



Rekayasa Genetik Tanaman dengan Gen Bt: Implikasi Bagi Keamanan Pangan dan Kesehatan

Ermy Amelia^{*1}, Uki Cahyana², Yusminah Hala³

^{1,2,3}Universitas Negeri Makassar, Indonesia

E-mail: ermyamelia02@gmail.com

Article Info	Abstract
Article History Received: 2025-03-11 Revised: 2025-04-27 Published: 2025-05-02 Keywords: <i>Bt Gene;</i> <i>Food Safety;</i> <i>Health;</i> <i>Genetic Engineering.</i>	Genetic Engineering of Plants with Bt Genes: Implications for Food Safety and Health, One of the advantages of genetic engineering techniques is the ability to insert genes from non-related organisms. This allows the utilization of beneficial resources that are not available in the organism. This research uses the literature review method, which is a search process in which researchers identify various journal articles, reference books, proceedings, and other scientific works related to genetic engineering of Bt gene plants for food safety and health to find ideas and analyze various phenomena based on research and studies that have been published by other researchers. The utilization of organism-based technology (biotechnology) is usually regulated to increase plant productivity, plant resistance to both pests and diseases, able to produce fruit with nutritional quality. Transgenic crops containing Bt genes have been widely commercialized in various countries. This success is characterized by a rapid increase in agricultural area and adoption by farmers in various parts of the world. However, their utilization still faces challenges in terms of regulation, environmental safety, and public acceptance. Although many studies have shown that Bt crops are relatively safe for humans and the environment, there are still concerns about their possible long-term effects.
Artikel Info Sejarah Artikel Diterima: 2025-03-11 Direvisi: 2025-04-27 Dipublikasi: 2025-05-02 Kata kunci: <i>Gen Bt;</i> <i>Keamanan Pangan;</i> <i>Kesehatan;</i> <i>Rekayasa Genetik.</i>	Abstrak Rekayasa Genetika Tanaman Bergen Bt: Implikasinya terhadap Keamanan pangan dan Kesehatan Pangan, Salah satu keunggulan teknik rekayasa genetika adalah kemampuannya menyisipkan gen dari organisme yang tidak berkerabat. Hal ini memungkinkan pemanfaatan sumber daya bermanfaat yang tidak tersedia dalam organisme tersebut. Penelitian ini menggunakan metode telaah pustaka, yaitu suatu proses penelusuran yang dilakukan oleh peneliti dengan mengidentifikasi berbagai jurnal, buku referensi, prosiding, dan karya ilmiah lainnya yang terkait dengan rekayasa genetika tanaman bergen Bt untuk keamanan dan kesehatan pangan guna menemukan gagasan dan menganalisis berbagai fenomena berdasarkan penelitian dan kajian yang telah dipublikasikan oleh peneliti lain. Pemanfaatan teknologi berbasis organisme (bioteknologi) biasanya diatur untuk meningkatkan produktivitas tanaman, ketahanan tanaman terhadap hama dan penyakit, serta mampu menghasilkan buah dengan mutu gizi yang baik. Tanaman transgenik yang mengandung gen Bt telah banyak dikomersialkan di berbagai negara. Keberhasilan ini ditandai dengan peningkatan luas areal pertanian yang pesat dan adopsi oleh petani di berbagai belahan dunia. Namun, pemanfaatannya masih menghadapi tantangan dari segi regulasi, keamanan lingkungan, dan penerimaan masyarakat. Meskipun banyak penelitian telah menunjukkan bahwa tanaman Bt relatif aman bagi manusia dan lingkungan, masih terdapat kekhawatiran tentang kemungkinan efek jangka panjangnya.

I. PENDAHULUAN

Pertanian modern terus berkembang sejalan dengan kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi. Salah satu inovasi yang menonjol adalah rekayasa genetika tanaman, yang memungkinkan penyisipan gen tertentu untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap hama, penyakit, dan kondisi lingkungan. Teknologi ini diharapkan dapat menjawab tantangan global dalam memenuhi kebutuhan

pangan yang terus meningkat. Salah satu bentuk aplikasi rekayasa genetika yang banyak digunakan adalah pengembangan tanaman dengan gen *Bacillus thuringiensis* (Bt) yang mampu menghasilkan protein insektisida untuk melindungi tanaman dari serangan hama. Meskipun tanaman Bt menawarkan berbagai keuntungan, seperti berkurangnya penggunaan pestisida kimia dan peningkatan hasil panen, namun ada kekhawatiran mengenai potensi

dampaknya terhadap keamanan pangan dan kesehatan masyarakat. Oleh karena itu, penting untuk mengkaji lebih lanjut dampak penggunaan tanaman Bt, baik dari segi manfaat maupun risikonya.

Bioteknologi modern memiliki peran besar dalam meningkatkan kualitas hidup dan kesejahteraan manusia di berbagai bidang, seperti pertanian, pangan, industri, kesehatan, dan lingkungan. Salah satu hasil penerapannya adalah Produk Rekayasa Genetika (GMO). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2015 tentang Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetika, PRG adalah organisme hidup, bagian-bagiannya, atau hasil olahannya yang memiliki susunan genetik baru karena penerapan bioteknologi modern. Teknologi ini, seperti halnya pemuliaan konvensional, bertujuan untuk memperbaiki sifat organisme, memperkaya kandungan gizi tanaman, dan menghasilkan vaksin melalui tanaman. Di sektor pertanian, rekayasa genetika telah menghasilkan berbagai tanaman transgenik dengan keunggulan tertentu. Beberapa contoh teknologi yang berhasil adalah padi Bt yang tahan terhadap penggerek batang, pepaya yang kebal terhadap virus bercak cincin pepaya, jagung Bt dan kapas Bt yang tahan terhadap hama *Lepidoptera*, kedelai yang toleran terhadap *herbisida*, tomat *Flavr Savr* yang memiliki masa simpan lebih lama, *Golden Rice* yang mengandung *beta-karoten* di endosperma, dan pisang yang dapat menghasilkan vaksin. Faktanya, jagung Bt dan kapas Bt telah dikomersialkan secara luas di berbagai belahan dunia (Estiati, 2015)

Salah satu keunggulan teknik rekayasa genetika adalah kemampuannya untuk memasukkan gen dari organisme yang tidak berkerabat dekat. Dengan cara ini, sumber gen yang bermanfaat dapat dimanfaatkan meskipun tidak tersedia pada organisme yang sejenis. Misalnya, padi Bt diperoleh dengan menyisipkan gen dari bakteri *Bacillus thuringiensis* (Bt), yang menghasilkan protein Bt untuk membunuh larva hama *Lepidoptera*. Penyisipan gen ini diperlukan karena sifat ketahanan terhadap hama *Lepidoptera* tidak ditemukan pada plasma nutfah padi. (Estiati dan Herman, 2015)

Perkembangan tanaman transgenik telah berkembang pesat sejak pertama kali dilaporkan pada tahun 1984 (Horsch, 1984). Salah satu aspek yang banyak mendapat perhatian adalah pengembangan tanaman transgenik yang tahan terhadap hama, yang umumnya memanfaatkan gen dari *Bacillus thuringiensis* (Bt). Pada tahun

1995, tanaman transgenik pertama kali diinisiasi (Bt). Pada tahun 1995, tanaman transgenik pertama tersedia bagi petani di Amerika Serikat, termasuk jagung hibrida dengan gen cry IA(b) (*Maximizer*) oleh Novartis, kapas (*Maximizer*) oleh Novartis, kapas dengan gen cry IA(c) (*Bollgard*), dan kentang dengan gen cry 3A (*Newleaf*) yang dikembangkan oleh Monsanto. Area yang ditanami jagung transgenik telah tumbuh secara signifikan, dari 158 hektar pada tahun 1996 menjadi sekitar 1,20-1,60 juta hektar pada tahun 1997, dan meningkat lagi menjadi 6,70 juta hektar pada tahun 1998. (Matten, 1998). Pada tahun 1998, lebih dari 10 tanaman pangan telah berhasil direkayasa secara genetik agar tahan terhadap hama, termasuk tembakau, tomat, kentang, kapas, padi, jagung, poplar, cemara putih, kacang polong, kacang hijau, stroberi, dan kanola (Schuler, 1998).

Di Indonesia, teknologi rekayasa genetika telah diterapkan melalui penanaman kapas Bt secara komersial dalam skala terbatas di Sulawesi Selatan pada tahun 2001-2002. Izin komersialisasi terbatas ini diberikan setelah dilakukan evaluasi risiko keamanan hayati oleh Tim Teknis Keamanan Hayati dan dinyatakan aman oleh Komisi Keamanan Hayati (Herman, 2003). Namun, meskipun teknologi ini menawarkan banyak manfaat, masih terdapat kekhawatiran mengenai dampaknya terhadap lingkungan, keanekaragaman hayati, pertanian berkelanjutan, serta kesehatan manusia dan hewan. Oleh karena itu, diperlukan regulasi yang ketat terkait *biosafety* dalam pemanfaatan Produk Rekayasa Genetika (GMO). Berdasarkan pengalaman petani kapas Bt di Sulawesi Selatan dan petani jagung Bt di luar negeri, jika Indonesia berencana menanam jagung GM di masa mendatang, studi terkait *biosafety* dan risiko sosial ekonomi perlu dilakukan sebelum komersialisasi. Meskipun terdapat kekhawatiran mengenai dampak lingkungan dan kesehatan dari tanaman GMO, tidak ditemukan bukti ilmiah yang menunjukkan adanya risiko signifikan setelah sebelas tahun penanaman jagung Bt di berbagai negara. Oleh karena itu, artikel ini akan membahas rekayasa genetika tanaman yang mengandung gen Bt dan jaminannya terhadap keamanan dan kesehatan pangan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode literature review, yaitu suatu proses pencarian di mana peneliti mengidentifikasi berbagai artikel jurnal, buku referensi, prosiding, dan karya ilmiah

lainnya terkait rekayasa genetika tanaman gen Bt bagi keamanan pangan dan kesehatan untuk menemukan gagasan, pemikiran, mengembangkan kesimpulan, serta menganalisis berbagai fenomena berdasarkan penelitian dan kajian yang telah dipublikasikan oleh peneliti lain. Proses pengumpulan dan pencarian sumber dilakukan secara sistematis melalui langkah-langkah pengumpulan data, analisis data, dan interpretasi terhadap data pustaka yang berhasil dikumpulkan oleh penulis untuk menjawab permasalahan yang dihadapi dalam penulisan artikel ini.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

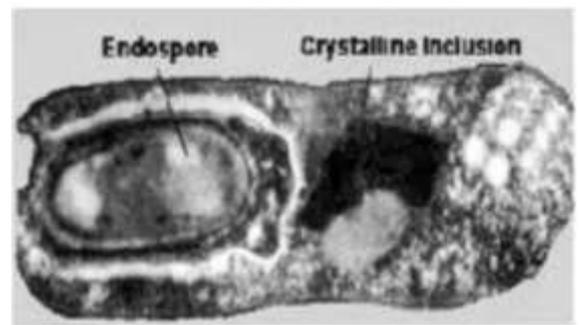
Rekayasa genetika tanaman atau yang dikenal juga dengan bioteknologi modern atau teknologi rekombinan DNA, berkembang pesat. Salah satu metode yang digunakan dalam pengembangannya adalah rekayasa partenokarpi (buah tanpa biji) serta teknik biofisika seperti radiasi. Proses ini memerlukan uji coba di fasilitas uji lapangan yang terbatas untuk menghasilkan tanaman transgenik yang tahan terhadap penyimpanan. Verifikasi dilakukan melalui teknik PCR dan visualisasi gen partenokarpi menggunakan gel agarosa (Rezaldi dkk., 2024). Teknologi berbasis organisme ini umumnya diterapkan untuk meningkatkan produktivitas tanaman, meningkatkan ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta menghasilkan buah dengan kualitas gizi yang lebih baik (Nuwmawati A, 2023).

Rekayasa genetika sendiri melibatkan pemindahan gen dari satu organisme ke organisme lain, baik dalam spesies yang sama maupun antar spesies, untuk menghasilkan produk yang bermanfaat bagi makhluk hidup. Awalnya, teknologi ini hanya diterapkan pada tanaman untuk mengatasi kekurangan pangan global. Namun seiring perkembangannya, rekayasa genetika tidak hanya diterapkan pada tanaman dan hewan, tetapi juga pada manusia dan organisme lintas spesies. Prinsip utama teknologi ini adalah memodifikasi struktur asam nukleat DNA atau memasukkan gen baru ke dalam organisme penerima, sehingga memungkinkan gen tersebut berasal dari spesies lain (Mahrus, 2014).

Salah satu contoh penerapan rekayasa genetika adalah penggunaan gen Bt. Gen ini berasal dari bakteri tanah *Bacillus thuringiensis* (Bt) yang telah lama dimanfaatkan oleh petani di negara-negara maju sebagai pestisida hayati yang aman. Istilah "cry" merupakan kependekan dari *crystal*, yang merujuk pada protein kristal

yang dihasilkan oleh strain Bt dan berfungsi sebagai insektisida (*insecticidal crystal protein*), yang mampu membunuh hama serangga. Hingga saat ini, berbagai gen Bt telah diisolasi dan diklasifikasikan menjadi delapan kelompok cry berdasarkan tingkat virulensinya terhadap serangga sasaran. Misalnya, gen cryI, cryIX, dan cryX efektif terhadap *Lepidoptera*, sedangkan cryV dapat membunuh *Lepidoptera* dan *Coleoptera* (Herman, 2016).

Gen Bt pertama kali ditemukan pada tahun 1901 oleh ahli biologi Jepang, Shigetane Ishiwatari, sebagai penyebab penyakit sotto yang menyerang ulat sutera. Bakteri ini kemudian diberi nama *Bacillus thuringiensis*. Pada tahun 1911, Ernst Berliner berhasil mengisolasi bakteri ini dari tepung Mediterania yang mati di Thuringia, Jerman, dan menamainya *Bacillus thuringiensis* (Bt). Pada tahun 1915, Berliner melaporkan adanya inklusi kristal dalam spora Bt, meskipun fungsi insektisidanya belum diketahui pada saat itu. Baru pada tahun 1956 ditemukan bahwa kristal parasporal bertanggung jawab atas efek insektisida terhadap serangga kelompok *Lepidoptera* (Milner, 1994). Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh (Zakharyan, 1979) mengungkapkan keberadaan plasmid pada strain Bt dan menunjukkan bahwa plasmid berperan dalam pembentukan endospora dan kristal.



Gambar 1. Spora *Bacillus thuringiensis* "dari Hofte dan Whitely(1989)".

Tanaman hasil rekayasa genetika pertama kali dikembangkan pada akhir tahun 1980-an dengan ekspresi protein insektisida (Cry) dari bakteri *Bacillus thuringiensis* (Bt). Bakteri ini dipilih karena spesifisitasnya yang tinggi dan catatan keamanannya yang baik dalam *bioformulasi* berbasis mikroba (Fischhoff, 1978) dan (Peerlak, 1990). Sejak tanaman transgenik pertama kali dikomersialkan pada tahun 1996, luas lahan yang ditanami terus bertambah. Dua karakter utama yang paling banyak digunakan dalam tanaman

transgenik adalah toleransi herbisida (HT) dan ketahanan serangga. Jagung Bt pertama kali dibudidayakan secara global pada tahun 1996, sementara sejak tahun 2000, varian jagung Bt dengan sifat toleransi herbisida gabungan telah ditanam.

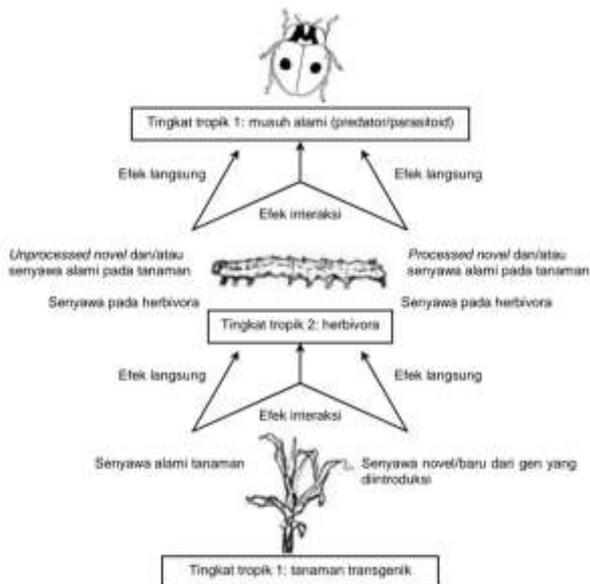
Beberapa tanaman transgenik berbasis gen Bt yang umum digunakan adalah tomat, jagung, dan kapas. Tomat merupakan tanaman pangan rekayasa genetika pertama yang dikomersialkan, *Flavr Savr*, yang dikembangkan oleh perusahaan *California Calgene* yang dapat matang lebih lambat tanpa menjadi lunak (Martineau B, 2001). Jagung Bt merupakan satu-satunya tanaman rekayasa genetika yang dijual secara komersial di lima negara Eropa (Spanyol, Portugal, Rumania, Republik Ceko, dan Slowakia). (Koch dkk., 2015) dan digunakan sebagai pakan ternak dan bahan baku untuk industri pati. Di Amerika Serikat, kapas Bt pertama kali dipasarkan pada tahun 1996 dengan nama dagang Bollgard oleh Monsanto Company. Kapas ini menghasilkan toksin Cry1Ac, yang sangat efektif terhadap ulat daun tembakau dan ulat buah kapas merah muda. Penerapan kapas Bt berkembang pesat di Amerika Serikat, khususnya di wilayah Western Cotton Belt untuk mengendalikan penggerek buah kapas merah muda, dan di wilayah Mid-South dan Southeast untuk melawan penggerek daun tembakau dan beberapa hama kecil lainnya seperti *Spodoptera frugiperda* dan *S. exigua* (Stewart, 2007). Jagung Bt generasi baru dikembangkan dengan menggabungkan dua gen Bt (dikenal dengan istilah stacked genes) atau dengan memodifikasi gen yang sudah ada. Antara tahun 2004 dan 2006, lima jenis jagung Bt generasi ini telah siap untuk dipasarkan. Salah satunya adalah Yield Gard(R) Plus, yang dikembangkan oleh Monsanto dan mengandung gen cryIA(b) dan cry3B(b1). Varietas ini dirancang untuk tahan terhadap hama seperti penggerek batang dan akar. Selain itu, ada juga jagung Bt event DAS-59122-7 yang memiliki gen cry34A(b1) dan cry35A(b1) yang ditujukan untuk mengatasi penggerek akar dan tahan terhadap penggerek batang serta cry35A(b1) yang ditujukan untuk mengatasi penggerek batang dan tahan terhadap herbisida *glufosinate*. Varietas ini dikembangkan oleh Dow AgroSciences dan dilepas bersama Pioneer Hi-Bred International pada tahun 2005 dengan nama Herculex RW. Jagung ini menjadi alternatif pengendalian penggerek akar, melengkapi keberadaan jagung Bt MON863 yang telah beredar sebelumnya (Herman, 2016). Sementara

itu, pada percobaan tomat transgenik, eksplan yang tidak melalui proses transformasi tidak dapat membentuk tunas atau menunjukkan reaksi regenerasi ketika ditumbuhkan pada media pemangkasan yang mengandung 15 mg/l higromisin B.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sekitar separuh dari eksplan yang diinokulasi menunjukkan pertumbuhan yang sukses, terutama pada media pencampuran yang mengandung 2,5 mg/l BA, 0,1 mg/l IAA, 300 mg/l sefotaksim, dan 15 mg/l higromisin B. Sebaliknya, eksplan yang tidak diinokulasi akan mati setelah tiga minggu. Tunas yang berhasil ditransformasi tumbuh pada media pemangkasan, sedangkan akar dapat terbentuk pada media dengan 15 mg/l higromisin dan 0,5 mg/l NAA, dan kemudian berhasil diaklimatisasi di luar laboratorium (Saker et al., 2011). Dalam memanfaatkan tanaman transgenik, Indonesia menerapkan prinsip kehati-hatian berdasarkan Protokol Cartagena. Salah satu keunggulan kapas Bt adalah kemampuannya menghasilkan serat dengan penggunaan insektisida yang minimal namun tetap menghasilkan produktivitas yang tinggi. Hingga saat ini, belum ada keluhan dari konsumen terkait racun atau alergen pada serat kapas Bt. Potensi racun Bt untuk mengganggu keanekaragaman hayati dianggap sangat kecil. Risiko penyebaran gen Bt ke kerabat sedarah kapas juga kecil karena gen tersebut diturunkan secara maternal, dan ada beberapa penghalang seperti kemandulan, ketidakcocokan, dan perbedaan rentang spesies. Meskipun demikian, penggunaan kapas Bt tetap memerlukan perhatian, terutama untuk mengantisipasi potensi munculnya resistensi terhadap toksin Bt akibat meningkatnya toleransi hama seperti *Helicoverpa zea* dan *Helicoverpa armigera*. Oleh karena itu, Indonesia perlu segera menyusun peraturan yang ketat tentang tanaman transgenik dan menerapkan strategi preventif untuk mencegah munculnya resistensi (Hasnam, 2002).

Proses pemanfaatan *Bacillus thuringiensis* pada tanaman seperti kapas Bt, jagung Bt, dan tomat Bt dilakukan dengan bantuan vektor berupa bakteri *Agrobacterium tumefaciens*. Bakteri ini memiliki kemampuan alami untuk mentransfer gen ke dalam genom tanaman melalui eksplan jaringan, seperti potongan daun, yang memiliki kemampuan regenerasi yang tinggi. Gen yang ditransfer terkandung dalam plasmid Ti (*tumor inducing*), dimana segmen DNA khusus yang disebut T-DNA akan berpindah

ke inti sel tanaman dan menyatu dengan genom tanaman (Astuti, 2024). *B. thuringiensis* menghasilkan kristal protein insektisida selama proses sporulasi (Hofte dan Whitely, 1989). Kristal protein ini dikenal sebagai δ -endotoksin, yang sebenarnya merupakan bentuk protoksin. Ketika terlarut dalam usus serangga, protoksin ini mengalami perubahan menjadi polipeptida berukuran lebih kecil (27-149 kDa) dengan sifat insektisida. Sebagian besar kristal Bt di alam berbentuk *protoksin*, yang aktivitas insektisidanya bergantung pada proses *proteolisis* dalam sistem pencernaan serangga. Oleh karena itu, berbagai galur dan isolat Bt terus dikembangkan dan dievaluasi untuk meningkatkan efektivitasnya sebagai pestisida biologis. Tanaman transgenik merupakan hasil rekayasa genetika dengan menyisipkan gen tertentu yang bertujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap hama, penyakit, atau kondisi lingkungan tertentu. Salah satu jenis tanaman transgenik yang paling banyak dikembangkan adalah Bt (*Bacillus thuringiensis*), yang mengandung gen yang menghasilkan protein yang bersifat racun bagi serangga tertentu. Teknologi ini menawarkan potensi besar dalam meningkatkan hasil pertanian dan mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia. Namun demikian, penerapannya di lapangan tetap harus mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan, terutama pada jaring-jaring makanan alami.

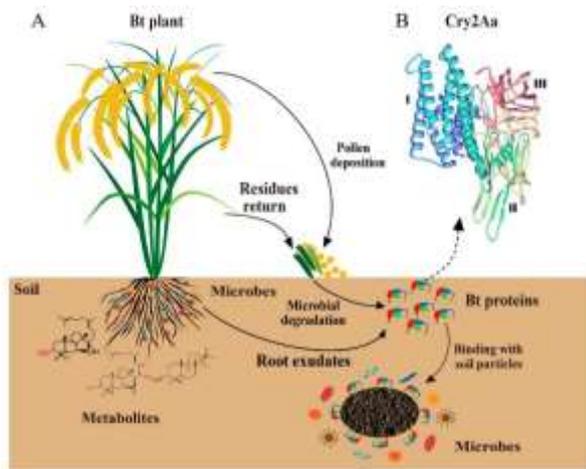


Gambar 2. Kerangka efek jaringan makanan pada tanaman transgenik tahan hama Hilbeck, (2001).

Tanaman transgenik merupakan hasil rekayasa genetika dengan menyisipkan gen

tertentu yang bertujuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap hama, penyakit, atau kondisi lingkungan tertentu. Salah satu jenis tanaman transgenik yang paling banyak dikembangkan adalah Bt (*Bacillus thuringiensis*), yang mengandung gen yang menghasilkan protein yang bersifat racun bagi serangga tertentu. Teknologi ini menawarkan potensi besar dalam meningkatkan hasil pertanian dan mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia. Namun demikian, penerapannya di lapangan tetap harus mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan, terutama pada jaring-jaring makanan alami.

Strain Bt pada umumnya dipilih berdasarkan kemampuannya dalam menghambat pertumbuhan serangga. Salah satu kendala utama dalam pemanfaatan Bt di lapangan adalah sensitivitasnya terhadap sinar ultraviolet (UV), sehingga seleksi juga dilakukan berdasarkan ketahanannya terhadap sinar UV. Seiring dengan kemajuan teknologi, gen Bt dapat diisolasi dan dimanipulasi menggunakan teknik rekombinan DNA untuk meningkatkan efektivitasnya. Salah satu metode yang digunakan adalah dengan menyisipkan gen Bt ke dalam vektor plasmid pada bakteri. Modifikasi Bt dapat dilakukan melalui teknik seperti transformasi protoplas, transduksi, dan konjugasi. Di antara metode-metode tersebut, teknik konjugasi merupakan yang paling umum digunakan untuk memperbaiki sifat Bt. Proses ini dilakukan dengan mengawinkan beberapa strain Bt dalam kultur campuran untuk memungkinkan terjadinya pertukaran plasmid antar strain. Teknik ini dinilai lebih alami dibandingkan transduksi dan transformasi protoplas karena dapat meningkatkan aktivitas insektisida dan memperluas spektrum targetnya. Beberapa penelitian telah berhasil memodifikasi Bt, seperti mentransfer gen kristal yang aktif terhadap *Lepidoptera* ke dalam strain yang juga aktif terhadap *Coleoptera*, sehingga menghasilkan strain Bt dengan spektrum insektisida yang lebih luas (Dent, 1993). Dalam pengembangan insektisida berbasis mikroba secara komersial, ada beberapa langkah yang harus dilakukan. Dimulai dari identifikasi hama sasaran, analisis pasar, pemilihan jenis patogen (mikroba), identifikasi strain yang sesuai, dan proses perbanyakan massal. Setelah itu, dilakukan proses paten, pembentukan jaringan distribusi, dan strategi pemasaran produk untuk memastikan keberhasilan penerapan asistensi berbasis Bt di lapangan.



Gambar 3. Perilaku lingkungan protein Bt (A) dan struktur tiga dimensinya (B). I, II, dan III: domain I, II, dan III.

Resistensi serangga yang berkembang secara alami di lapangan didefinisikan sebagai penurunan sensitivitas populasi serangga terhadap toksin akibat paparan terus-menerus terhadap zat tersebut di lingkungan alami. Tujuan utama pemantauan resistensi terhadap tanaman Bt adalah untuk mendeteksi tanda-tanda resistensi sedapat mungkin sehingga tindakan pencegahan dapat diambil sebelum kegagalan pengendalian terjadi (Tabashnik, 1994). Bukti kuat tentang perkembangan resistensi terhadap toksin Bt pada tanaman transgenik telah ditemukan pada tiga spesies serangga nokturnal, yaitu *Busseola fusca*, *Helicoverpa zea*, dan *Spodoptera frugiperda* (Matten dan kawan-kawan, 2008). Misalnya, di Puerto Rico, resistensi *S. frugiperda* terhadap jagung penghasil Bt Cry1F muncul dalam waktu empat tahun, yang menyebabkan penarikan varietas tersebut dari pasaran. Di Afrika Selatan, resistensi terhadap Cry1Ab juga terdeteksi pada *B. fusca* dalam waktu delapan tahun (Van Rensburg, 2007). Populasi kedua *B. fusca* yang resistan terhadap jagung Bt terdeteksi di wilayah lain di Afrika Selatan (Kruger dan kawan-kawan, 2009). Persentase petani yang melaporkan kerusakan parah akibat *B. fusca* meningkat secara signifikan dari 2,5% pada tahun 2005-2006 menjadi 58,8% pada tahun 2007-2008. Di Amerika Serikat, resistensi *H. zea* terhadap kapas Bt (Cry1Ac) terdeteksi dalam waktu 7-8 tahun. (Luttrell dan Ali, 2007) Sementara di Cina, resistensi terhadap Cry1Ac pada kapas Bt diidentifikasi pada *H. armigera* (Liu et al, 2010) Sebaliknya, ada laporan bahwa delapan spesies serangga target tetap rentan terhadap toksin tersebut meskipun telah terpapar selama

4-8 tahun. (Tabashnik et al, 2009). Namun, pada bulan November 2009, Monsanto melaporkan bahwa *P. gossypiella* menunjukkan resistensi terhadap Cry1Ac di empat distrik di India. Untuk mengatasi hal ini, mereka memproduksi kapas Bt yang mengubah kombinasi Cry1Ac dan Cry1Ab (Begla, 2010).

Penelitian yang dilakukan oleh Universitas Caen di Prancis, dengan dukungan dari Yayasan GEKKO Jerman, telah menunjukkan bahwa racun dari varietas jagung Bt Mon810 dapat berdampak signifikan pada sel manusia. Meskipun efek ini hanya terlihat pada konsentrasi tinggi, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami dampak potensialnya secara lebih rinci, termasuk kemungkinan interaksi dengan zat lain dalam makanan (Mesnage et al, 2011). Modifikasi genetik yang menyebabkan tanaman menghasilkan racun tersebut berpotensi mengubah struktur dan selektivitasnya. Varietas jagung Bt seperti Smart Stax diketahui menghasilkan beberapa jenis racun sekaligus, sehingga menghasilkan kadar racun yang tinggi. Pada tahun 2001, Badan Perlindungan Lingkungan AS (EPA) melakukan evaluasi ulang terhadap empat tanaman Bt yang disetujui sejak tahun 1995 untuk menilai dampaknya terhadap lingkungan, hewan non-target, dan keselamatan bagi manusia (Mendelshon et al, 2003).

Penilaian ulang EPA menunjukkan bahwa toksin Bt yang diuji secara *in vitro* terurai dengan cepat dalam cairan pencernaan manusia, dalam waktu 0-7 menit. Namun, hasil ini belum bisa dijadikan dasar untuk menyimpulkan bahwa toksin tersebut sepenuhnya aman bagi manusia atau bahwa semua jenis toksin Cry akan terurai secepat itu. Produk makanan olahan berbahan dasar jagung Bt seperti popcorn, keripik jagung, pati, dan minyak umumnya mengalami degradasi panas, sehingga toksinnya menjadi tidak aktif. Studi toksisitas akut juga menunjukkan bahwa tidak ada efek toksik pada tikus meskipun diberi dosis tinggi, yakni antara 3280 hingga 5000 mg/kg berat badan. Tanaman transgenik seperti kapas Bt yang mengandung gen Bt memiliki kemampuan alami untuk menolak serangan hama, sehingga kebutuhan penyemprotan pestisida dapat dikurangi. Ini memberikan keuntungan ekonomi dan lingkungan, serta melindungi kesehatan petani dengan mengurangi paparan terhadap bahan kimia berbahaya (Kouser et al., 2019)

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penanaman tanaman Bt menurunkan penggunaan insektisida, meningkatkan hasil panen,

dan secara keseluruhan meningkatkan pendapatan petani. Tidak hanya di kawasan tanaman Bt saja, tetapi juga ada dampak positif di kawasan sekitarnya yang disebut "efek halo." Kehadiran tanaman Bt menekan populasi hama di lingkungan sekitar, sehingga petani jagung non-Bt dan bahkan petani sayuran pun mendapat manfaat berupa peningkatan hasil dan pengurangan penggunaan insektisida. (Dively et al, 2018). Adopsi tanaman Bt seperti jagung dan kapas umumnya bertujuan untuk mengurangi kerusakan akibat serangga, tanpa secara langsung menargetkan pengaruh pada tanaman non-Bt atau mengurangi kadar aflatoxin pada kacang tanah. Namun, terdapat "efek halo" dari tanaman Bt yang turut menurunkan kandungan aflatoxin pada kacang tanah yang ditanam di sekitarnya (Jina et al., 2024)

Penelitian terkini meneliti kemungkinan efek halo dalam mengurangi risiko aflatoxin saat tanaman non-Bt ditanam berdekatan dengan tanaman Bt. Jika terbukti, efek ini tidak hanya akan berdampak pada pasar tetapi juga meningkatkan kesehatan manusia dan hewan. Aflatoxin adalah zat beracun dan karsinogenik yang diproduksi oleh jamur *Aspergillus flavus* dan *A. parasiticus*, yang sering menginfeksi tanaman seperti jagung dan kacang tanah saat terdapat luka akibat serangga. Aflatoxin tergolong karsinogen hati yang paling kuat dan merupakan karsinogen Grup 1 menurut IARC. Paparan aflatoxin melalui konsumsi makanan diperkirakan menyebabkan 25.200 hingga 155.000 kasus kanker hati setiap tahun. (Liu & Wu, 2010) Selain itu, aflatoxin juga berkontribusi terhadap terhambatnya pertumbuhan, menurunnya kekebalan tubuh, keracunan akut, dan kekurangan gizi. (McMillan et al., 2018) (Saha et al., 2022) dan (Saha et al., 2023) Jagung Bt terbukti mampu mengurangi risiko aflatoxin dengan mengurangi kerusakan akibat serangga, karena jamur ini mengkolonisasi tanaman melalui luka biji akibat serangga yang memakan tanaman. (Klich, 2007).

Satu keuntungan tambahan dari tanaman Bt dalam mengendalikan serangga adalah potensinya untuk mengurangi tingkat kontaminasi mikotoksin. Studi di berbagai belahan dunia menunjukkan bahwa tingkat fumonisin pada jagung Bt secara umum lebih rendah daripada pada jagung non-Bt. Meskipun tidak selalu demikian, penurunan ini diduga terkait dengan berkurangnya kerusakan oleh serangga, yang merupakan titik masuk utama bagi jamur penyebab fumonisin. (Hammod et al., 2004).

Untuk mencegah perkembangan resistensi dan memperluas jangkauan pengendalian hama, tanaman Bt generasi kedua dikembangkan yang mampu menghasilkan lebih dari satu jenis toksin. Salah satu toksin tambahan yang banyak digunakan adalah Cry2Ab dari kelompok Cry2, yang dikombinasikan dengan Cry1 untuk meningkatkan efektivitas terhadap hama ulat. Misalnya, pada tahun 2012, sekitar 69% kapas di AS adalah varietas yang mengandung Cry1Ac dan Cry2Ab. Di India pada tahun 2013 adalah 91%, dan di Australia pada tahun 2011 adalah 94%. (Brevault dan kawan-kawan, 2013) Dan (Choudhary B, 2014).

Meskipun tanaman pangan telah terbukti memberikan manfaat ekonomi dan mengurangi ketergantungan pada pestisida, masih ada kekhawatiran mengenai dampaknya terhadap kesehatan manusia dan keamanan pangan. Namun, bukti hingga saat ini menunjukkan bahwa tanaman pangan Bt kemungkinan lebih aman daripada metode pengendalian hama lainnya, dan manfaatnya kemungkinan lebih besar. (Shelton et al., 2002).

IV. SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Rekayasa genetika tanaman pangan dengan menyisipkan gen Bt telah meningkatkan ketahanan terhadap serangan hama secara signifikan, terutama dari kelompok Lepidoptera dan Coleoptera. Teknologi ini memungkinkan untuk dapat memproduksi insektisida protein nabati dari bakteri *Bacillus thuringiensis*, sehingga mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia. Tanaman pangan seperti jagung Bt dan kapas Bt telah banyak digunakan secara global, termasuk di Indonesia dalam skala terbatas. Meskipun teknologi ini menunjukkan banyak manfaat, tantangan seperti regulasi, keamanan lingkungan, dan penerimaan masyarakat masih perlu ditangani. Beberapa penelitian juga telah menunjukkan potensi resistensi hama terhadap Bt dan perlunya penelitian lebih lanjut tentang efek kesehatan jangka panjang. Oleh karena itu, penerapan teknologi ini harus dipantau secara ketat melalui evaluasi aspek biosafety dan sosial ekonomi, serta strategi mitigasi seperti manajemen resistensi dan regulasi yang ketat sehingga manfaatnya dapat dimaksimalkan tanpa menimbulkan risiko baru.

B. Saran

Diharapkan tulisan ini dapat memberikan wawasan baru bagi pembaca sehingga mampu menambah pemahaman mengenai pemanfaatan bioteknologi dalam bidang pertanian dan kesehatan, serta mendorong penerapan informasi yang diperoleh dalam praktik nyata untuk mendukung inovasi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

DAFTAR RUJUKAN

- Astuti, W. W. (2024). Pemberdayaan Bacillus Astuti, W. W. (2024). Pemberdayaan Bacillus Thuringiensis sebagai Biopestisida pada Tanaman. *Biogenerasi*, 10(1), 1–10.
- Begla. (2010). Hardy Cotton-munching Pests are Latest Blow to GM Crops. *Science*, 327(5972), 1439.
- Brevault, Heuberger, Zhang, Ellers-Kirk, Ni, & Masson. (2013). Potential shortfall of pyramided transgenic cotton for insect resistance management. *Proc Natl Acad Sci USA*.
- Choudhary B, G. K. (2014). Adoption, impact, progress & future. *Biotech Cotton in India*.
- Dent. (1993). The use of Bacillus thuringiensis as Insecticide. *Exploitation of Microorganisms Chapman and Hall*, 19–44.
- Dively et al. (2018). Regional Pest Sup-pression Associated with Widespread Bt Maize Adoption Benefits Vegetable Growers. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*, 115, 3320–3325.
- Estiati, A., & Herman, M. (2015). Regulasi Keamanan Hayati Produk Rekayasa Genetik di Indonesia. *Analisis Kebijakan Pertanian*, 13(2), 129. <https://doi.org/10.21082/akp.v13n2.2015.129-146>
- Fischhoff, et al. (1978). Insect Toleran Transgenic Tomato Plants. *Bio/Technology*, 5, 807–813.
- Hammod, Campbell, Pilcher, Degoyer, Robinson, & McMillen. (2004). Lower Fumonisin Mycotoxin Levels in the Grain of Bt Corn Grown in the United States in 2000-2002. *Agric Food Chem*, 52, 1390–1397.
- Hasnam. (2002). Polemik Kapas-Bt di Indonesia. *Perspektif*, 1(1), 1–8.
- Herman, M. (2003). Status Perkembangan Kapas Bt. *Buletin AgroBio*, 5(1), 1–13.
- Herman, M. (2016). Sebelas Tahun Perkembangan Jagung Bt dan Statusnya secara Global. *Jurnal AgroBiogen*, 3(2), 73. <https://doi.org/10.21082/jbio.v3n2.2007.p73-79>
- Hofte dan Whitely. (1989). Insecticidal Crystal Proteins of Bacillus thuringiensis. *Microbiol Mol Biol Rev*, 53(2), 242–255.
- Horsch, Fraley, P.R, R., A, S., Lioyd, & H, H. (1984). Inheritance of Functional Genes in Plants. *Science*, 223, 496–489.
- Jina, David, & Felicia. (2024). Bt corn and cotton planting may benefit peanut growers by reducing aflatoxin risk. *Plant Biotechnology Journal*, 3028–3036. <https://doi.org/10.1111/pbi.14425>
- Klich. (2007). Aspergillus Flavus: The Major Producer of Aflatoxin. *Mol Plant Pathol*, 8, 713–722.
- Koch, M. S., Ward, J. M., Levine, S. L., Baum, J. A., Vicini, J. L., & Hammond, B. G. (2015). The food and environmental safety of Bt crops. *Frontiers in Plant Science*, 6(APR), 1–22. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00283>
- Kouser, S., Spielman, D. J., & Qaim, M. (2019). Transgenic cotton and farmers' health in Pakistan. *PLoS ONE*, 14(10), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222617>
- Kruger et al. (2009). Prospective on the Development of The Stem Borer Resistance to Bt Maize and Refuge Compliance at The Vaalharts Irrigation Scheme in Shout Africa. *Crop Port*, 28, 684–689.
- Liu, A., & Wu. (2010). Global burden of aflatoxin-induced hepatocellular carcinoma: A risk assessment. 118, 818.
- Liu et al. (2010). Evidence of Field Evolved Resistance to Cry1Ac Expressing Bt Cotton in Helicoverpa Armigera in Northern China. *Pest Manag Sci*, 66, 155–161.
- Luttrell dan Ali. (2007). Exploring Selection for Bt resistance in Holiiothines: Results of Laboratory and Field Studiens. *Beltwide Cotton Conference*, 9–12.

- Mahrus. (2014). *Kontroversi Produk Rekayasa Genetika Yang Dikonsumsi Masyarakat*. 14(2), 1.
- Martineau B. (2001). First Fruit: the Creation of the FlavSavr Tomato and the Birth of Biotech Foods. *McGraw-Hill*, 269.
- Matten. (1998). EPA Regulation of Resistance Management of Bt Plantpesticide. *Paper Presented at a Joint Annual Meeting ESA and APS, Las Vegas, Nevada*.
- Matten et al. (2008). How Governmental Regulation Can Help the Integration of Insect Resistant Genetically Modified Corps Within IPM Programs. *Springer*, 27-39.
- McMillan, Renaud, Burgess, Orimadegun, Akinyinka, Allen, & Miller. (2018). Aflatoxin exposure in Nigerian children with severe acute malnutrition. *Food Chem Toxicol*, 111, 356-362.
- Mendelshon et al. (2003). Are Bt Crops Safe? *Nat. Biotechnol*, 21(9), 1003-1009.
- Mesnage et al. (2011). Cytotoxicity of Human Cells of Cry1Ac Bt Insecticidal Toxins Alone or With Glyphosphate-based Herbicide. *J Appl Toxicol*, 1-5.
- Milner. (1994). History of *Bacillus thuringiensis*. *Agric Ecosyst Environ*, 49, 9-13.
- Nuwmawati A, A. F. A. R. (2023). Pengaruh Rekayasa Genetika pada Organ Tumbuhan Produk Pangan. *International Journal of Technology, Education and Social Humanities*, 1(2), 55-68.
- Peerlak, et al. (1990). No Insect Resistant Cotton Plants. *Bio/Technology*, 8, 939-943.
- Rezaldi, F., Millah, Z., Susiyanti, S., Gumilar, R., & Yenny, R. F. (2024). Peran Biotek Gen Tanaman Pada Bidang Pangan dan Farmasi Sebagai Bahan Sediaan Pangan Fungsional, Bahan Aktif Obat dan Kosmetik Natural. *Jurnal Agroteknologi Merdeka Pasuruan*, 8(1), 01.
<https://doi.org/10.51213/jamp.v8i1.93>
- Saha, Turna, Gangur, Chen, & Wu. (2023). Effects of aflatoxin on the immune system: Evidence from human and animal research. *Crit Rev Food Sci. Nutr*, 7, 1-19.
- Saha, Turna, & Wu. (2022). Estimation of tolerable daily intake (TDI) for non-carcinogenic effects of aflatoxin. *Risk Anal*, 42, 431-438.
- Saker, M. M., Salama, H. S., Salama, M., El-Banna, A., & Abdel Ghany, N. M. (2011). Production of transgenic tomato plants expressing Cry 2Ab gene for the control of some lepidopterous insects endemic in Egypt. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 9(2), 149-155.
<https://doi.org/10.1016/j.jgeb.2011.08.001>
- Schuler, et al. (1998). Insect-resistant transgenic plants. *Tibtech*, 16, 168-175.
- Shelton, Zhao, & Roush, A. (2002). Economic, Ecological, Food Safety, And Social Consequences of the Deployent of Bt Transgenik Plants. *Annual Review En Entomology*, 47(845-881).
- Stewart, S. D. (2007). *Bt Cotton*. www.utcrops.com/cotton_insects/pubs/Wi29-Btcotton
- Tabashnik. (1994). Evolution of Resistance to *Bacillus thuringiensis*. *Annu Rev Entomol*, 39, 47-49.
- Tabashnik et al. (2009). Field-evolved Insect Resistance to Bt Crops: Definition, Theory, and data. *J Econ Entomol*, 102(6), 2011-2025.
- Van Rensburg. (2007). First Report of Filed Resistance by Stem Borer *BUSseo Lafusca* to Bt Transgenic Maize. *S.African J.Plant Soil*, 24(147-151).
- Zakharyan. (1979). Plasmid DNA from *Bacillus thuringiensis*. *Microbiologia*, 48(2), 226-229.