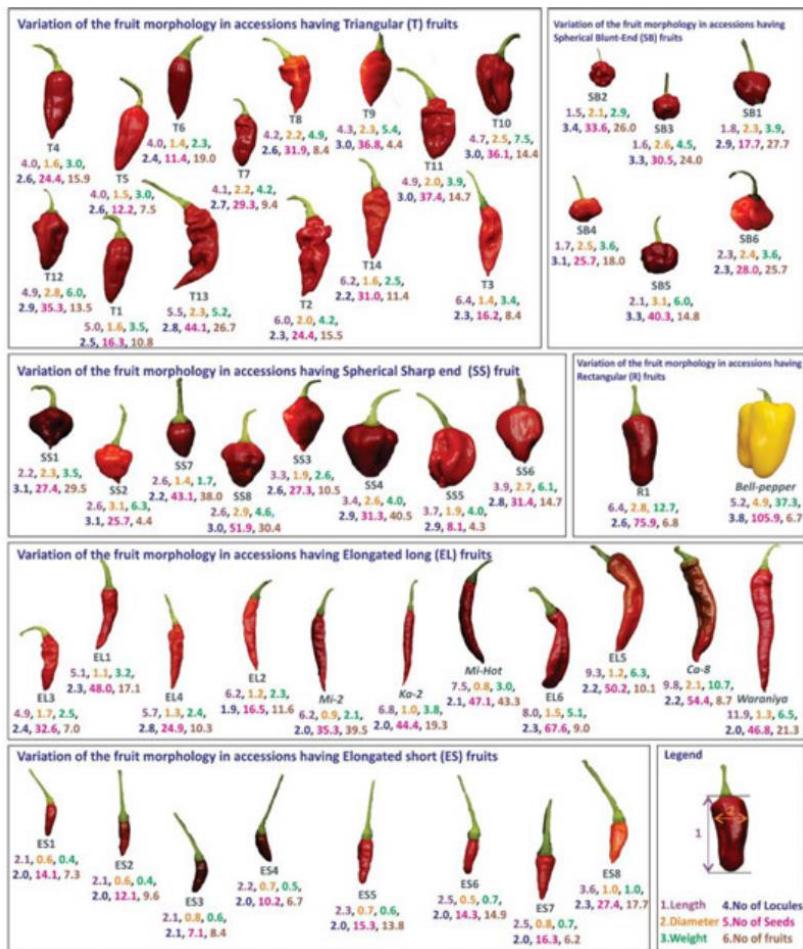
Variasi penggolongan bentuk buah cabai juga dilaporkan oleh Chamikara *et al.* (2015). Bentuk buah digolongkan menjadi segitiga (*triangular*), bulat ujung tumpul (*spherical blunt-end*), bulat ujung lancip (*spherical sharp-end*), persegi panjang (*rectangular*), Panjang memanjang (*elongated long*) dan pendek memanjang (*elongated short*) (Gambar 3).



Sumber: Chamikara *et al.*, 2015

Gambar 3. Variasi Penggolongan Bentuk Buah Cabai. Keterangan: T: *Triangular* (segitiga), SBE: *Spherical blunt-end* (bulat ujung tumpul), SSE: *Spherical sharp-end* (bulat ujung lancip), R: *Rectangular* (persegi panjang), EL: *Elongated long* (panjang memanjang), ES: *Elongated short* (pendek memanjang)

Sementara itu, peneliti lain mengelompokkan menjadi memanjang (*elongated*), bulat (*round*), segitiga (*triangular*), lonceng (*campanulated*), bulat telur (*ovoid*), dan oval (*elliptic*) (Elizanilda Ramalho do Rêgo, 2012). Penelitian yang dilakukannya pada koleksi cabai di Sri Lanka mendasari penggolongan cabai-cabai tersebut ke dalam kelompok-kelompok di atas (Gambar 4).



Sumber: Chamikara *et al.*, 2015

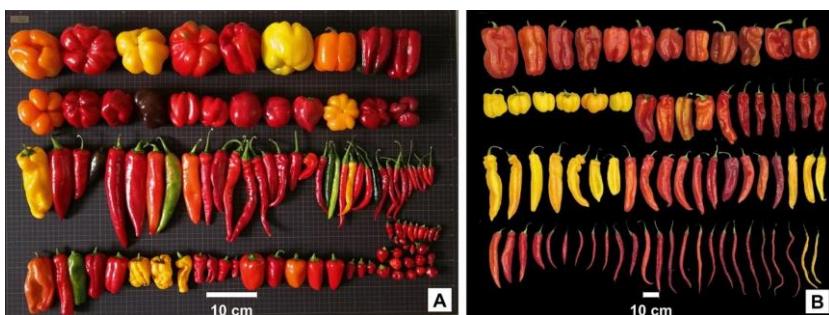
Gambar 4. Penggolongan bentuk buah Cabai di Sri lanka

Peneliti lain (Swamy, 2023) menggolongkan cabai menjadi:

1. Abreviatum: buah berbentuk bulat telur, keriput, dan panjang 2-5 cm. Cabai ini juga disebut dengan cabai keriput.
2. Akuminatum: buah berbentuk ramping, melengkung, dan panjang sampai 11 cm. Tingkat kepedasannya ringan hingga sangat pedas.
3. Cerasiforme: buah berbentuk bulat dengan daging padat. Diameternya mencapai 2,5 cm. Tingkat kepedasan ringan hingga

- pedas. Warna buah masak bervariasi antara merah, kuning, atau ungu. Cabai ini juga disebut dengan cabai ceri atau cabai rawit.
- 4. Konoid: buahnya berbentuk subkerucut, panjangnya mencapai 3 cm, dan tingkat kepedasannya sangat pedas. Cabai ini juga disebut dengan cabai kerucut.
 - 5. Fasikulatum: buahnya bergerombol, tegak, dan panjangnya sampai 7,5 cm. Tingkat kepedasannya sangat pedas. Cabai ini juga disebut dengan *cluster pepper*.
 - 6. Grossum: buahnya besar dengan depresi basal, dan bentuknya menggembung. Warnanya merah, oranye, kuning, atau ungu. Dagingnya tebal dan lembut. Cabai ini juga disebut dengan paprika.
 - 7. Panjang: buah terkulai dengan panjang hingga 30 cm. Tingkat kepedasannya ringan atau pedas. Warnanya merah, kuning, atau keputihan. Cabai ini juga disebut dengan cabai panjang (CABI, 2023).

Karena cabai yang digunakan oleh masyarakat terbatas pada jenis yang tertentu saja, sementara jenis cabai berkaitan dengan bentuknya, maka bentuk cabai yang ada pada saat ini dipengaruhi oleh preferensi Masyarakat. Penelitian di India menunjukkan bahwa antara cabai yang secara tradisional tumbuh dan digunakan oleh Masyarakat berbeda dengan cabai hasil pemuliaan yang saat ini beredar (Gambar 11).



Sumber: Guo *et al.*, 2023

Gambar 3. Contoh jenis buah matang yang dipanen dari 94 ras lokal (A), dan dari 85 galur pemuliaan saat ini (B).

1.3 Penggolongan Bentuk Buah Cabai di Daerah Amerika Latin

Di daerah Amerika Latin, bentuk buah cabai yang beragam juga berkaitan dengan pemanfatannya. Umumnya pemanfaatan cabai disesuaikan dengan tingkat kepedasannya. Cabai dengan tingkat kepedasan rendah dapat disajikan mentah, diasamkan, dipanggang, atau dapat ditambahkan sebagai penambah aroma pada makanan yang gurih. Cabai dengan tingkat kepedasan yang ringan, umumnya berbentuk lonceng/balok/persegi yang pendek dan besar, biasanya merupakan cabai yang paling tidak pedas dan serbaguna, contohnya adalah paprika.

Cabai berbentuk pisang atau lilin, sering disebut sebagai Cabai Pisang (*Banana Pepper*), adalah anggota keluarga paprika berukuran sedang yang memiliki rasa yang lembut dan tajam. Kultivar Cabai Pisang ini merupakan anggota dari spesies *Capsicum annuum*. Jenis ini terdiri dari beberapa varietas, salah satunya berbentuk seperti pisang berwarna kuning agak panjang, serta sangat lembut dari segi rasa (Gambar 5). Meskipun biasanya berwarna kuning cerah, cabai ini dapat berubah menjadi hijau, merah, atau oranye saat matang. Rasanya tidak terlalu pedas (0–500 SHU (*Scoville Heat Unit*)). Seperti kebanyakan paprika, tingkat kepedasannya bergantung pada kematangannya, semakin matang akan semakin manis.



Sumber: Trade Winds Fruit, 2025
Gambar 4. Cabai Pisang atau Lilin Hongaria

Bentuk cabai Amerika Latin yang lain adalah kecil dan ramping seperti Peperoncini (Gambar 7). Peperoncini adalah nama umum Italia untuk cabai pedas, khususnya beberapa kultivar regional dari spesies *Capsicum annuum* dan *C. frutescens*, termasuk Tabasco. Di Indonesia, cabai ini tergolong sebagai cabai rawit. Pepperoncini banyak digunakan sebagai pelengkap makanan Mediterania. Di Indonesia dan Thailand, cabai ini digunakan dalam berbagai jenis kuliner untuk memberikan rasa pedas yang menyengat.



Sumber: Trade Winds Fruit, 2025

Gambar 5. Sebagian Jenis Pepperoncini

Selanjutnya, terdapat cabai bentuk bulat mirip tomat, berukuran panjang 3-4 inci (7-10 cm), dan lebar 2-3 inci (5-7 cm). Jenis cabai ini dinamakan Pimento (Gambar 8). Jenis ini merupakan spesies *Capsicum annuum*. Pimento dapat memiliki berbagai macam warna, antara lain: kuning, hijau, merah, dan merah marun. Daging pimento manis, segar, dan lebih aromatik jika dibandingkan dengan paprika merah. Beberapa varietas terasa pedas.



Sumber: Harans & Sung, 2024
Gambar 6. Pimento

Bentuk buah cabai yang lain adalah Poblano. Bentuk buah ini pada bagian atas dekat tangkai menyerupai paprika kecil, yang kemudian mengecil ke ujung bawah (Gambar 9). Poblano berasal dari Puebla, Meksiko. Dalam bentuk kering disebut dengan *ancho* atau *chile ancho*. *Ancho* dari kata Spanyol yang artinya lebar. Meskipun poblano cenderung memiliki rasa yang ringan, kadang-kadang dan secara tidak terduga, poblano tersebut dapat memiliki rasa pedas yang signifikan. Poblano merah yang matang jauh lebih pedas dan beraroma dibandingkan poblano hijau yang kurang matang.



Sumber: Harans & Sung, 2024
Gambar 7. Poblano

Varietas yang berkerabat dekat dengan Poblano adalah Mulato, yang warnanya lebih gelap, rasanya lebih manis, dan teksturnya lebih lembut. Buahnya memiliki panjang 7,6-15 cm dan lebar antara 5 sampai 8 cm. Mulato yang belum matang berwarna hijau keunguan tua, tetapi buah yang matang akhirnya akan berubah menjadi merah tua hingga hampir hitam.

Cabai dengan kepedasan ringan antara lain adalah Anaheim (Gambar 10). Cabai ini berukuran sedang (15-25 cm), dengan bentuk buah panjang dan tipis. Warnanya hijau ketika muda, dan saat masak berwarna merah (Gambar 8). Cabai Anaheim ini adalah makanan pokok Meksiko yang berasal dari New Mexico, dan diberi nama berdasarkan tempat dipopulerkannya: Anaheim, California selatan.



Sumber: Mckenzie, 2024

Gambar 8. Anaheim

Cabai dengan Tingkat kepedasan tinggi adalah Habanero (Gambar 11). Ada berbagai variasi warna buah masak dari Habanero, mulai dari merah, oranye, putih, coklat, kuning, hingga ungu. Habanero mentah berwarna hijau, dan warnanya berubah seiring bertambahnya umur buah. Habanero matang memiliki panjang 2–6 cm. Cabai Indonesia yang sama dengan Habanero ini adalah Cabai Katokon yang banyak tumbuh di Sulawesi Utara.



Sumber: Aisyah, 2020

Gambar 9. Habanero

Cabai Habanero sangat pedas, dengan nilai 100.000–350.000 pada skala Scoville. Panas, rasa, dan aroma buah Habanero menjadikannya bahan utama dalam saus pedas dan makanan pedas lainnya. Nama habanero diambil dari nama kota La Habana di Kuba, yang dikenal dalam bahasa Inggris sebagai Havana. Cabai Habanero disebarluaskan oleh penjajah Spanyol ke wilayah lain di dunia, hingga ahli taksonomi abad ke-18 salah mengira Tiongkok sebagai tempat asalnya dan menyebutnya *Capsicum chinense* (cabai Tiongkok).

Cabai pedas yang lain adalah Serrano. Berbeda dengan Habanero dan Jalapeño, cabai Serrano berukuran kecil dan ramping. Cabai Serrano (*Capsicum annuum*) adalah sejenis cabai yang berasal dari daerah pegunungan di negara bagian Puebla dan Hidalgo, Meksiko. Peringkat Scoville untuk cabai Serrano adalah 10.000 hingga 25.000 SHU. Nama cabai ini mengacu pada pegunungan (Sierra) di wilayah tersebut. Cabai kecil berkulit tipis ini tersedia dalam berbagai warna, termasuk hijau, merah, dan kuning. Panjangnya biasanya berukuran antara 2,5-10 cm. Cabai Serrano dikenal karena bentuknya yang memanjang dengan ujung runcing.



Sumber: Etsy, 2025
Gambar 10. Serrano

Cabai dengan tingkat kepedasan tinggi yang lain adalah Jalapeño (Gambar 12). Ukuran buah panjang 5–10 cm, lebar 2,5–3,8 cm, umumnya memiliki retakan di bagian atasnya, dan merupakan salah satu cabai pedas paling serbaguna. Jalapeño atau halapenyo (*Capsicum annuum*) (pengucapan bahasa Spanyol) merupakan cabai yang berasal dari Meksiko. Cabai ini memiliki rasa pedas yang kuat menggigit. Karena hal tersebut, Jalapeño biasanya dijual dalam bentuk acar dalam kemasan botol kaca.



Sumber: The living Seeds Company
Gambar 11. Jalapeño

Cabai Jalapeño dewasa posisinya menggantung dari tanaman. Kepedasannya cabai Jalapeño bervariasi, tetapi biasanya antara 4.000 dan 8.500 unit pada skala Scoville. Cabai ini lebih besar dan rasanya tidak sepedas cabai Serrano. Nama Jalapeño ini diambil dari nama Xalapa, ibu kota Veracruz, Meksiko.

Meskipun umumnya pemanfaatan cabai disesuikan dengan tingkat kepedasannya, tetapi tingkat kepedasannya tampaknya tidak berkaitan dengan bentuknya. Misalnya, cabai yang berbentuk kecil memanjang tidak selalu mempunyai tingkat kepedasannya tinggi, atau cabai yang berbentuk balok(*blocky*)/persegi(*rectangular*) tidak selalu mempunyai tingkat kepedasannya rendah. Contoh tersebut membuktikan bahwa pengelompokan cabai berdasarkan tingkat kepedasannya dan gunanya tampak tidak berkaitan dengan bentuknya.

BAB II

Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Bentuk Buah Cabai

Faktor yang mempengaruhi fenotipe secara umum adalah faktor genetik atau genotipe dan faktor lingkungan. Demikian juga dengan bentuk buah pada cabai, dua faktor tersebut akan mempengaruhi. Seberapa besar kedua faktor tersebut mempengaruhi bentuk buah akan ditelaah dalam sub bab berikut.

2.1 Faktor Genetik

Buah, secara biologi memiliki peranan yang sangat penting dalam mendukung perkembangan benih, dan memfasilitasi penyebaran benih ke berbagai lingkungan, sehingga berkontribusi pada perbanyakannya. Selain itu, berbagai jenis buah juga merupakan sumber nutrisi yang krusial bagi manusia, memberikan variasi dalam kuliner, serta sering kali menghadirkan kenikmatan yang signifikan.

Buah juga merupakan penciri taksonomi yang penting. Bentuk, ukuran, dan warna buah memberikan kontribusi penting dalam penentuan jenis tanaman. Spesies tanaman penghasil buah menunjukkan keragaman taksonomi yang tinggi. Buah dari varietas yang telah didomestikasi sering kali mengalami peningkatan ukuran yang signifikan jika dibandingkan dengan buah dari nenek moyang liarnya. Sebagai contoh, nenek moyang tomat adalah tomat liar

Lycopersicon esculentum cv *Cerasiforme*, menghasilkan buah yang umumnya hanya berbobot beberapa gram dan memiliki dua lokus. Sebaliknya, satu buah dari varietas tomat modern dapat mengandung banyak lokus dan beratnya mencapai 1 kg, yang menunjukkan peningkatan berat hampir 1000 kali lipat. Fenomena serupa juga dapat ditemukan pada sebagian besar spesies buah peliharaan lainnya. Selain peningkatan ukuran, proses domestikasi juga menghasilkan variasi bentuk buah yang signifikan. Meskipun bentuk tomat liar dan semi-liar umumnya menghasilkan buah bulat, tomat yang dibudidayakan memiliki berbagai bentuk, termasuk bulat, pipih, berbentuk pir, berbentuk torpedo, dan berbentuk paprika.

Secara umum, faktor yang mempengaruhi fenotip atau karakter yang bisa dilihat adalah faktor genetik dan faktor lingkungan. Berbagai penelitian bentuk buah secara umum menunjukkan bahwa kedua faktor tersebut menentukan bagaimana bentuk buah dari suatu tanaman.

Banyak penelitian yang mengungkap bahwa sifat-sifat genetik yang dimiliki oleh banyak tanaman terbukti mengendalikan bentuk buah, daun, dan biji (van der Knaap & Østergaard, 2018; Wu *et al.*, 2018; Khokhar *et al.*, 2022). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Gurung *et al.* (2020), komponen-komponen karakter buah yang sangat berpengaruh terhadap bentuk buah adalah lebar buah, panjang buah, dan tebal daging buah. Pada tomat, mekanisme genetik yang bertanggung jawab mengendalikan bentuk buah berkaitan dengan pola pembelahan sel (secara *longitudinal* (memanjang) atau *transversal* (ke arah samping)). Pembelahan memanjang akan menyebabkan diameter buah membesar. Begitupula sebaliknya, pembelahan ke samping menyebabkan buah memanjang. Mekanisme ini kemungkinan besar sama, dan terjadi pada beberapa spesies tumbuhan lain seperti melon, mentimun, dan kentang. Pada beberapa spesies, ekspresi dari gen-gen ini terdeteksi pada tahap perkembangan buah (tepat sebelum buah matang). Sedangkan pada beberapa spesies lain, ekspresi gen mempengaruhi bentuk dan ukuran pada tahap yang jauh lebih awal, bahkan sebelum berbunga (Sinnott & Kaiser, 1934; Ku *et al.*, 2000;

Tanksley, 2004; Brewer *et al.*, 2007; Paran & Van Der Knaap, 2007a; van der Knaap & Østergaard, 2018; Wu *et al.*, 2018).

Meskipun pada awalnya penelitian tentang mekanisme genetik penentuan bentuk buah pada famili Solanaceae lebih banyak dilakukan pada tanaman tomat, namun perkembangan lebih lanjut memunculkan berbagai penelitian serupa pada spesies-spesies lain anggota famili Solanaceae, yang termasuk di antaranya adalah cabai. Gen yang mengontrol bentuk umbi kentang ditemukan di lokasi genom yang sama dengan gen yang mengontrol bentuk buah tomat. Demikian juga gen-gen yang mengontrol bentuk buah pada tomat ternyata merupakan ortolog dari gen-gen yang sama pada cabai (Tanksley, 2004). Pada tumbuhan lain, gen pengatur bentuk mungkin tidak berada di tempat yang sama, namun diyakini gen tersebut bertindak dengan cara yang sama terkait pengendalian struktur horizontal atau vertikal dalam pembelahan sel.

2.2 Faktor Fisiologi

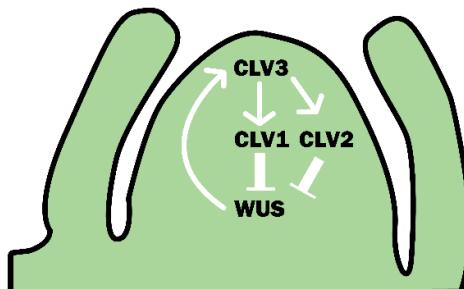
Terdapat berbagai faktor fisiologi yang berperan dalam penentuan bentuk dan ukuran buah. Di antara berbagai faktor perkembangan, meristem apikal pucuk (*shoot apical meristem*, SAM) dan hormon merupakan faktor-faktor yang banyak diteliti.

2.2.1 Arah Perkembangan Meristem

Arah perkembangan SAM berperan penting dalam menentukan ukuran buah dengan menentukan sel induk mana yang dapat berdiferensiasi menjadi sel tipe khusus (Yuste-Lisbona *et al.*, 2020). Sel-sel pada meristem apikal merupakan sel induk (*stem cells*) yang berpotensi untuk berkembang menjadi berbagai jenis sel (Pluripotensi). Perkembangan sel-sel induk ini diatur melalui mekanisme umpan balik yang dikenal sebagai CLAVATA-WUSCHEL (Gambar 14), yaitu suatu kompleks peptida yang

mengoordinasikan proliferasi sel induk dengan arah diferensiasi yang diinginkan.

Koordinasi ini dicapai melalui *loop* umpan balik negatif autoregulasi, yang terdiri dari peptida pendorong diferensiasi CLV3 (Clavata3) dan faktor transkripsi pendorong sel induk WUS (WUSCHEL) (Somssich *et al.*, 2016). CLV3 merupakan sinyal peptida yang awalnya diidentifikasi dalam analisis mutan *clavata* (penghasil buah berbentuk *clavata* atau tongkat pada tanaman model *Arabidopsis thaliana*) sebagai pengatur homeostasis meristem dan jumlah organ bunga. Homolog CLV3 secara luas dapat ditemukan pada tanaman, dan secara kolektif disebut gen terkait CLV3/ESR (CLE) (Hirakawa, 2021).



Sumber: Somssich *et al.*, 2016

Gambar 12. Skema jalur umpan balik yang melibatkan CLV-WUS pada meristem pucuk.

Dalam jalur yang mengatur perkembangan meristem pucuk pada tanaman, CLV3 disekresi oleh meristem pucuk sebagai respons terhadap pertumbuhan berlebihan, yang kemudian berikatan dengan reseptor permukaan CLV1. Pengikatan ini memulai kaskade sinyal yang melibatkan CLV2, sehingga meningkatkan efisiensi sistem regulasi. Selain itu, aktivasi gen WUSCHEL (WUS) oleh kompleks CLV3-CLV1 mendorong pembelahan meristem pucuk, serta memastikan stabilitas pertumbuhan melalui siklus umpan balik positif (Somssich *et al.*, 2016). Faktor transkripsi yang mengatur

perkembangan organ buah berhubungan dengan sinyal CLV (Durbak & Tax, 2011).

Awal perkembangan buah terjadi bila dua karpel (yang merupakan unsur bunga) muncul dari meristem bunga atau *floral meristem* (FM). Bagian ini merupakan unsur-unsur yang pada akhirnya akan membentuk lapisan luar buah. Gynoecium, bagian tengah bunga yang akan berubah menjadi buah, terbentuk dari karpel berbentuk silinder berongga yang tumbuh ke atas (Durbak & Tax, 2011). Secara bersamaan, dua tonjolan di tengah bunga mulai berkembang. Kedua tonjolan ini secara bertahap akan mendekat dan menyatu membentuk Septum, yang berfungsi sebagai partisi yang membagi Gynoecium menjadi dua bagian berbeda. Septum ini membagi silinder menjadi dua ruang (sesuai dengan dua karpel aslinya). Pada puncak Septum, terdapat dua daerah medial beserta dua domain yang terletak di sisi bawah. Sel-sel meristikatik di persimpangan Septum dan silinder membentuk jaringan yang disebut Plasenta. Benih yang pada akhirnya akan berkembang dari jaringan ini terletak di dalam buah (Durbak & Tax, 2011).

Mutasi *clv1* menginduksi perubahan pada meristem bunga dan buah. Sebaliknya, ekspresi gen *WUSCHEL* menghalangi meristem bunga (FM) dan menghentikan perkembangannya (Schoof *et al.*, 2000). Identifikasi protein mirip reseptor kinase terkait gen *CLAVATA1* pada *Capsicum* menunjukkan bahwa pengaturan proliferasi sel oleh protein tersebut menentukan arah pembentukan organ buah dan meristem pucuk (Durbak & Tax, 2011; Nimmakayala *et al.*, 2021). Pengaturan perbanyak sel ini menyebabkan dihasilkannya organ buah tambahan melalui peningkatan pembelahan sel karena ekspresi gen *WUSCHEL* yang meningkat.

2.2.2 Hormon

Analisis ontologi gen yang mengidentifikasi proses biologis, lokasi seluler, dan fungsi molekuler yang berkaitan dengan perbedaan bentuk buah menunjukkan peningkatan yang signifikan dari proses yang terkait dengan fotosintesis, reduksi oksidasi, metabolisme

hormon, sintesis flavonoid, organisasi dinding sel, pengikatan protein, ritme sirkadian, respons pertahanan, serta metabolisme asam lemak dan lipid. Banyak proses biologi yang melibatkan hormon yang meliputi respons terhadap auksin, pengikatan auksin, metabolisme auksin, persinyalan sitokinin, persinyalan giberelin (GA), respons terhadap GA, respons terhadap asam absisat, respons terhadap asam jasmonat (JA), persinyalan dan biosintesis JA, dan respons terhadap etilena (Nimmakayala *et al.*, 2021).

Buah cabai berbentuk bulat dan berbentuk memanjang menunjukkan mekanisme ekspresi gen yang berbeda. Gen-gen yang berpengaruh adalah gen-gen yang mengkode enzim yang terkait dengan biosintesis, modifikasi, dan degradasi komponen dinding sel. Selain itu, gen-gen lain yang berpengaruh adalah gen yang terlibat dalam perluasan dinding sel, seperti pektinesterase, beta-galaktosidase, dan poligalakturonase. Gen-gen tersebut mengalami peningkatan regulasi atau penurunan regulasi pada kelompok buah bulat. Dua gen yang mengkode ekstensin pengkode protein non-enzimatik yang terkait dengan pelonggaran dinding sel, mengalami peningkatan regulasi pada kelompok buah bulat. Gen yang terkait dengan pelonggaran dinding sel adalah xyloglucan endotransglucosylase dan expansin, yang mengalami penurunan regulasi pada kelompok buah bulat.

Empat gen yang terkait dengan metabolisme GA diekspresikan secara berbeda di antara kedua bentuk buah tersebut. Asam giberelat 2-oksidase (GA2ox), yang terkait dengan penonaktifan GA, menunjukkan peningkatan regulasi yang nyata dalam kelompok buah bulat. Ekspresi berlebihan GA2ox mengakibatkan penghambatan pertumbuhan organ pada beberapa spesies, misalnya *Arabidopsis* dan *Jatropha*, karena penurunan GA bioaktif endogen (Zhang *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2023). Demikian pula dengan 2-oxoglutarate dan oksigenase yang bergantung pada Fe(II), yang terkait dengan modifikasi struktural GA, mengalami peningkatan regulasi dalam kelompok buah bulat. Sebaliknya, giberelin 3-beta-hidroksilase 3, yang terkait dengan aktivasi GA, mengalami peningkatan regulasi

dalam kelompok buah bulat yang memanjang ketika dibandingkan dengan kelompok buah bulat.

Auksin terlibat dalam pengaturan pelonggaran dinding sel dan pemanjangan sel (Li *et al.*, 2023). Gen-gen yang terkait dengan persinyalan auksin diekspresikan secara berbeda di antara bagian-bagian buah yang membesar, dan sebagian besar meningkat pada bagian buah bulat. Gen-gen tersebut termasuk beberapa yang mengatur faktor respons auksin (*auxin response factor*, ARF), seperti *ARF2*, *ARF6*, dan *ARF8*. Gen persinyalan auksin yang diekspresikan secara berbeda lainnya adalah *TIR1* dan *LAX1*, yang masing-masing berfungsi dalam penerimaan dan pengangkutan auksin. Gen lain yang terkait dengan biosintesis auksin (indole-3-acetamide hydrolase) dan konjugasi (indole-3-acetic acid-amido synthetase GH3.5) mengalami peningkatan regulasi pada bagian buah memanjang.

Sitokin terlibat dalam pengendalian pembelahan sel dan pertumbuhan organ (Zhao *et al.*, 2021). Sitokin hidroksilase mengkatalisis biosintesis trans-zeatin, dan mengalami peningkatan regulasi pada bagian buah bulat dibandingkan bagian buah memanjang dalam penelitian ini.

Asam Jasmonat (*Jasmonic acid*, JA) terlibat dalam pengendalian pertahanan tanaman serta pertumbuhan tanaman dalam kondisi stres. JA selanjutnya akan berinteraksi dengan hormon lain yang terlibat dalam mengendalikan pertumbuhan tanaman, seperti sitokin, GA, dan auksin (Jang *et al.*, 2020). Enam gen yang mengalami peningkatan regulasi yang terlibat dalam biosintesis dan persinyalan JA diekspresikan secara berbeda dalam bagian buah bulat (dibandingkan dengan bagian buah memanjang). Etilen bertindak sebagai pengatur pertumbuhan tanaman dan mendorong perluasan dan pembelahan sel (Dubois *et al.*, 2018). Efek etilen pada perluasan sel dimediasi oleh ekspansin dalam pelonggaran dinding sel. Sebelas gen dalam bagian buah bulat, yang terlibat dalam biosintesis dan persinyalan etilen, diekspresikan secara berbeda dan sebagian besar mengalami peningkatan regulasi.

2.3 Pengaruh Lingkungan

Pengaruh lingkungan terhadap bentuk cabai tampaknya tidak sampai merubah bentuk dari lonceng menjadi bentuk memanjang, segitiga (*triangular*), balok (*blocky*), dst., tetapi lebih mengubah ukuran dan kesempurnaan bentuk. Tekanan lingkungan yang berasal dari fluktuasi suhu, kondisi tanah, ketersediaan air, atau serangan serangga dapat berdampak pada perkembangan buah. Suhu ekstrem saat pembentukan buah berpotensi mengganggu proses pertumbuhan normal, sehingga menyebabkan buah menjadi cacat. Penyerbukan yang tidak merata, yang disebabkan oleh kurangnya penyerbuk atau pembentukan bunga yang buruk, juga dapat mengakibatkan bentuk buah yang tidak beraturan.

Faktor-faktor lingkungan yang mempunyai dampak yang besar terhadap bentuk buah (menjadi tidak normal) di antaranya adalah hama dan penyakit. Hama dan penyakit yang menyerang tanaman cabai dapat menyebabkan ketidakteraturan bentuk buah. Infestasi serangga, seperti kutu daun atau thrips, dapat merusak bunga atau buah muda dan menghambat pertumbuhan normalnya. Selain itu, penyakit tanaman tertentu, seperti layu bakteri atau infeksi virus, dapat mengganggu kemampuan tanaman cabai dalam menghasilkan buah yang seragam. Penting bagi petani untuk menerapkan teknik pengelolaan hama terpadu dan tindakan pencegahan untuk meminimalkan masalah tersebut.

Saat menghadapi permasalahan bentuk buah cabai, penting untuk memahami variasi bentuk alami yang dapat timbul akibat faktor genetik, pengaruh lingkungan, dan interaksi dengan hama atau penyakit.

BAB III

Penanda Molekuler untuk Bentuk Buah Cabai

Dalam mengidentifikasi peran gen pada berbagai organisme, umumnya dimulai dari identifikasi penanda molekuler terkait dengan suatu karakter tertentu. Penanda genetik adalah urutan DNA dengan lokasi fisik yang diketahui pada kromosom. Penanda genetik dapat membantu menghubungkan penyakit bawaan dengan gen yang bertanggung jawab. Segmen DNA yang berdekatan pada kromosom cenderung diwariskan bersama. Penanda genetik digunakan untuk melacak pewarisan gen di sekitarnya yang belum diidentifikasi, tetapi perkiraan lokasinya diketahui. Penanda genetik itu sendiri kadang merupakan bagian dari gen, atau kadang tidak diketahui fungsinya.

Upaya dalam mengetahui gen-gen yang berperan dalam menentukan bentuk buah pada cabai atau pada Solanaceae umumnya dilakukan dengan berbagai cara. Identifikasi bisa dilakukan secara langsung pada gen-gen yang terkait dengan bentuk buah melalui ekspresinya yang dilacak kembali ke DNA atau gennya, atau melalui analisis *Quantitative trait locus* (QTL) yang berkaitan dengan bentuk buah dan data genotipik (biasanya penanda molekuler).

Penelitian untuk melihat hubungan antara data fenotipik dan genotipik untuk menyelidiki model prediksi genomik menemukan bahwa *Reproducing Kernel Hilbert Space* (RKHS) merupakan metode yang paling akurat diantara 10 metode prediksi genomik yang diuji (Hong *et al.*, 2020). Tingkat akurasi prediksi 0,75, 0,73, 0,84, 0,83, dan 0,82 untuk panjang buah, bentuk buah, lebar buah, berat buah, dan ketebalan pericarp. Secara keseluruhan, akurasi prediksi berkorelasi positif dengan penanda molekuler untuk sifat buah. Ketika model

seleksi genomik ini diujikan pada populasi galur inbrid rekombinan yang berasal dari dua galur parental yang berbeda, didapatkan akurasi prediksi sebesar 0,32, 0,34, 0,50, dan 0,48 untuk panjang, bentuk, lebar, dan berat buah. Penggunaan seleksi genomik untuk sifat-sifat yang berkaitan dengan buah ini menunjukkan potensi penggunaan metode ini sebagai alat untuk perbaikan tanaman.

3.1 Hubungan antara Fenotipik Bentuk Buah Cabai dan Profil Genotipiknya

Penelitian yang menggunakan sampel cabai dengan buah memanjang dan buah pendek menunjukkan bahwa masing-masing dari dua fenotip yang berbeda ini berkumpul bersama dalam dendrogram morfologi dan genetik buah. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran dan bentuknya mungkin dipengaruhi oleh alel yang berbeda atau mekanisme genetik khusus, yang dapat dieksplorasi lebih lanjut melalui teknik molekuler. Dibandingkan dengan jenis cabai berbuah besar yang lain, paprika tampaknya telah mengembangkan gen unik melalui pembiakan selektif untuk mencapai ukuran dan bentuk yang diinginkan secara komersial. Penelitian variasi genetik pada berbagai kultivar dan ras lokal menunjukkan adanya alel spesifik untuk *Capsicum* spp. ras lokal (yang tidak ditemukan pada kultivar komersial). Analisis dampak alel terhadap rata-rata panjang dan diameter buah menunjukkan bahwa tidak adanya alel tertentu sering kali berkorelasi dengan peningkatan nilai suatu sifat, yang menyiratkan bahwa seleksi negatif mungkin terjadi secara tidak sengaja selama proses pemuliaan.

Studi tentang keterkaitan QTL untuk karakter buah dengan penanda molekuler telah menghasilkan banyak pemahaman mengenai kemungkinan kontrol genetik terhadap bentuk buah cabai. Chamikara *et al.*, (2015) meneliti hubungan antara bentuk buah maupun karakter-karakter morfologi yang menentukan bentuk buah dengan berbagai penanda molekuler. Di antara lima penanda yang diteliti, CAMS451

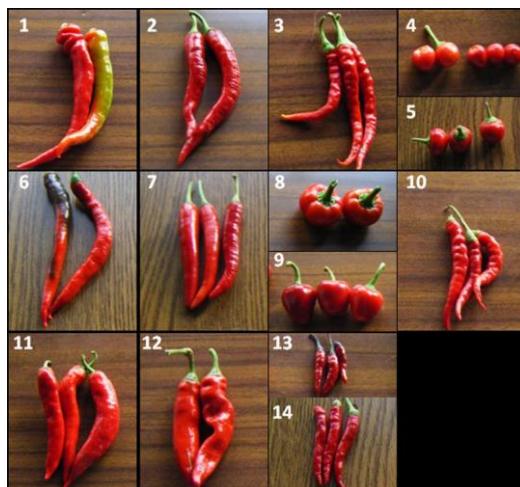
menunjukkan status alel diploid, yang berharga untuk Penanda Assisted Selection (MAS) dan pemetaan QTL. Pada sistem pemuliaan hibrida inbrid, karakter diploid memberikan banyak keuntungan. Hal ini dikarenakan waktu yang dibutuhkan untuk memperbaiki alel yang menguntungkan lebih singkat, memungkin untuk *backcrossing* dengan bantuan penanda molekuler, menyediakan variasi genetik yang lebih besar untuk seleksi, dan adanya heterosis yang dapat dimanfaatkan secara terus-menerus.

3.2 Penanda Mikrosatelit untuk Bentuk Buah Cabai

Hubungan antara alel penanda mikrosatelit dan ukuran, serta bentuk buah, mulai banyak diteliti. Penanda mikrosatelit memainkan peran penting dalam studi keragaman genetik (Hoshino *et al.*, 2012) dan pemetaan lokus sifat kuantitatif (QTL) (Azhaguvvel *et al.*, 2006; Collard & Mackill, 2008). Dari berbagai penelitian yang sudah dilakukan, telah didapatkan penanda-penanda molekuler yang terkait dengan QTL-QTL panjang buah, diameter buah, ataupun langsung dengan bentuk buah untuk *Capsicum* spp. Penanda HpmsE045 berhubungan dengan panjang buah, penanda GPMS178, CAMS451, dan CAeMS010 berhubungan dengan diameter buah, dan CAMS493 berhubungan dengan bentuk buah (Chamikara *et al.*, 2015). Secara khusus, lima alel dari penanda HpmsE045, berhubungan dengan panjang buah. Selain itu, enam alel dari penanda CAeMS010 ditemukan mempengaruhi diameter buah secara signifikan. Secara umum, terdapat 23 alel CAeMS010 yang berhubungan dengan bentuk buah. Tujuh alel dari penanda CAMS493 sangat erat berhubungan dengan bentuk buah. Namun, tidak ada satu pun alel dari penanda HpmsE045 terkait dengan panjang buah yang berhubungan dengan bentuk buah (Chamikara *et al.*, 2015).

3.3 SNP terkait Bentuk Buah

Identifikasi akan variasi nukleotida (*single nucleotide polymorphism*, SNP) yang berkaitan dengan variasi morfologi buah mengindikasikan adanya hubungan antara variasi sekuen DNA dengan bentuk buah (Tripodi *et al.*, 2018). Dari 14 jenis cabai yang memiliki bentuk buah yang bervariasi (Gambar 15), sebagian terdeteksi bahwa buah dengan bentuk yang sama mempunyai SNP yang sama, dan mengelompok pada kelompok yang sama (Gambar 16).

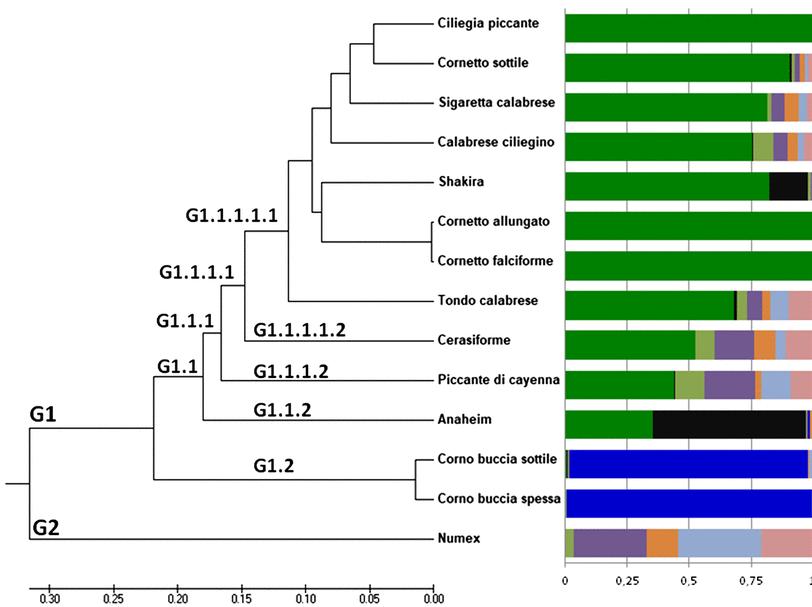


Sumber: Tripodi *et al.*, 2018

Gambar 13. Variasi bentuk buah cabai yang berkorelasi dengan SNP.

1=*Cornetto allungato*; 2=*Cornetto falciforme*; 3=*Cornetto sottile*; 4=*Cerasiforme*; 5=*Calabrese ciliegino*; 6=*Corno buccia sottile*; 7=*Corno buccia spessa*; 8=*Ciliegia piccante*; 9=*Tondo calabrese*; 10=*Piccante di cayenna*; 11=*Shakira*; 12=*Anaheim*; 13=*Numex*; 14=*Sigaretta calabrese*

Buah jenis cabai yang memiliki buah yang memanjang (*elongated*) seperti *Cornetto allungato* (no.1), *Cornetto falciforme* (no.2), *Cornetto sottile* (no.3), *Corno buccia sottile* (no.6), dan *Corno buccia spessa* (no.7) (Gambar 15) mengelompok pada kelompok yang sama, meskipun ada jenis cabai berbentuk bulat *Ciliegia picante* (no.8) dan *Calabrese ciliegino* yang menyelip diantaranya.



Sumber: Tripodi *et al.*, 2018

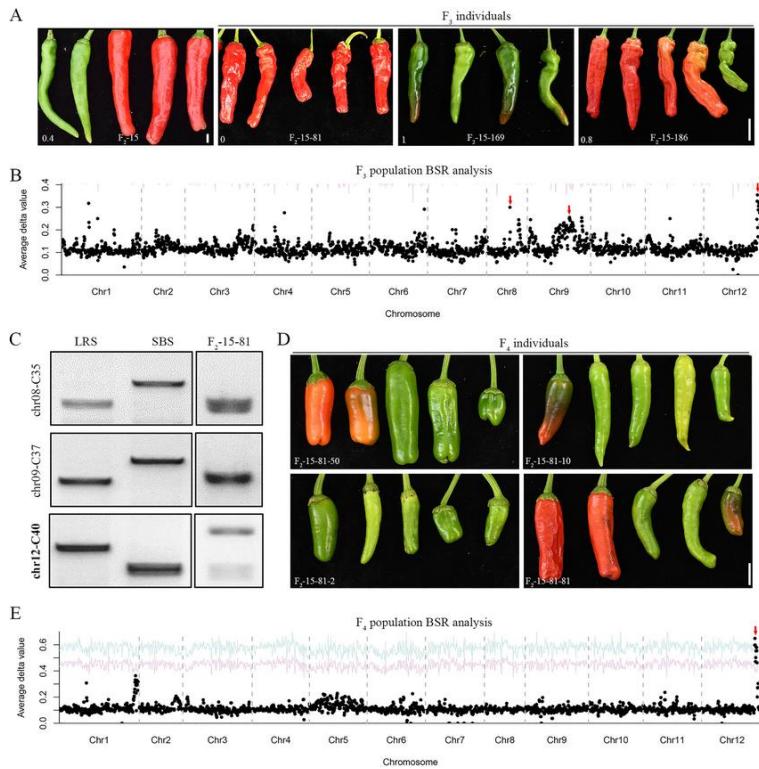
Gambar 14. Pengelompokan berdasarkan SNP dan analisis STRUCTURE

Dendrogram yang dibangun berdasarkan kesamaan SNP dari masing-masing jenis cabai menunjukkan hubungan yang dekat antara semua jenis cabai (kecuali jenis cabai Numex yang merupakan cabai ornamental). Pengelompokan yang ditunjukkan juga tidak menunjukkan adanya hubungan antara bentuk cabai dengan SNP. Berbeda dengan hasil analisis STRUCTURE yang menunjukkan bahwa alel yang dipunyai oleh cabai dengan bentuk yang mirip juga cenderung sama. Misalnya seperti *Calabrese ciliegino* dengan *Tondo calabrese* yang mempunyai 7 alel yang sama, *Cornetto allungato* dan *Cornetto falciforme* yang mempunyai bentuk yang mirip tergabung dalam kelompok yang sama dan mempunyai alel yang sama, demikian juga dengan *Corno buccia sottile* dan *Corno buccia spessa*.

3.4 Penanda-penanda lain terkait bentuk buah

Penanda molekuler *Cleaved Amplified Polymorphic Sequences* (CAPS) yang terkait dengan bentuk buah cabai juga telah diidentifikasi pada tanaman cabai. Melalui analisis pewarisan sifat ujung buah menggunakan dua galur yang berbeda, yaitu LRS (*long red spicy fruit*) dengan ujung buah runcing dan SBS (*small blocky spicy fruit*) dengan ujung buah melekuk ke dalam, telah diketahui bagaimana dan kapan bentuk ujung buah ditentukan. Galur inbred rekombinan (*Recombinant Inbreed Line*, RIL) sampai generasi F4 diikuti untuk memetakan gen pengatur bentuk ujung buah melalui hibridisasi galur inbred cabai LRS dan SBS tersebut (Gambar 17).

Penanda molekuler yang berkaitan dengan gen *OFP*, *Capana12g002165*, yang merupakan peregulasi yang menentukan ujung buah cabai runcing atau melekuk ke dalam, telah diidentifikasi dan dinamakan *CaPCR1*. Gen *CaPCR1* tidak ortolog dengan *OVATE* atau *SlOFP20*, yang menunjukkan bahwa *CaPCR1* adalah anggota *Ovate Family Protein* (OFP) baru yang terlibat dalam morfologi buah. Dengan menggunakan analisis *Bulk Segregant RNA sequence* (BSR), didapatkan puncak utama pada chr08, chr09, dan chr12. Dari data tersebut, diketahui bahwa situs yang mengendalikan bentuk ujung buah terdeteksi pada ujung kromosom chr12 (dekat 201 Mb) (Gambar 17B). Tiga penanda CAPS, chr08-C35, chr09-C37, dan chr12-C40, dirancang berdasarkan posisi puncak kromosom chr08, chr09, dan chr12 (Gambar 17C). Masing-masing tiga SNP di wilayah pengkodean gen *Capana12g002165* terdeteksi, tetapi hanya satu SNP yang menyebabkan perubahan asam amino. Selain itu, ada juga perbedaan signifikan di wilayah promotor. Saat ini, belum dapat ditentukan mutasi mana yang menjadi penyebab utama perubahan bentuk ujung buah (Liu *et al.*, 2024b).



Sumber: Liu *et al.*, 2024b

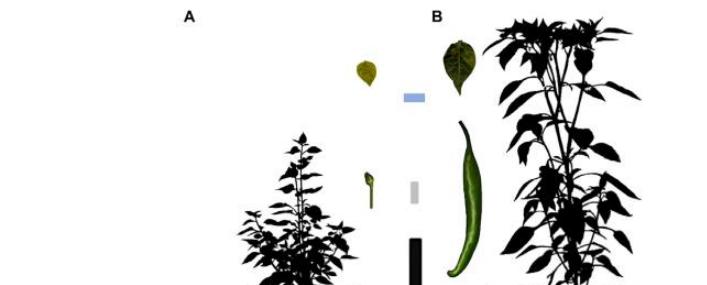
Gambar 15 Pemetaan kandidat daerah yang mengontrol bentuk ujung buah cabai. A. Fenotipe buah pada populasi F2 dan F3; B. Hasil analisis BSR pada populasi F3; C Tiga penanda CAPS mendeteksi variasi individu F3; D. Fenotipe buah pada populasi F4; E. Hasil analisis BSR pada populasi F4. Skala = 1 cm.

Penanda molekuler yang berkaitan dengan QTL, fs10, pada kromosom 10 yang mempengaruhi variasi bentuk buah adalah CT11 (Borovsky & Paran, 2011). Penanda ini berkaitan erat dengan *CaOFP20*. Akan tetapi, sekuensing ORF dari *CaOFP20* pada mutan cabai (Borovsky & Paran, 2011) tidak menunjukkan adanya mutasi apapun pada daerah pengkode dari gen ini. Tampaknya, terdapat gen lain yang mempengaruhi bentuk buah yang berkaitan erat dengan *CaOFP20* (Borovsky *et al.*, 2022).

BAB IV

Quantitative Trait Locus untuk Bentuk Buah Cabai

Genus *Capsicum* terdiri dari lebih dari 30 spesies yang dibedakan berdasarkan ragam fenotipe buahnya. Bukti genetik dan antropologis menunjukkan bahwa *C. annuum* didomestikasi dari cabai chiltepin liar (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) sekitar 8.000 tahun yang lalu di wilayah yang mencakup Amerika tropis dan subtropis (Pandit *et al.*, 2020). Perbedaan utama antara cabai yang dibudidayakan dengan cabai liar terletak pada morfologi buah dan sifat metabolismenya (Kirii *et al.*, 2017; Lopez-Moreno *et al.*, 2023). Tanaman chiltepin memiliki buah kecil dan bulat yang tumbuh tegak, sangat pedas, dan daging buah yang tipis, lunak, dan mudah hancur, sehingga buah dan bijinya mudah lepas dan tersebar. Buah dari chiltepin ini biasanya dimakan oleh burung dan oleh manusia, dipetik dari alam liar, dan tidak dibudidayakan (Tewksbury & Nabhan, 2001; Kumar *et al.*, 2018). Sebaliknya, cabai yang dibudidayakan, sebagai contoh: Puya (Gambar 18), menunjukkan variasi dalam tingkat kepedasan dan penampilan fisik. Cabai ini umumnya berukuran besar, memanjang, dan daging buahnya relatif tebal dan kuat, sehingga tidak mudah pecah, serta tidak mudah lepas dari tangkainya hingga dipanen.



| | Chiltepin | Puya |
|----------------------------|------------------------|------------------------------|
| Fruit | Small, round and erect | Large, elongated and pendant |
| Plant morphology | Highly branched shrub | Compact |
| Tissue pigmentation | Present | Almost completely absent |
| Leaf | Small and round | Large and elongated |
| Growth habit | Perennial | Annual |

Sumber: Lopez-Moreno *et al.*, 2023

Gambar 16. Perbedaan morfologi tanaman dan buah cabai Chiltepin dan Puya

Dengan adanya domestikasi tanaman cabai, maka bentuk buah cabai yang dapat ditemukan semakin bervariasi. Beberapa bentuk buah cabai dapat muncul dengan sendirinya akibat mutasi spontan, tetapi banyak juga yang muncul karena sengaja dibuat oleh manusia. Untuk mengidentifikasi kontrol genetik yang menentukan bentuk buah cabai, peneliti melakukan pelacakan wilayah DNA yang terkait dengan fenotip atau sifat tertentu yang disebut dengan Lokus Sifat kuantitatif (*Quantitative Trait Locus*, QTL). Identifikasi ini biasa dilakukan dengan memanfaatkan penanda-penanda molekuler untuk mencari dan menentukan daerah genetik yang mempengaruhi variasi fenotipik suatu sifat/karakter.

QTL yang berhubungan dengan buah biasa dinamakan dengan awalan F (*fruit*) atau Ft yang ditulis dengan huruf besar Ft, ataupun huruf kecil ft. QTL yang berkaitan dengan bentuk buah (*shape*, S) dinamakan FS/Fts atau fs/fts. QTL panjang buah (*length*, L) diberi nama FL/fl atau Ftl/ftl. QTL ukuran buah (diameter, D) diberi nama FD/fd atau Ftd/ftd, dan seterusnya.

4.1 Hubungan antara QTL ukuran dan bentuk buah pada cabai.

Pada awalnya, identifikasi QTL adalah yang berkaitan dengan ukuran buah. QTL lebar buah, bentuk buah, ketebalan *pericarp*, serta panjang buah terdeteksi pada kromosom 3 (Chaim *et al.*, 2001). Sepuluh QTL diidentifikasi untuk sifat-sifat yang berkaitan dengan ukuran buah dan bentuk, antara lain: FA2.1, FWI2.1, FL2.1, FWE2.1, FS2.1, FL4.1, FA4.1 dan FS4.1. QTL-QTL tersebut terletak bersama-sama di wilayah sekitar 80 dan 70 cM pada kromosom 2 dan 4 (Lopez-Moreno *et al.*, 2023). QTL fs3.1 merupakan QTL utama yang berkaitan dengan bentuk buah, yang menjelaskan 60% variasi fenotipik yang terletak pada kromosom 3 pada cabai (Chaim *et al.*, 2003).

Pada penelitian yang lain juga diidentifikasi 10 QTL yang berkaitan dengan sifat ukuran dan bentuk buah. Lima di antaranya terletak di wilayah umum kromosom 2. Selain itu, beberapa QTL yang berkaitan dengan ukuran dan bentuk buah pada cabai dengan latar belakang genetik yang berbeda juga dikonfirmasi berada pada kromosom 2 (Zygier *et al.*, 2005; Han *et al.*, 2016; Ma *et al.*, 2022). Penelitian lain menunjukkan bahwa QTL yang berhubungan dengan sifat-sifat pada buah dilaporkan berada pada kromosom 4 (Lee *et al.*, 2020). QTL yang terletak di kromosom 2 antara lain adalah fs2.1, yang mirip dengan fw2.1, telah diidentifikasi berada pada lokasi yang sama dengan gen *ovate* yang berhubungan langsung dengan bentuk dan ukuran buah pada cabai (Tsaballa *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2022).

4.2 QTL terkait Panjang Buah

QTL panjang buah dilaporkan oleh Arjun *et al.* (2018). QTL yang terkait dengan panjang buah terdeteksi pada kromosom 3, 4, 7, dan *Linkage Group* 22 (LG22). Penelitian lain menemukan keberadaan QTL panjang buah pada kromosom 1, 2, 3, 7, dan 8. Adanya QTL panjang buah pada kromosom 3 juga dikonfirmasi oleh beberapa peneliti (Chaim *et al.*, 2001; Rao *et al.*, 2003; Arjun *et al.*,

2018). Identifikasi QTL menggunakan *reverse random amplification microsatellite polymorphism* (rRAMP), WRKY (suatu faktor transkripsi pada berbagai proses dalam tumbuhan), dan *amplified fragment length polymorphisms* (AFLP), telah berhasil mendeteksi adanya QTL panjang buah pada kromosom 3, 5, 11, dan *Linkage Group 3* (LG3). Jenis penanda yang berada di dekat wilayah QTL panjang buah antara lain: rRAMP, WRKY, dan AFLP pada kromosom 3 dan 5; AFLP pada kromosom 11; dan rRAMP dan AFLP pada LG3 pada peta SNU6 (Lee *et al.*, 2011). Deteksi posisi QTL utama untuk panjang buah pada kromosom 3 dekat dengan penanda TG130 atau/dan TG359 juga telah banyak dilaporkan (Chaim *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2011; Rodríguez *et al.*, 2013).

Analisis penanda molekuler melalui pemetaan interval komposit (*Composite interval mapping*, CIM) pada populasi F2 berhasil mengidentifikasi dua QTL yang berpengaruh terhadap panjang buah. QTL tersebut dinamakan paufl2.1 dan paufl2.2 (Arjun *et al.*, 2018). Kedua QTL ini terletak pada LG-2. Melalui analisis CIM ini, telah banyak QTL yang terdeteksi, termasuk ftl2.1, ftd2.1, fts1.1, ftw2.1, dan lcn1.1. QTL lcn1.1 ini berada di lokasi yang sama dengan Capana01g004285, suatu gen kandidat yang berperan dalam menentukan jumlah lokulus (Ma *et al.*, 2024).

4.3 QTL yang berkaitan dengan berat buah

Dalam analisis QTL berat buah (Ftw), fw2.1 diidentifikasi sebagai QTL utama yang mempengaruhi berat buah dan terletak pada kromosom 2. QTL fw2.1 memiliki hubungan yang erat dengan *ovate*, yang berhubungan dengan bentuk buah (Fts) (Zygier *et al.*, 2005). Selain itu, fw4.1 dan fw4.2 telah diidentifikasi sebagai QTL utama untuk berat buah yang terletak pada kromosom 4 (Zygier *et al.*, 2005). Selain itu, QTL FWE1.1 pada kromosom 1 berada pada Lokasi yang sama dengan FW-1, yang sebelumnya dilaporkan oleh Han *et al.*, (2016).

4.4 QTL yang berkaitan dengan jumlah Lokulus

Jumlah lokus (Lcn) adalah salah satu karakter agronomi yang signifikan dalam menentukan ukuran buah. Dalam penelitian mengenai cabai, terdapat sedikit kajian yang berfokus pada lokus yang berasal dari karpel bunga. Terdapat sebanyak sembilan QTL jumlah lokulus buah Nlo (*number of loculus*), termasuk diantaranya adalah Nlo2.1, Nlo8.1, Nlo12.1, dan Nlo12.2. Nlo2.1 kemungkinan berkaitan dengan lcn2.1, yang merupakan lokus utama QTL pada kromosom 2 (Ma *et al.*, 2022).

Meskipun terdapat penelitian yang menyatakan bahwa jumlah lokula tidak berpengaruh nyata terhadap ukuran buah (Zygier *et al.*, 2005), peneliti lain menyampaikan bahwa jumlah lokula berhubungan erat dengan karakter-karakter lain. Jumlah lokula berkorelasi positif dengan Ftw dan Ftd, dan sebaliknya, berkorelasi negatif dengan Ftl dan Fts (Arjun *et al.*, 2018). Tujuh belas QTL telah diidentifikasi berkaitan dengan buah cabai diantaranya adalah ftw2.1, ftl2.1, ftd2.1, fts1.1, dan lcn1.1, berturut-turut berhubungan dengan berat buah, panjang buah, diameter buah, bentuk buah, dan jumlah lokula (Ma *et al.*, 2022).

Berdasarkan lokasinya di dalam kromosom, ftw2.1 terletak di antara CA514272 dan GI712 pada posisi 106 cM. Sementara QTL fw2.1 terletak pada sekitar 156 Mbp pada spesies cabai *C. frutescens* dan *C. chinense*. QTL fw2.1 ini berada pada lokasi yang sama dengan dengan QTL bentuk buah *ovate*. Adanya *silencing* gen *CaOvate* pada kultivar cabai bulat (*round*) menyebabkan bentuk buah cabai yang lebih memanjang. Hal ini menunjukkan bahwa *CaOvate* mengendalikan bentuk buah. Posisi fisik ftl2.1 telah diidentifikasi berada dekat dengan ftw2.1, begitu pula ftd2.1, yang menunjukkan bahwa lokus ini mempunyai peran penting dalam sifat buah. Dalam penelitian lain, telah diketahui suatu QTL yang berkaitan dengan diameter buah dan berat buah berada pada posisi 170 Mbp. Selain itu, posisi fisik ftd2.1 (sekitar 153 Mbp) terletak berjauhan dari FD-2 (1 Mbp hingga 2 Mbp) (Han *et al.*, 2016), sedangkan fts1.1, ftd1.1, dan lcn1.1 terletak pada sekitar 294 Mbp.

Dalam penelitian yang berfokus pada sifat kuantitatif *Capsicum* spp., lokus fs3.1 dan fs10.1 terletak pada kromosom 3 dan 10, yang diidentifikasi sebagai QTL utama yang berperan dalam pemanjangan bentuk buah. Begitu pula lokus fs8.1 dan bulat telur, yang mengatur pemanjangan bentuk buah pada tomat, ditemukan pada posisi genom yang sama pada cabai. Selain itu, untuk bobot buah, gen fw2.2 dan fw3.2 pada tomat, yang mendasari gen *Cell Number Regulator* (CNR) dan *KLUH*, masing-masing, juga dilaporkan pada cabai. QTL fw2.1 dan fw4.1 dari cabai dipetakan ke lokasi sintenik dari lokus fw2.1 dan fw4.2b pada tomat. Jumlah lokus yang berkaitan dengan rongga berisi biji yang berasal dari karpel, yang banyak berpengaruh pada bentuk dan ukuran buah, dikendalikan terutama oleh *fasciated* (*FAS*) dan nomor lokus (LC) QTL pada tomat. Interaksi QTL ini menjelaskan variasi fenotipik yang signifikan pada nomor lokus. Selain lokus *fas* dan *lc*, beberapa nomor lokus pengontrol QTL tambahan juga telah dilaporkan. Bagaimanapun, belum ada gen yang berhasil diidentifikasi untuk mengatur perkembangan meristem bunga.

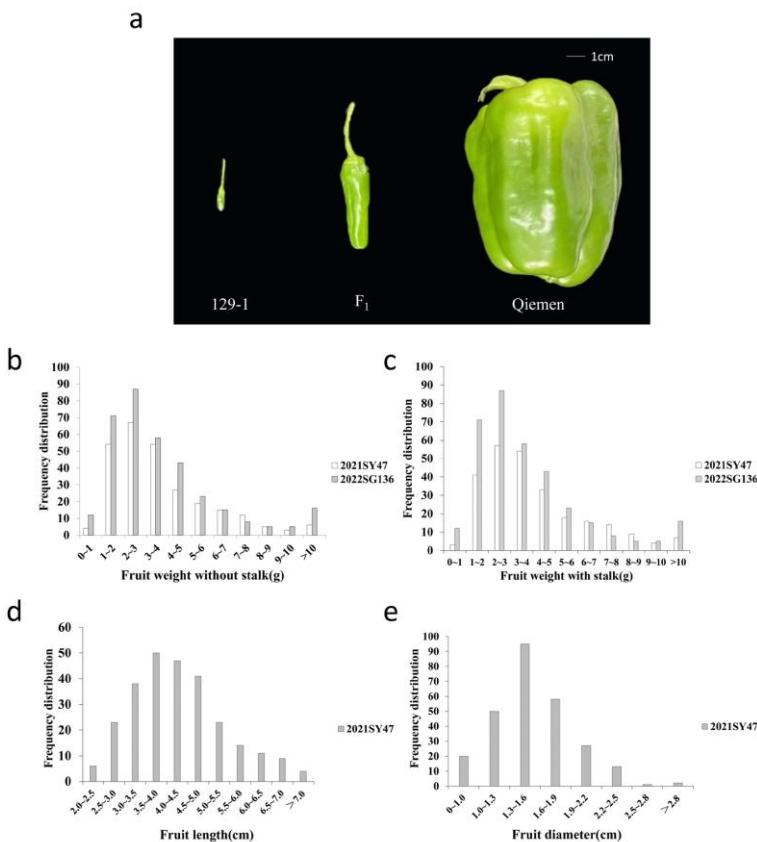
BAB V

Genetika Bentuk Buah Cabai

Studi tentang kontrol genetik terhadap bentuk buah pada cabai telah banyak dilakukan pada genus *Capsicum*, terutama pada spesies *C. annuum* dan family Solanaceae yang lain. Sudah banyak penelitian tentang jumlah lokus/ruang dari buah yang terbukti berkaitan dengan bentuk buah. Beberapa gen yang mempengaruhi bentuk buah tomat secara langsung maupun tidak langsung telah diidentifikasi. Pada cabai telah diidentifikasi beberapa gen penentu bentuk buah yang ortolog dengan gen-gen penentu bentuk buah pada tomat. Penggunaan penanda molekuler yang dimiliki bersama antara tomat dan cabai memungkinkan perbandingan lokasi QTL pada kedua spesies ini (Zygier *et al.*, 2005; Chaim *et al.*, 2006a).

Bentuk buah pada berbagai famili, termasuk Solanaceae, secara umum ditentukan oleh beberapa karakter, yaitu: jumlah karpel, panjang buah, dan berat buah (Wang *et al.*, 2022). Sejauh ini, telah diketahui bahwa berat buah berkaitan dengan ukuran buah, sementara lokus genetik yang mempengaruhi ukuran buah dan yang menentukan bentuk buah diketahui berkaitan atau bahkan sama. Sebagai contoh, pada kromosom 2 cabai, satu QTL utama, fw2.1, dipetakan di wilayah yang sama dengan fw2.1 tomat (Chaim *et al.*, 2006a). Gen-gen yang menentukan berat buah (*fruit weight, fw*) seperti fw1.1, fw2.2, fw3.1, dan fw4.1 umumnya mempengaruhi pertumbuhan buah, yang kemudian menentukan ukuran buah. Hal ini menyebabkan terjadinya lebih banyak variasi ukuran, tetapi hanya sedikit atau bahkan tidak menyebabkan perubahan bentuk. Sebaliknya, gen-gen yang menentukan bentuk buah umumnya mempunyai pengaruh yang kecil terhadap ukuran buah (Tanksley, 2004).

Dalam upaya melacak gen-gen yang berkaitan dengan bentuk buah, Guan *et al.* (2024) menganalisis sifat kuantitatif yang berhubungan dengan berat buah melalui persilangan intraspesifik *Capsicum annuum*, yaitu antara varietas paprika yang dibudidayakan, cv. Qiemen, dan cabai liar, “129–1” (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*), yang merupakan nenek moyang liar dari *C. annuum* (Gambar 19). Dengan membandingkan ekspresi dari 19 gen yang



Sumber: Guan *et al.*, 2024

Gambar 17. Distribusi frekuensi F2 (Qiemen × 129–1). (a): Buah dari induk dan buah F1. (b): Distribusi frekuensi per berat buah tanpa tangkai yang dibuang pada populasi F2 (Qiemen × 129–1). (c): Distribusi frekuensi per berat buah dengan tangkai yang dibuang pada populasi F2 (Qiemen × 129–1). (d): Distribusi frekuensi panjang buah yang dibuang pada populasi F2 (Qiemen × 129–1). (e): Distribusi frekuensi diameter buah yang dibuang pada populasi F2 (Qiemen × 129–1).

dianalisis dengan qRT-PCR, serta sekuen gen yang dikombinasikan dengan anotasi gen, ditemukan bahwa gen *Capana02g002938* dan *Capana02g003021* adalah gen kandidat yang berkaitan dengan QTL qFW2.1, sedangkan *Capana03g000903* berkaitan dengan QTL qFW3.1 (Guan *et al.*, 2024).

Gen-gen yang menentukan jumlah karpel terdiri dari gen-gen yang menentukan jumlah ruang dalam buah (lokula), yaitu *fascia* yang membagi ruang dalam buah dan jumlah lokula, yang berperan dalam menentukan ukuran dan bentuk akhir buah. Pada tomat, terdapat tiga lokus utama yang mempengaruhi bentuk buah, yang hanya sedikit berpengaruh terhadap ukuran buah. Lokus ini adalah *OVATE* (terletak pada kromosom 2), *SUN* (terletak pada kromosom 8), dan *fs8.1* (juga pada kromosom 8) (Chen *et al.*, 2023).

Gen spesifik yang berkontribusi terhadap variasi bentuk dan ukuran buah pada tomat dan cabai antara lain *LC* (*locule number*), *FAS* (*fasciated*), *SUN* (*Sad1p/Unc-84*), dan *OVATE* (Rodríguez *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2018; Maurya *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2024a). Gen *LC* dan *FAS* bertanggung jawab untuk menentukan jumlah lokus, yaitu rongga yang menampung benih, sehingga mempengaruhi ukuran dan bentuk buah tomat secara keseluruhan. Gen *SUN* dan *OVATE* berperan dalam pemanjangan buah (Souza *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2023). Selain itu, gen *CLV* memainkan peran penting dalam ukuran buah dengan mengatur meristem bunga atau meristem apikal pucuk, yang penting untuk memelihara sel induk dan memfasilitasi perkembangan dan diferensiasi (Shinohara & Matsubayashi, 2015). Regulasi ini terjadi melalui pensinyalan terbalik *CLAVATA-WUSCHEL*, dengan keluarga gen *CLV* yang terdiri dari beberapa anggota, termasuk *CLV1*, *CLV2*, dan *CLV3*, yang masing-masing memiliki fungsi unik dalam sistem regulasi umpan balik yang mengatur aktivitas meristem pada tanaman. Gen *CLV1* mempunyai peran penting dalam regulasi jalur sinyal yang penting untuk mengontrol ukuran meristem pucuk dan bunga (Chou *et al.*, 2016; Hazak & Hardtke, 2016; Somssich *et al.*, 2016).

Gen-gen yang banyak dilaporkan berkaitan dengan bentuk buah umumnya mengkode protein yang mempengaruhi jumlah sel, ukuran sel, pembelahan, serta arah pembelahan sel. Sesuai dengan fungsinya, gen-gen ini mencakup *CNR* (*cell number regulator*), *CSR* (*cell size regulator*), *CYP78A* (*cytochrome P450*), *SUN*, *OVATE*, *TRM* (*TONNEAU1 Recruiting Motif*), *YABBY*, dan domain *WOX* (Pan *et al.*, 2020).

5.1 Gen *Ovate*

Pada awal abad ke-20, para peneliti menemukan adanya lokus khusus yang menyebabkan morfologi buah tomat berbentuk seperti buah pir, yang ditandai dengan penyempitan pada ujung batang (Liu *et al.*, 2002). Pada saat yang sama, penelitian lain mengidentifikasi lokus serupa yang menghasilkan bentuk buah, mulai dari *oblate* hingga oval. Investigasi lebih lanjut menunjukkan bahwa gen-gen ini kemungkinan besar bersifat alelik, yang semuanya berkaitan dengan lokus pengkode bentuk tomat yang bulat telur (Rodríguez *et al.*, 2011). Sekitar 75 tahun kemudian, terdapat informasi baru mengenai lokus *ovate* (Ku *et al.*, 2000). Dengan dihasilkannya galur yang hampir isogenik untuk bulat telur, menunjukkan bahwa lokus tunggal ini menentukan bentuk buah pir dan bentuk buah yang memanjang. Inilah saat pertama kali gen *OVATE* teridentifikasi pada tomat (Liu *et al.*, 2002)

Baru-baru ini, gen *OVATE* telah dikloning dan ditemukan berhubungan dengan kelas baru dari protein pengatur yang diduga terlokalisasi dalam nukleus (Wang *et al.*, 2016). Protein ini disebut sebagai *domain OVATE* dari kelompok protein *OVATE* yang disebut sebagai *Ovate Family Protein* (OFP). OFP diketahui berperan dalam regulasi berbagai aspek morfologi buah pada tanaman (Chahar *et al.*, 2021). Penelitian telah menunjukkan bahwa OFP terdapat di semua tumbuhan darat yang diteliti sejauh ini, dan variasinya ditentukan oleh domain *OVATE* yang terkonservasi (Liu *et al.*, 2014). Pada berbagai tanaman, OFP menunjukkan berbagai fungsi (Tabel 1).

Tabel 1. OPP pada berbagai tanaman (Liu *et al.*, 2022).

| No. | Species | Nama OPP | Fungsi |
|-----|--------------------------------|---|--|
| 1. | <i>Arabidopsis thaliana</i> | AtOFP13, AtOFP6, AtOFP1, AtOFP4, AtOFP5 | Perkembangan ovula, pembentukan dinding sel sekunder, morfologi daun, morfologi polong, aktivitas polen, dan perbaikan DNA. |
| 2. | <i>Capsicum annuum</i> | CaOFP20, CaOFP1 | Bentuk buah |
| 3. | <i>Lycopersicon esculentum</i> | OPF | Bentuk buah |
| 4. | <i>Musa paradisiaca</i> | MaOFP1 | Pematangan buah |
| 5. | <i>Cucumis melo</i> | CmOFP13 | Bentuk buah |

Melalui penelitian-penelitian selanjutnya, *OVATE* diketahui bekerja dengan mengatur pembelahan sel secara negatif, atau dengan kata lain menghambat pembelahan sel, sehingga menghambat pertumbuhan tanaman. Ekspresi berlebih dari gen *OVATE* ini menyebabkan berkurangnya ukuran organ tanaman (Liu *et al.*, 2002). Gen ini diekspresikan sejak tahap awal perkembangan bunga (kurang dari 10 hari setelah penyerbukan), dan berlanjut hingga dua minggu awal setelah bunga mekar (Liu *et al.*, 2002). Ekspresi *OVATE* terlihat pada daerah tertentu, termasuk pada ujung pucuk tanaman, pada kuncup bunga yang masih sangat muda, dan pada tahap awal pemasakan buah (saat mulai terdeteksi adanya perubahan warna pada buah) (Rodríguez *et al.*, 2011).

Mutasi *non-sense* pada ekson kedua gen *OVATE* menyebabkan gen tersebut tidak berfungsi, sehingga menghasilkan ciri khas buah berbentuk seperti buah pir (Liu *et al.*, 2002). Pada mutan bulat telur, pola pembelahan sel di daerah proksimal (pangkal) buah menunjukkan variasi yang mencolok. Secara khusus, terdapat pengurangan jumlah sel yang mengarah ke bagian tengah buah, sementara peningkatan terlihat di daerah proksimal dan distal (ujung) (Czerednik *et al.*, 2015). Mutasi yang menyebabkan perubahan dari buah bulat menjadi buah memanjang atau berbentuk pir menghasilkan

kodon stop prematur pada ekson kedua. Potensi kehilangan fungsi akibat mutasi ini sejalan dengan sifat resesif dari alel yang menghasilkan bentuk buah memanjang atau seperti pir (Liu *et al.*, 2002).

Asal mula mutasi spontan pada gen *OVATE* masih belum diketahui. Namun, analisis terhadap berbagai plasma nutfah hanya menunjukkan satu alel mutan *OVATE*, yang terbatas pada subset plasma nutfah tertentu, yang memperlihatkan buah memanjang atau berbentuk pir (Wu *et al.*, 2018). Salah satu aspek menarik dari mutasi *OVATE* adalah bahwa mutasi ini tidak menghasilkan fenotip tunggal. Dalam latar belakang genetik tertentu, mutasi ini menghasilkan buah memanjang dengan leher yang sangat menyempit, mirip dengan buah pir. Sebaliknya, dalam konteks genetik yang berbeda, penyempitan leher sangat sedikit atau bahkan tidak ada, dan tingkat pemanjangan buah tidak terlalu jelas. Hal ini menunjukkan bahwa lokus *OVATE* mungkin berinteraksi dengan lokus lain dalam genom.

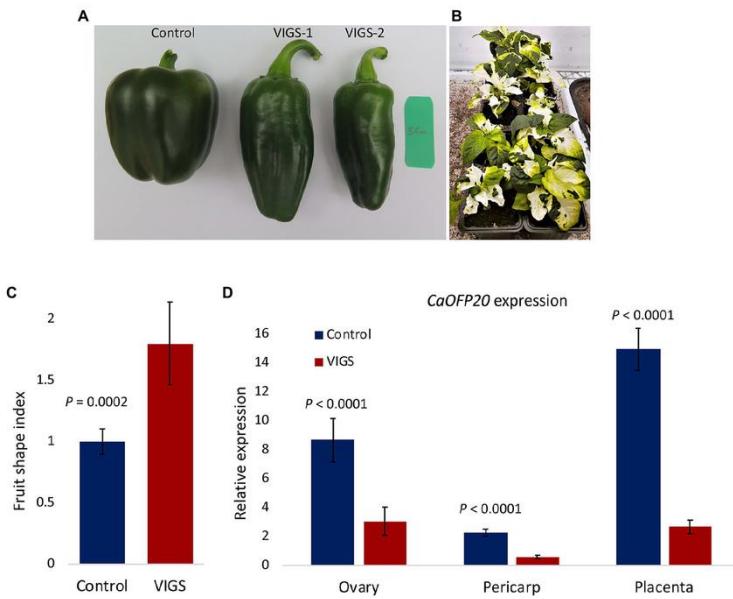
Penelitian lebih lanjut mengenai interaksi gen *OVATE* dengan gen lain dalam menentukan bentuk buah menunjukkan hubungan antara *OFP* dan *TRM* (*TONNEAU1 Recruiting Motif*) (Li *et al.*, 2023). Indikasi adanya pengaruh pengelolaan organisasi mikrotubulus dalam menentukan bentuk organ semakin terlihat jelas. Organisasi mikrotubulus dipengaruhi oleh tingkat molekul pemberi sinyal sekunder, seperti Ca^{2+} dan hormon, serta modulasi ekspresi *OFP* dan *TRM* selama tahap perkembangan. Pengorganisasian mikrotubulus ini pada akhirnya berdampak pada pembelahan sel dan pemanjangan bentuk organ (Goldman *et al.*, 2023). *OFP* bertanggung jawab atas penempatan *TRM* pada mikrotubulus. Mutasi yang menyebabkan berkurangnya atau tidak adanya ekspresi *OFP* mengakibatkan penempatan *TRM* yang tidak tepat, sehingga menyebabkan organ memanjang (Gambar 3a) (Wang *et al.*, 2015, 2016; Goldman *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023)

Gen yang menyerupai *OVATE* juga ditemukan dalam genus *Capsicum* (Cabai) dan menunjukkan fungsi yang mirip dengan *OVATE*. Gen ini disebut sebagai *CaOvate* (Tsaballa *et al.*, 2011), Ca

merupakan singkatan dari *Capsicum*. Penelitian menunjukkan bahwa *CaOvate* berperan penting dalam mengatur bentuk dan pemanjangan buah *Capsicum* dengan mempengaruhi ekspresi gen giberelin *CaGA20ox1* (Borovsky *et al.*, 2022). Penurunan regulasi *CaOvate* menyebabkan peningkatan kadar giberelin aktif dalam *pericarp* buah, yang sealanjutnya memicu pemanjangan buah dan peningkatan ekspresi *CaGA20ox1* (Tsaballa *et al.*, 2012). Pada akhirnya, perubahan ini menghasilkan buah berbentuk oval.

Pada tomat, gen *SlOFP20* terlibat dalam menentukan bentuk buah. Penelitian pada gen ortolognya, *CaOFP20*, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap bentuk buah cabai menunjukkan adanya mutasi substitusi yang menyebabkan perubahan asam amino dari lisin menjadi asam glutamat pada posisi basa ke-1901 dan 5226. Pengamatan pola ekspresi *CaOFP20* mulai dari tahap pembungaan hingga perkembangan buah mengindikasikan bahwa ekspresi gen maksimum terjadi pada saat akhir perkembangan daging buah dan plasenta (Borovsky *et al.*, 2022).

Silencing dari *CaOFP20* menggunakan *Virus-Induced Gene Silencing* (VIGS) ternyata berkaitan dengan dihasilkannya buah yang memanjang. Ketika dilakukan *silencing* dari Gen *CaOFP20*, buah cabai yang berbentuk balok (*blocky*) menunjukkan perubahan bentuk menjadi panjang dan ramping. Pengamatan ekspresi gen *CaOFP20* pada buah yang memanjang menunjukkan ekspresi yang lebih rendah dibandingkan dengan kontrol (Gambar 21).



Sumber: Borovsky *et al.*, 2022

Gambar 18. Perubahan ekspresi gen *CaOFP20* setelah dilakukan silencing dengan VIGS yang merubah bentuk buah *blocky* menjadi memanjang

Hal yang sama juga terjadi pada cabai berbentuk bulat. Ketika dilakukan konfirmasi dengan mengamati berbagai bentuk buah yang ada secara alami, ditemukan bahwa ekspresi gen *CaOFP20* selalu lebih rendah pada buah yang memanjang dibandingkan dengan buah yang cenderung bulat (Borovsky *et al.*, 2022). Pengamatan ekspresi gen tersebut pada ovarium saat anthesis, serta daging buah dan plasenta 3 minggu setelah bunga mekar, menunjukkan bahwa *CaOFP20* menunjukkan ekspresi yang lebih tinggi pada cabai berbentuk bulat dibandingkan dengan cabai berbuah memanjang. Temuan ini sesuai dengan peran gen *SlOFP20* sebagai penghambat pemanjangan buah pada tomat (Wu *et al.*, 2018).

Selain gen yang berperan positif terhadap bentuk buah, terdapat pula gen yang berperan berlawanan dengan gen-gen tersebut. Dua gen tersebut adalah *suppressor of ovate* (*sov1* dan *sov2*), yang dilaporkan berfungsi sebagai *suppressor* dari gen *OVATE*. Gen *sov1*

bertanggungjawab dalam menentukan bentuk obovoid dan memanjang, sedangkan *sov2* menentukan bentuk buah memanjang (Rodríguez *et al.*, 2013; Adhikari *et al.*, 2020). Kedua gen ini terletak di kromosom 10 dan 11 (Rodríguez *et al.*, 2013).

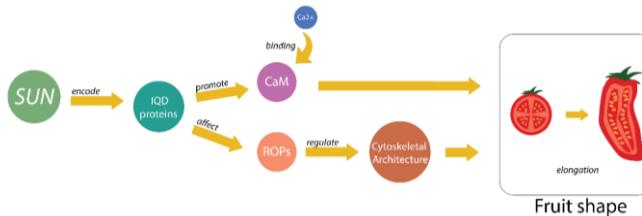
Gen lain yang masih dalam kelompok *OFP* adalah *CaPCR1* (*Capana12g002165*), yang merupakan kandidat gen yang berperan dalam pengaturan bentuk buah cabai bentuk cekung atau ujung runcing. *CaPCR1* (*Capana12g002165*), terletak di wilayah kandidat pada kromosom 12. Analisis qRT-PCR menunjukkan bahwa gen *CaPCR1* diekspresikan terutama di *gynoecium*, plasenta, dan *pericarp* buah hijau, yang sejalan dengan perannya dalam perkembangan ovarium dan buah. Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa *CaPCR1* merupakan kandidat gen yang berkontribusi dalam penentuan bentuk ujung buah pada cabai (Nimmakayala *et al.*, 2021).

5.2 Lokus *SUN*

Penelitian pada lokus *OVATE* berhasil mengidentifikasi beberapa varietas tomat yang menunjukkan bentuk buah memanjang tanpa adanya mutasi *OVATE*. Melalui pemetaan QTL pada salah satu varietas tersebut, ditemukan lokus bentuk buah yang signifikan terletak di kromosom 7. Lokus ini dinamakan *SUN*, berdasarkan varietas *Sun* 1642, tempat lokus ini pertama kali diidentifikasi (van der Knaap & Østergaard, 2018; Basaroh *et al.*, 2024). Meskipun variasi pada lokus *OVATE* dan *SUN* dapat menghasilkan bentuk buah memanjang, keduanya menunjukkan perbedaan yang jelas dalam karakteristik genetik, morfologi, dan perkembangannya. Pertama, lokus *SUN* menghasilkan pemanjangan yang seragam sepanjang sumbu longitudinal, sehingga buah tetap mempertahankan simetri bilateral. Sebaliknya, lokus *OVATE* cenderung menghasilkan pemanjangan yang asimetris (Paran & Van Der Knaap, 2007b). Selain itu, penyempitan leher atau bentuk buah pir belum pernah dikaitkan dengan lokus ini (van der Knaap *et al.*, 2002). Kedua, penelitian

perkembangan menunjukkan bahwa perubahan bentuk buah yang terkait dengan lokus *SUN* terjadi setelah penyerbukan, yaitu selama fase pembelahan sel dalam perkembangan buah (van der Knaap dan Tanksley, 2001). Hal ini berbeda dengan bentuk lonjong yang memengaruhi bentuk buah, jauh lebih awal dalam proses perkembangan bunga. Terakhir, alel lokus *SUN* menunjukkan pola pewarisan aditif, yang mengindikasikan bahwa mutasi yang menyebabkan pemanjangan buah mungkin lebih bersifat regulasi daripada struktural (van der Knaap dan Tanksley, 2001). Lokus *SUN* telah dipetakan terletak pada kromosom 7 dengan ukuran 66 kb (Van Der Knaap *et al.*, 2004).

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa gen *SUN* terlibat dalam regulasi pertumbuhan sel memanjang dan melintang, sehingga berdampak pada panjang dan bentuk buah pada tanaman tomat (Wu *et al.*, 2011; Monforte *et al.*, 2014). Mutasi pada gen *SUN* yang menyebabkan bentuk buah memanjang terutama terjadi pada varietas tomat yang didomestikasi, khususnya varietas tomat yang memiliki alel mutan *LC* dalam susunan genetiknya (Rodríguez *et al.*, 2011).



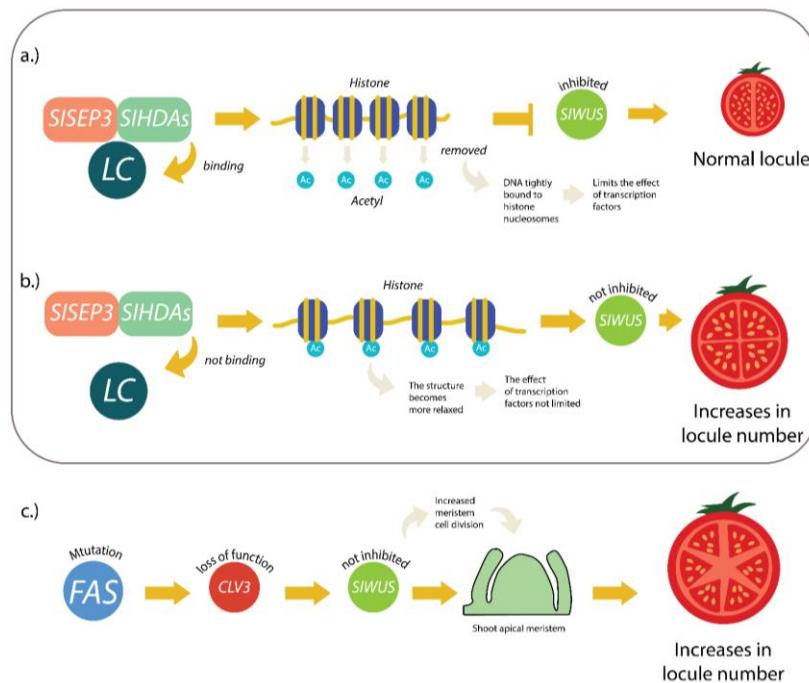
Sumber: Basaroh *et al.*, 2024

Gambar 19. Representasi skematis mekanisme pengaturan gen *SUN* dalam konteks pemanjangan buah. Keterangan: Cam= Calmodulin; ROPs= protein Rho tumbuhan.

5.3 FAS (*Fasciated*) dan LC (*Nomor Locule*)

Pada tomat, selain gen-gen bentuk buah *SUN*, *OVATE*, *cell number regulator/fruit weight* (*CNR/FW*), juga telah diidentifikasi

adanya gen *FASCIATED (FAS)* dan *LOCULE NUMBER (LC)* (Chen *et al.*, 2023). Mutasi pada *FAS* dan *LC* diketahui menghasilkan buah dengan lokus yang banyak, sehingga buah berukuran besar. Interaksi epistatis antara lokus gen *FAS* dan *LC* telah dilaporkan menyebabkan dihasilkannya jumlah lokus yang tinggi dan menjadi penyebab dihasilkannya buah berukuran sangat besar (Paran & Van Der Knaap, 2007a).



Sumber: Basaroh *et al.*, 2024

Gambar 20. Representasi skematis mekanisme pengaturan gen *LC* dan *FAS* dalam pengembangan lokus buah.

Pengaturan kuantitas lokus mempunyai efek pleiotropik, yang menunjukkan bahwa dampaknya tidak hanya terbatas pada jumlah lokus saja, tetapi juga mempengaruhi bentuk dan ukuran buah (Nimmakayala *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2022; Basaroh *et al.*, 2024). Gen *FAS* dan *LC* ini secara sinergis mengontrol bentuk buah pipih dan jumlah lokul, serta memiliki efek pleiotropik pada berat dan bentuk buah (van der Knaap *et al.*, 2014).

Pada tanaman tomat yang menunjukkan pembentukan lokula normal, faktor transkripsi kotak MADS SlSEP3 berinteraksi dengan gen *LC*. Interaksi ini memfasilitasi pengikatan SlSEP3 ke *histone deacetylase SIHDA*. Hasil dari pengikatan ini adalah hilangnya gugus asetil dari protein histon, yang menyebabkan ikatan yang lebih erat antara DNA dan nukleosom histon (23a). Akibatnya, proses ini membatasi fungsi faktor transkripsi, polimerase, dan DNA, yang pada akhirnya menghambat transkripsi gen *SlWUS* dan menghasilkan jumlah lokus standar. Sebaliknya, jika terjadi mutasi pada gen *LC* (diilustrasikan pada Gambar 23b), pengikatan SlSEP3 dan SIHDA ke *LC* terganggu. Gangguan ini memungkinkan gugus asetil tetap berada pada histon, sehingga menghasilkan struktur kromatin yang lebih rileks. Akibatnya, gen *SlWUS* menjadi aktif, sehingga menyebabkan peningkatan jumlah lokus pada buah.

Gen *FAS* dan *LC* secara sinergis mengontrol bentuk buah pipih dan jumlah lokus, yang mempunyai efek pleiotropik terhadap bobot buah dan bentuk (Rodríguez *et al.*, 2011; Basaroh *et al.*, 2024). Lokus *FAS* dan *LC* ini bekerja dengan cara bersinergi dengan gen-gen lain untuk mengkode bentuk buah. Gen *LC* bersinergi dengan *WUS*, sedangkan gen *FAS* bersinergi dengan gen *CLV3*.

Gen *FAS*, yang disebut juga dengan *YABBY*, terletak pada kromosom 11 (Cong *et al.*, 2008; Knaap *et al.*, 2014; Monforte *et al.*, 2014). Gen *FAS* mengkodekan faktor transkripsi *YABBY*. Penurunan ekspresinya disebabkan oleh penyisipan intron pertama yang signifikan, diperkirakan antara 6 dan 8 kilobase, yang menyebabkan peningkatan jumlah lokus pada buah (Cong *et al.*, 2008). Gen *YABBY* terlibat dalam berbagai proses fisiologis pada tanaman, khususnya dalam diferensiasi daun dan perkembangan organ bunga (Tanaka *et al.*, 2017; Hao *et al.*, 2022). Selain itu, *YABBY* juga dikaitkan dengan gen *FAS* karena karakteristik analognya.

5.4 Lokus fs

Selain *SUN*, *OVATE*, dan *SIOFP20* yang diidentifikasi sebagai QTL pemanjangan buah, terdapat lokus lain yang juga menunjukkan keterkaitan dengan bentuk buah. Lokus ini adalah *fruit shape* (fs), yang telah dipetakan posisinya pada kromosom (Chaim *et al.*, 2006b; Borovsky *et al.*, 2022; Chaim *et al.*, 2003; Zygier *et al.*, 2005; Borovsky & Paran, 2011; Chen *et al.*, 2023). Sementara itu, gen *fs8.1* menentukan bentuk buah balok (*blocky*) dan agak memanjang.

Penelitian genetik dan molekuler akan adanya variasi bentuk buah pada berbagai spesies tanaman telah dilakukan (van der Knaap *et al.*, 2014; Borovsky *et al.*, 2022; Cao *et al.*, 2022; Khokhar *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2022). Penelitian-penelitian tersebut menyimpulkan adanya dua gen utama pemanjangan buah, yaitu gen *fruit shape* (fs) *fs3.1* dan *fs10.1*, pada kromosom 3 dan 10 (Kim *et al.*, 2014; Pan *et al.*, 2020; Borovsky *et al.*, 2022).

Persilangan antara bentuk buah memanjang dengan bulat kecil mengindikasikan adanya dominansi parsial dari bentuk bulat kecil. Indeks bentuk buah yang diukur dari sudut ujung buah mencerminkan tingkat pemanjangan buah, serta perbedaan antara bentuk memanjang dan bulat. Nilai indeks bentuk buah dan sudut ujung distal buah memiliki korelasi yang sangat kuat, yang menunjukkan adanya gen yang sama yang mengatur keduanya. Selain itu, indeks bentuk buah berkorelasi tinggi dengan panjang buah ($r=0,93$) dan berkorelasi sedang dengan lebar buah ($r=-0,5$). Hal ini menunjukkan bahwa panjang buah merupakan faktor dominan penentu indeks bentuk buah.

Penelitian menggunakan mutan *fs10* yang berkaitan dengan ovarium buah cabai, menunjukkan bahwa sel-sel ovarium pada galur cabai dengan buah berbentuk bulat lebih besar dan lebih banyak dibandingkan dengan buah yang memanjang. *fs10* tampaknya berpengaruh terhadap bentuk buah melalui mekanisme seluler bersama, termasuk ukuran, jumlah, dan bentuk sel.

5.5 Lokus *WUSCHEL*

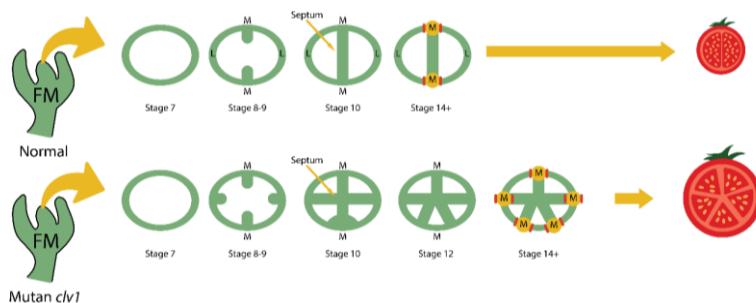
Lokus *WUSCHEL*, yang diperlukan untuk identitas sel induk di meristem, mendasari mutasi *LC*, sedangkan *CLAVATA3* mendasari mutasi *FAS* (Munos *et al.*, 2011; Xu *et al.*, 2015). Secara bersamaan, gen-gen ini mengendalikan berbagai aspek perkembangan, seperti pembelahan sel, jumlah karpel, ukuran meristem, dan organisasi, yang berkontribusi terhadap keanekaragaman morfologi buah (van der Knaap & Ostergaard, 2017).

5.6 Gen *CLAVATA* (*CLV*)

Famili gen *CLAVATA* (*CLV*) pertama kali diidentifikasi pada *Arabidopsis thaliana*. Famili gen ini terdiri dari *CLV1*, *CLV2*, dan *CLV3*. Pada umumnya, gen-gen *CLV* bekerjasama dengan gen lain untuk mengatur proses perkembangan organ tumbuhan tertentu. Kerjasama yang paling sering ditemukan adalah antara gen *CLAVATA* dengan *WUSCHEL*. Gen *CLAVATA1* (*CLV1*) berperan penting dalam perkembangan buah (Kim *et al.*, 2017; Basaroh *et al.*, 2024; Bashyal *et al.*, 2024). Sepanjang sejarah evolusi, variasi gen *CLV1* dan faktor-faktor terkait telah menyebabkan adaptasi bentuk dan ukuran buah yang beragam pada spesies dan populasi tanaman yang berbeda, termasuk diantaranya pada cabai ceremai (*Capsicum chinense*) (Nimmakayala *et al.*, 2021).

Mutasi pada gen *CLAVATA* menyebabkan peningkatan pembelahan sel, yang didorong oleh peningkatan ekspresi gen *WUS*. Dalam keadaan normal, gen *CLAVATA* memodulasi pembelahan sel dan pertumbuhan organ buah dengan menekan ekspresi gen *WUSCHEL*. *WUSCHEL*, sebagai faktor transkripsi, merupakan bagian integral dalam mendorong pembelahan sel. Namun, mutasi pada gen *CLAVATA* mengurangi atau menghilangkan penghambatan ekspresi *WUSCHEL* (Je *et al.*, 2018). *CLV1* bertanggung jawab untuk menerima sinyal dari *CLV3*, yang kemudian mengatur pertumbuhan sel dalam meristem bunga. Gangguan pada *CLV1* atau *CLV3*, seperti

terjadinya mutasi, akan mengganggu interaksi keduanya, yang mengakibatkan pembesaran meristem bunga dan berpotensi meningkatkan jumlah lokus pada buah. Selain itu, penelitian telah menunjukkan bahwa penghambatan ekspresi *CLAVATA1* dapat meningkatkan ekspresi gen *WUSCHEL*. Akibatnya, buah yang dihasilkan menjadi lebih besar pada *Capsicum chinense* (Nimmakayala *et al.*, 2021).



Sumber: Durbak dan Tax (2011)

Gambar 21. representasi skematis *clv1* mutan yang meningkatkan jumlah lokus dalam buah. Keterangan: FM: meristem bunga; M: wilayah medial; L: wilayah lateral

Proses perkembangan buah diawali dengan munculnya dua karpel dari meristem bunga, yang kemudian menyatu membentuk Septum yang memisahkan *gynoecium*. Di persimpangan Septum dan struktur silinder, plasenta berkembang, memfasilitasi pembentukan benih di dalam buah (Gambar 24). Mutasi resesif pada gen *CLV1* menghasilkan mutan *clv1* yang menunjukkan terjadinya pemisahan berulang pada septum saat proses perkembangan buah.

Daftar Pustaka

- Adhikari, P., McNellie, J., & Panthee, D. R. (2020). Detection of quantitative trait loci (QTL) associated with the fruit morphology of tomato. *Genes*, 11(10), 1–15. <https://doi.org/10.3390/genes11101117>
- Aisyah, Y. (2020). *Cara tepat olah habanero, bahan masakan Audrey MasterChef Indonesia*. Kompas.com. Diakses pada 20 Februari 2025, dari <https://www.kompas.com/food/read/2020/12/05/185816675/cara-tepat-olah-habanero-bahan-masakan-audrey-masterchef-indonesia>
- Arjun, K., Dhaliwal, M. S., Jindal, S. K., et al. (2018). Mapping of fruit length related QTLs in interspecific cross (*Capsicum annuum L.* × *Capsicum galapagoense Hunz.*) of chilli. *Breeding Science*, 68(2), 219–226. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.17073>
- Basaroh, A. S., Afifyanti, M., Kusnadi, J., et al. (2024). Genes responsible in the shape and size of Solanaceae fruits. *BIO Web of Conferences*, 94. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249405006>
- Bashyal, S., Gautam, C. K., & Müller, L. M. (2024). CLAVATA signaling in plant–environment interactions. *Plant Physiology*, 194(3), 1336–1357. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad591>
- Borovsky, Y., & Paran, I. (2011). Characterization of Fs10.1, a major QTL controlling fruit elongation in *Capsicum*. *Theoretical and Applied Genetics*, 123(4), 657–665. <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1615-7>
- Borovsky, Y., Raz, A., Doron-Faigenboim, A., et al. (2022). Pepper fruit elongation is controlled by *Capsicum annuum* ovate family protein 20. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.815589>
- Brewer, M. T., Moyseenko, J. B., Monforte, A. J., et al. (2007). Morphological variation in tomato: A comprehensive study of quantitative trait loci controlling fruit shape and development. *Journal of Experimental Botany*, 58(6), 1339–1349. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl301>
- Cao, Y., Zhang, K., Yu, H., et al. (2022). Pepper varioome reveals the history and key loci associated with fruit domestication and

-
- diversification. *Molecular Plant*, 15(11), 1744–1758. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2022.09.021>
- Chaim, A., Borovsky, Y., Rao, G., et al. (2006a). Comparative QTL mapping of fruit size and shape in tomato and pepper. *Israel Journal of Plant Sciences*, 54, 191–203. https://doi.org/10.1560/IJPS_54_3_191
- Chaim, A. B., Borovsky, Y., Rao, G. U., et al. (2003). Fs3.1: A major fruit shape QTL conserved in *Capsicum*. *Genome*, 46(1), 1–9. <https://doi.org/10.1139/g02-096>
- Chaim, A. B., Paran, I., Grube, R. C., et al. (2001). QTL mapping of fruit-related traits in pepper (*Capsicum annuum*). *Theoretical and Applied Genetics*, 102(6–7), 1016–1028. <https://doi.org/10.1007/s001220000461>
- Chaim, A. B., Borovsky, Y., Rao, G., et al. (2006b). Comparative QTL mapping of fruit size and shape in tomato and pepper. *Israel Journal of Plant Sciences*, 54(3), 191–203. https://doi.org/10.1560/IJPS_54_3_191
- Chamikara, M. D. M., Ishan, M., Karunadasa, S. S., et al. (2015). Morphological and microsatellite marker analysis of fruit size and shape in selected accessions and commercial cultivars of *Capsicum* species in Sri Lanka. *International Journal of Multidisciplinary Studies*, 2(1), 27. <https://doi.org/10.4038/ijms.v2i1.60>
- Chen, J., Pan, B., Li, Z., et al. (2023). Fruit shape loci Sun, Ovate, Fs8.1 and their interactions affect seed size and shape in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1091639>
- Chou, H., Zhu, Y., Ma, Y., et al. (2016). The CLAVATA signaling pathway mediating stem cell fate in shoot meristems requires Ca²⁺ as a secondary cytosolic messenger. *Plant Journal*, 85(4), 494–506. <https://doi.org/10.1111/tpj.13123>
- Cong, B., Barrero, L. S., & Tanksley, S. D. (2008). Regulatory change in YABBY-like transcription factor led to evolution of extreme fruit size during tomato domestication. *Nature Genetics*, 40(6), 800–804. <https://doi.org/10.1038/ng.144>
- Czerepnik, A., Busscher, M., Angenent, G., et al. (2015). The cell size distribution of tomato fruit can be changed by overexpression of CDKA1. *Plant Biotechnology Journal*, 13, 259–268. <https://doi.org/10.1111/pbi.12268>

-
- Dubois, M., Van den Broeck, L., & Inzé, D. (2018). The pivotal role of ethylene in plant growth. *Trends in Plant Science*, 23(4), 311–323. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.01.003>
- Durbak, A. R., & Tax, F. E. (2011). CLAVATA signaling pathway receptors of *Arabidopsis* regulate cell proliferation in fruit organ formation as well as in meristems. *Genetics*, 189(1), 177–194. <https://doi.org/10.1534/genetics.111.130930>
- Etsy. (2025). *Serrano pepper seeds*. Etsy. Diakses pada 20 Februari 2025, dari <https://www.etsy.com/listing/1533635795/serrano-pepper-seeds-25-seeds-free>
- Goldman, I. L., Wang, Y., Alfaro, A. V., et al. (2023). Form and contour: Breeding and genetics of organ shape from wild relatives to modern vegetable crops. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1–20. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1257707>
- Guo, G., Pan, B., Yi, X., et al. (2023). Genetic diversity between local landraces and current breeding lines of pepper in China. *Scientific Reports*, 13(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29716-4>
- Han, K., Jeong, H. J., Yang, H. B., et al. (2016). An ultra-high-density bin map facilitates high-throughput QTL mapping of horticultural traits in pepper (*Capsicum annuum*). *DNA Research*, 23(2), 81–91. <https://doi.org/10.1093/dnare/dsv038>
- Harans, J., & Sung, E. (2024). *18 types of peppers and how to cook with them*. Epicurious. Diakses pada 15 Oktober 2024, dari <https://www.epicurious.com/expert-advice/types-of-peppers>
- Hazak, O., & Hardtke, C. S. (2016). CLAVATA1-type receptors in plant development. *Journal of Experimental Botany*, 67(16), 4827–4833. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw247>
- Hirakawa, Y. (2021). CLAVATA3, a plant peptide controlling stem cell fate in the meristem. *Peptides*, 142, 170579. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2021.170579>
- Hong, J. P., Ro, N., Lee, H. Y., et al. (2020). Genomic selection for prediction of fruit-related traits in pepper (*Capsicum* spp.). *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.570871>
- Hu, Y. X., Tao, Y. B., & Xu, Z. F. (2017). Overexpression of *Jatropha* Gibberellin 2-Oxidase 6 (*JCGA2OX6*) induces dwarfism and smaller leaves, flowers, and fruits in *Arabidopsis* and *Jatropha*. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02103>

-
- International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI). (1995). *Descriptors for Capsicum (Capsicum spp.)*. Rome, Italy.
- Jang, G., Yoon, Y., & Choi, Y. D. (2020). Crosstalk with jasmonic acid integrates multiple responses in plant development. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ijms21010305>
- Je, B. I., Xu, F., Wu, Q., et al. (2018). The clavata receptor Fasciated Ear2 responds to distinct CLE peptides by signaling through two downstream effectors. *eLife*, 7, 1–21. <https://doi.org/10.7554/eLife.35673>
- Khokhar, E. S., Lozada, D. N., Nankar, A. N., et al. (2022). High-throughput characterization of fruit phenotypic diversity among New Mexican chile pepper (*Capsicum* spp.) using the Tomato Analyzer software. *HortScience*, 57(12), 1507–1517. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16815-22>
- Kim, H. J., Wu, C. Y., Yu, H. M., et al. (2017). Dual CLAVATA3 peptides in *Arabidopsis* shoot stem cell signaling. *Journal of Plant Biology*, 60(5), 506–512. <https://doi.org/10.1007/s12374-017-0083-2>
- Kim, S., Park, M., Yeom, S. I., et al. (2014). Genome sequence of the hot pepper provides insights into the evolution of pungency in *Capsicum* species. *Nature Genetics*, 46(3), 270–278. <https://doi.org/10.1038/ng.2877>
- Kirii, E., Goto, T., Yoshida, Y., et al. (2017). Non-pungency in a Japanese chili pepper landrace (*Capsicum annuum*) is caused by a novel loss-of-function *Pun1* allele. *Horticulture Journal*, 86(1), 61–69. <https://doi.org/10.2503/hortj.MI-148>
- van der Knaap, E., Chakrabarti, M., Chu, Y. H., et al. (2014). What lies beyond the eye: The molecular mechanisms regulating tomato fruit weight and shape. *Frontiers in Plant Science*, 5, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00227>
- Ku, H. M., Grandillo, S., & Tanksley, S. D. (2000). *Fs8.1*, a major QTL, sets the pattern of tomato carpel shape well before anthesis. *Theoretical and Applied Genetics*, 101(5–6), 873–878. <https://doi.org/10.1007/s001220051555>
- Lee, H. R., Kim, K. T., Kim, H. J., et al. (2011). QTL analysis of fruit length using RRAMP, WRKY, and AFLP markers in chili pepper. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 52(6), 602–613. <https://doi.org/10.1007/s13580-011-0002-2>
- Lee, H. Y., Ro, N. Y., Patil, A., et al. (2020). Uncovering candidate genes controlling major fruit-related traits in pepper via

-
- genotype-by-sequencing based QTL mapping and genome-wide association study. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01100>
- Li, Q., Luo, S., Zhang, L., et al. (2023). Molecular and genetic regulations of fleshy fruit shape and lessons from *Arabidopsis* and rice. *Horticulture Research*, 10(7). <https://doi.org/10.1093/hr/uhad108>
- Liu, F., Zhao, J., Sun, H., et al. (2023). Genomes of cultivated and wild *Capsicum* species provide insights into pepper domestication and population differentiation. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41251-4>
- Liu, J., Wu, Y., Cui, X., et al. (2022). Genome-wide characterization of ovate family protein gene family associated with number of seeds per silique in *Brassica napus*. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.962592>
- Liu, J., Van Eck, J., Cong, B., et al. (2002). A new class of regulatory genes underlying the cause of pear-shaped tomato fruit. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(20), 13302–13306. <https://doi.org/10.1073/pnas.162485999>
- Liu, J., Xu, Y., Fang, P., et al. (2024a). Genetic regulation of fruit shape in horticultural crops: A review. *Horticulturae*, 10(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10111151>
- Liu, T., Dong, Y., Gao, S., et al. (2024b). Identification of *CaPCR1*, an OFP gene likely involved in pointed versus concave fruit tip regulation in pepper (*Capsicum annuum* L.) using recombinant inbred lines. *Theoretical and Applied Genetics*, 137(7). <https://doi.org/10.1007/s00122-024-04675-0>
- Lopez-Moreno, H., Basurto-Garduño, A. C., Torres-Meraz, M. A., et al. (2023). Genetic analysis and QTL mapping of domestication-related traits in chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Frontiers in Genetics*, 14, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1101401>
- Ma, X., Qiao, Y. M., Li, Y., et al. (2022). Identification of fruit traits related QTLs and a candidate gene, *CaBRX*, controlling locule number in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Horticulturae*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/horticulturae8020146>
- Maurya, D., Mukherjee, A., Akhtar, S., et al. (2021). Development and validation of the *OVATE* gene-based functional marker to assist fruit shape selection in tomato. *3 Biotech*, 11(11), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-03029-7>

-
- Maurya, V., Srinivasan, R., Nalini, E., et al. (2015). Analysis of stress responsive genes in *Capsicum* for salinity responses. *Annual Research & Review in Biology*, 6(1), 66–78. <https://doi.org/10.9734/arrb/2015/14107>
- McKenzie. (2024). *Pepper, Anaheim seeds*. McKenzie Seeds. Diakses pada 18 Februari 2025, dari <https://mckenzieseeds.com/collections/2024-seed/products/pepper-seeds-anaheim>
- Monforte, A. J., Diaz, A., Caño-Delgado, A., et al. (2014). The genetic basis of fruit morphology in horticultural crops: Lessons from tomato and melon. *Journal of Experimental Botany*, 65(16), 4625–4637. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru017>
- Nordic Gene Bank (NGB). (2007). *Classifying chile peppers. Classifying chile peppers*. Horticulture Update. Diakses pada 11 April 2024, dari https://aggie-hort.tamu.edu/newsletters/hortupdate/hortupdate_archives/2007/jul07/ClassifChilePeppers.html
- Nimmakayala, P., Lopez-Ortiz, C., Shahi, B., & Others. (2021). Exploration into natural variation for genes associated with fruit shape and size among *Capsicum chinense* collections. *Genomics*, 113(5), 3002–3014. <https://doi.org/10.1016/J.YGENO.2021.06.041>
- Pan, Y., Wang, Y., McGregor, C., & Others. (2020). Genetic architecture of fruit size and shape variation in cucurbits: A comparative perspective. *Theoretical and Applied Genetics*, 133(1), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s00122-019-03481-3>
- Pandit, M. K., Pandit, R., & Bairagi, S. (2020). Chili (pp. 253–268). In Ethnopharmacological Investigation of Indian Spice. doi: [10.4018/978-1-7998-2524-1.ch018](https://doi.org/10.4018/978-1-7998-2524-1.ch018)
- Paran, I., & van der Knaap, E. (2007). Genetic and molecular regulation of fruit and plant domestication traits in tomato and pepper. *Journal of Experimental Botany*, 58(14), 3841–3852. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm257>
- Rao, G. U., Ben Chaim, A., Borovsky, Y., & Others. (2003). Mapping of yield-related QTLs in pepper in an interspecific cross of *Capsicum annuum* and *C. frutescens*. *Theoretical and Applied Genetics*, 106(8), 1457–1466. <https://doi.org/10.1007/s00122-003-1204-5>
- Rodríguez, G. R., Kim, H. J., & Van Der Knaap, E. (2013). Mapping of two suppressors of OVATE (Sov) loci in tomato. *Heredity*, 111(3), 256–264. <https://doi.org/10.1038/hdy.2013.45>

-
- Rodríguez, G. R., Muños, S., Anderson, C., & Others. (2011). Distribution of *SUN*, *OVATE*, *LC*, and *FAS* in the tomato germplasm and the relationship to fruit shape diversity. *Plant Physiology*, 156(1), 275–285. <https://doi.org/10.1104/pp.110.167577>
- Samuels, J. (2015). Biodiversity of food species of the *Solanaceae* family: A preliminary taxonomic inventory of subfamily *Solanoideae*. *Resources*, 4(2), 277–322. <https://doi.org/10.3390/resources4020277>
- Schoof, H., Lenhard, M., Haecker, A., & Others. (2000). The stem cell population of *Arabidopsis* shoot meristems is maintained by a regulatory loop between the *CLAVATA* and *WUSCHEL* genes. *Cell*, 100(6), 635–644. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(00\)80700-X](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(00)80700-X)
- Shinohara, H., & Matsubayashi, Y. (2015). Reevaluation of the *CLV3*-receptor interaction in the shoot apical meristem. *The Plant Journal*, 82, 328–336.
- Sinnott, E. W., & Kaiser, S. (1934). Two types of genetic control over the development of shape. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 61(1), 1. <https://doi.org/10.2307/2481029>
- Somssich, M., Il Je, B., Simon, R., & Others. (2016). *CLAVATA-WUSCHEL* signaling in the shoot meristem. *Development (Cambridge)*, 143(18), 3238–3248. <https://doi.org/10.1242/dev.133645>
- Souza, L. C. S., Assis, L. A. G., de Moraes Catarino, A., & Others. (2019). Screening of chilli pepper genotypes against anthracnose (*Colletotrichum brevisporum*). *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 31(12), 919–929. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2019.v31.i12.2039>
- Swamy, K. R. (2023). Origin, domestication, taxonomy, botanical description, genetic diversity. *International Journal of Development Research*, 13(06), 63012–63033.
- Tanaka, W., Toriba, T., & Hirano, H. Y. (2017). Three *TOB1*-related *YABBY* genes are required to maintain proper function of the spikelet and branch meristems in rice. *New Phytologist*, 215, 825–839. <https://doi.org/10.1111/nph.14617>
- Tanksley, S. D. (2004). The genetic, developmental, and molecular bases of fruit size and shape variation in tomato. *Plant Cell*, 16(SUPPL.). <https://doi.org/10.1105/TPC.018119>
- The Living Seeds Company. (n.d.). *Organic Jalapeño hot pepper seeds - Capsicum annuum*. Diakses pada 20 Februari 2025, dari

-
- <https://www.livingseedcompany.com/products/organic-jalapeno-hot-pepper-capsicum-annuum>
- Trade Winds Fruits. (2025). *Pepperoncini pepper, Italian seeds*. Trade Winds Fruits. Diakses pada 18 Februari 2025, dari <https://www.tradewindsfruit.com/pepperoncini-pepper-italian-seeds>
- Tripodi, P., Cardi, T., Bianchi, G., & Others. (2018). Genetic and environmental factors underlying variation in yield performance and bioactive compound content of hot pepper varieties (*Capsicum annuum*) cultivated in two contrasting Italian locations. *European Food Research and Technology*, 244. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3069-5>
- Tsaballa, A., Pasentsis, K., Darzentas, N., & Others. (2011). Multiple evidence for the role of an *Ovate*-like gene in determining fruit shape in pepper. *BMC Plant Biology*, 11, 46.
- Van der Knaap, E., Chakrabarti, M., Chu, Y. H., & Others. (2014). What lies beyond the eye: The molecular mechanisms regulating tomato fruit weight and shape. *Frontiers in Plant Science*, 5(MAY), 1–13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00227>
- Van der Knaap, E., & Østergaard, L. (2018). Shaping a fruit: Developmental pathways that impact growth patterns. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 79, 27–36. <https://doi.org/10.1016/J.SEMCDB.2017.10.028>
- Van der Knaap, E., Sanyal, A., Jackson, S. A., & Others. (2004). High-resolution fine mapping and fluorescence *in situ* hybridization analysis of *Sun*, a locus controlling tomato fruit shape, reveals a region of the tomato genome prone to DNA rearrangements. *Genetics*, 168(4), 2127–2140. <https://doi.org/10.1534/genetics.104.031013>
- Wang, C., Cao, J., Hao, N., & Others. (2022). Genetic and molecular regulation mechanisms in the formation and development of vegetable fruit shape. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/app12031514>
- Wang, L., Li, J., Zhao, J., & Others. (2015). Evolutionary developmental genetics of fruit morphological variation within the *Solanaceae*. *Frontiers in Plant Science*, 6(APR), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00248>
- Wang, S., Chang, Y., & Ellis, B. (2016). Overview of *OVATE FAMILY PROTEINS*, a novel class of plant-specific growth regulators. *Frontiers in Plant Science*, 7(MAR2016), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00417>

-
- Wu, S., Zhang, B., Keyhaninejad, N., & Others. (2018). A common genetic mechanism underlies morphological diversity in fruits and other plant organs. *Nature Communications*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07216-8>
- Zhang, B., Hu, F., Cai, X., & Others. (2022). Integrative analysis of the metabolome and transcriptome of a cultivated pepper and its wild progenitor *Chiltepin* (*Capsicum annuum L. var. glabriusculum*) revealed the loss of pungency during *Capsicum* domestication. *Frontiers in Plant Science*, 12(January), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.783496>
- Zhao, X., Muhammad, N., Zhao, Z., & Others. (2021). Molecular regulation of fruit size in horticultural plants: A review. *Scientia Horticulturae*, 288(May), 110353. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110353>
- Zygier, S., Chaim, A., Efrati, A., & Others. (2005). QTLs mapping for fruit size and shape in chromosomes 2 and 4 in pepper and a comparison of the pepper QTL map with that of tomato. *Theoretical and Applied Genetics*, 111(3), 437–445. <https://doi.org/10.1007/s00122-005-2015-7>

Biografi Penulis



Estri Laras Arumingtyas, Prof. Dr. Ir., MScSt lahir di Trenggalek tanggal 18 Agustus 1963. Menyelesaikan S1 pada jurusan Agronomi, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor tahun 1987 lulus S2 pada department of Plant Science, University of Tasmania, Hobart, Australia tahun 1992. Pendidikan S3 diselesaikan 2006 pada program ilmu-ilmu Pertanian, Pasca Sarjana Universitas Brawijaya. Pada

tahun 1988 sampai sekarang sebagai staf pengajar Jurusan Biologi, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya dengan bidang kajian Genetika Tanaman.

Penulis mengampu mata kuliah Genetika, Bioteknologi Tanaman, Biologi Molekuler, Biologi Tanaman Hortikultur, Metodologi Penelitian Hayati, dan Penulisan Ilmiah dan Teknik Penulisan Ilmiah. Buku-buku yang telah ditulis dan telah terbit adalah Dasar Fisiologi dan Molekuler Bioremediasi (UB Press, 2023), Aplikasi Teknik PCR untuk Autentikasi Halal (UB Press, 2022), Fisio-Genetik Perkembangan Tanaman Cabai (UB Press Malang, 2022), Biologi Tanaman Hortikultura (UB Press Malang, 2021), *Polymerase Chain Reaction (PCR): Teknik dan Fungsi* (UB Press Malang, 2020), Mutasi, Prinsip Dasar, dan Konsekuensi (UB Press Malang, 2019), Genetika Mendel: Prinsip Dasar Pemahaman Ilmu Genetika (UB Press Malang, 2016), Biologi Molekular: Prinsip Dasar Analisis (Erlangga Jakarta, 2011), dan Teknik dan Analisis Biomolekul (UB Press Malang, 2007).



GENETIKA BENTUK BUAH CABAI

Buku "Genetika Bentuk Buah Cabai" ini disusun menjadi lima bab. Bab pertama membahas tentang variasi bentuk buah cabai dan klasifikasi yang dilakukan oleh berbagai entitas, meliputi klasifikasi bentuk buah menurut *Descriptor of Capsicum*, serta klasifikasi oleh peneliti dan khusus untuk Amerika Latin, daerah asal cabai. Bab kedua mengkaji faktor-faktor yang mempengaruhi bentuk buah, baik faktor internal (genetik) maupun lingkungan. Bab ketiga berfokus pada jenis penanda molekuler yang terkait dengan bentuk buah, mengeksplorasi hubungan antara bentuk fenotipik buah dan profil genotipiknya. Selain itu juga disajikan penanda seperti mikrosatelit, *Single Nucleotide Polymorphism* (SNPs), dan penanda molekuler lainnya terkait variasi bentuk buah cabai. Bab keempat mempelajari Lokus Sifat Kuantitatif (QTL) yang terkait dengan bentuk buah dan elemen morfologi yang terkait dengannya. Terakhir, bab kelima membahas berbagai gen yang bertanggung jawab terhadap pembentukan bentuk buah dan mekanisme yang mengatur proses ini.

ISBN 978-621-8438-04-0



FSH - PH PUBLICATIONS