

Aplikasi Bioteknologi dalam Pengendalian *Aspergillus flavus* dan Mitigasi Kontaminasi Aflatoksin pada Kacang Tanah (*Arachis hypogaea L.*)

*Application of Biotechnology in Controlling Aspergillus flavus and Mitigating Aflatoxin Contamination in Peanuts (*Arachis hypogaea L.*)*

Auliya Safitri¹✉ | Muhammad Sarjan¹ | Muhammad Taufik Fauzi¹ | Pending Dadih Permana¹

^{1✉} Program Studi Magister Pertanian Lahan Kering, Pascasarjana Universitas Mataram, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat 83115, Indonesia

Abstrak

Aflatoksin merupakan mikotoksin karsinogenik yang dihasilkan oleh jamur *Aspergillus flavus* dan *A. parasiticus*. Kontaminasi senyawa ini paling banyak dijumpai pada kacang tanah di wilayah tropis, termasuk Indonesia. Kajian ini bertujuan mengevaluasi berbagai pendekatan bioteknologi dalam mengendalikan *A. flavus* sekaligus menekan kontaminasi aflatoksin pada kacang tanah (*Arachis hypogaea L.*). Metode yang digunakan ialah *Systematic Literature Review* (SLR) dengan menganalisis 11 jurnal ilmiah yang terbit pada rentang tahun 2015 hingga 2025. Hasil kajian menunjukkan bahwa teknologi *Host-Induced Gene Silencing* (HIGS) mampu menekan kontaminasi aflatoksin hingga kurang dari 20 ppb melalui pembungkaman gen *aflM* dan *aflP*. Teknologi *RNA interference* (RNAi) dengan plasmid p5XCAPD berhasil menghambat produksi aflatoksin B1 dan B2 hingga 100% pada galur transgenik. Pendekatan CRISPR/Cas9 juga menunjukkan potensi dalam menyunting gen biosintesis aflatoksin serta meningkatkan ketahanan tanaman. Pendekatan genomik dan proteomik berhasil mengidentifikasi gen-gen kunci seperti LOX, NBS-LRR, dan protein PR yang berperan dalam mekanisme ketahanan. Perpaduan strategi pengendalian pra-panen dan pasca-panen dengan pendekatan bioteknologi memberikan harapan besar untuk menekan kontaminasi aflatoksin secara efektif dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Aflatoksin; Bioteknologi; CRISPR; *Gene Silencing*; Kacang Tanah; RNAi

Abstract

Aflatoxin is a carcinogenic mycotoxin produced by the fungi *Aspergillus flavus* and *A. parasiticus*. Contamination with this compound is most commonly found in peanuts in tropical regions, including Indonesia. This study aims to evaluate various biotechnological approaches to control *A. flavus* and reduce aflatoxin contamination in peanuts (*Arachis hypogaea L.*). The method used was a Systematic Literature Review (SLR) analyzing 11 scientific journals published between 2015 and 2025. The study results showed that Host-Induced Gene Silencing (HIGS) technology can reduce aflatoxin contamination to less than 20 ppb by silencing the *aflM* and *aflP* genes. RNA interference (RNAi) technology using the p5XCAPD plasmid successfully inhibited aflatoxin B1 and B2 production by up to 100% in transgenic lines. The CRISPR/Cas9 approach also showed potential for editing aflatoxin biosynthesis genes and increasing plant resistance. Genomic and proteomic approaches have successfully identified key genes such as LOX, NBS-LRR, and PR proteins that play a role in resistance mechanisms. Combining pre- and post-harvest control strategies with biotechnological approaches offers great promise for effectively and sustainably suppressing aflatoxin contamination.

Keywords: Aflatoxin; Biotechnology; CRISPR; Gene Silencing; Peanut; RNAi

How to Cite: Junaidi, S.H., Sarjan, M., Fauzi, M. T., & Permana, P.D. (2026). Aplikasi Bioteknologi dalam Pengendalian *Aspergillus flavus* dan Mitigasi Kontaminasi Aflatoksin pada Kacang Tanah (*Arachis hypogaea L.*). *Journal of Multidisciplinary Science and Natural Resource Management* 1(3): 53-61.

1. Pendahuluan

Keamanan pangan merupakan salah satu isu global yang terus menjadi perhatian serius di berbagai belahan dunia. Seiring dengan pertumbuhan populasi manusia yang terus meningkat, kebutuhan akan pangan yang aman, bergizi, dan terjangkau menjadi semakin mendesak untuk dipenuhi. Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) mencatat bahwa setiap tahun terdapat sekitar 600 juta kasus penyakit yang ditularkan melalui makanan, dengan 420.000 di antaranya berujung pada kematian. Salah satu

ancaman terbesar terhadap keamanan pangan ialah kontaminasi mikotoksin, yakni senyawa beracun yang dihasilkan oleh berbagai jenis jamur pada komoditas pertanian. Kontaminasi ini tidak hanya berdampak pada kesehatan manusia, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi yang sangat besar bagi sektor pertanian dan perdagangan internasional.

Di antara berbagai jenis mikotoksin yang dikenal, aflatoksin merupakan kelompok yang paling berbahaya dan paling banyak diteliti. Aflatoksin adalah metabolit sekunder yang bersifat toksik, genotoksik, dan karsinogenik, dihasilkan terutama oleh jamur *Aspergillus flavus* dan *Aspergillus parasiticus* (Pandey et al., 2019). Terdapat beberapa jenis aflatoksin yang telah diidentifikasi, meliputi aflatoksin B1 (AFB1), B2 (AFB2), G1 (AFG1), G2 (AFG2), M1 (AFM1), dan M2 (AFM2) (Ajmal et al., 2022; Konatham et al., 2026). Dari keenam jenis tersebut, AFB1 dikenal sebagai varian paling toksik dan karsinogenik. International Agency for Research on Cancer (IARC) telah mengklasifikasikan AFB1 sebagai karsinogen Grup 1, yang berarti terdapat bukti yang cukup kuat bahwa senyawa ini dapat menyebabkan kanker pada manusia, khususnya kanker hati (Bhatnagar-Mathur et al., 2015). Paparan aflatoksin dalam jangka panjang, meskipun dalam dosis rendah, dapat menyebabkan imunosupresi, gangguan pertumbuhan pada anak-anak, serta berbagai gangguan kesehatan kronis lainnya.

Kontaminasi aflatoksin dapat terjadi pada berbagai komoditas pertanian, seperti serealia, kacang-kacangan, rempah-rempah, dan biji-bijian bermanfaat. Namun demikian, kacang tanah (*Arachis hypogaea* L.) merupakan salah satu komoditas yang paling rentan terhadap kontaminasi aflatoksin (Gelaye, 2025; Jayaprakash et al., 2019). Kerentanan ini disebabkan oleh karakteristik pertumbuhan kacang tanah yang unik, yakni pembentukan polong di dalam tanah (geocarpy), sehingga polong dan biji secara langsung bersentuhan dengan tanah yang merupakan habitat alami jamur *Aspergillus* (Akullo et al., 2025). Kondisi lingkungan seperti suhu tinggi, kelembaban, dan cekaman kekeringan pada fase pengisian polong semakin memperbesar peluang infeksi jamur dan akumulasi aflatoksin pada biji kacang tanah (Broto, 2018).

Kacang tanah sendiri merupakan komoditas pangan strategis yang memiliki nilai ekonomi tinggi di pasar global. Produksi kacang tanah dunia mencapai lebih dari 51,3 juta ton per tahun, dengan Tiongkok dan India sebagai produsen utama (Han et al., 2025). Komoditas ini mengandung minyak sebesar 40-60% dan protein sebesar 20-40%, menjadikannya sebagai sumber nutrisi penting bagi masyarakat di berbagai negara, khususnya di negara-negara berkembang (Jayaprakash et al., 2019). Di Indonesia, kacang tanah banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku berbagai produk olahan seperti bumbu pecel, bumbu gado-gado, saus kacang, selai kacang, dan aneka camilan. Oleh karena itu, kontaminasi aflatoksin pada kacang tanah bukan hanya persoalan keamanan pangan, melainkan juga menyangkut ketahanan gizi dan kesejahteraan masyarakat secara luas (Pushkarna et al., 2025; Wang et al., 2019).

Situasi kontaminasi aflatoksin pada komoditas pertanian di Indonesia terbilang mengkhawatirkan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa tingkat kontaminasi AFB1 pada jagung dan kacang tanah yang berasal dari Indonesia sebagian besar berada di atas batas maksimum yang diizinkan. Data dari (Broto, 2018) mengungkapkan bahwa cemaran aflatoksin pada kacang tanah di Indonesia berkisar antara 0,3 hingga 329,7 ppb, dengan beberapa sampel menunjukkan kontaminasi yang sangat tinggi. Kondisi iklim tropis dengan suhu dan kelembaban tinggi menjadi faktor utama yang mendukung pertumbuhan jamur *Aspergillus* dan produksi aflatoksin. Suhu tanah yang optimal untuk pertumbuhan jamur dan produksi aflatoksin berkisar antara 28 hingga 31°C, dengan puncak kontaminasi terjadi pada suhu sekitar 29°C (Jayaprakash et al., 2019). Praktik penanganan pasca-panen yang kurang memadai, seperti pengeringan yang tidak sempurna dan penyimpanan dalam kondisi lembab, semakin memperparah masalah kontaminasi ini.

Dampak ekonomi akibat kontaminasi aflatoksin sangatlah besar dan bersifat multidimensi. Secara global, kerugian yang ditimbulkan oleh jamur penghasil mikotoksin diperkirakan mencapai lebih dari 932 juta dolar AS per tahun. Di Afrika, kerugian akibat ketidakmampuan memenuhi standar keamanan pangan Uni Eropa untuk aflatoksin mencapai lebih dari 670 juta dolar AS per tahun (Bhatnagar-Mathur et al., 2015). Berbagai negara telah menetapkan batas maksimum aflatoksin yang berbeda-beda. FDA Amerika Serikat menetapkan batas 20 ppb untuk makanan manusia, sementara Uni Eropa menerapkan standar yang lebih ketat, yakni 2-4 ppb. Indonesia menetapkan batas maksimum 20-35 ppb, yang relatif lebih tinggi dibandingkan negara-negara maju. Perbedaan standar ini sering kali menjadi hambatan dalam perdagangan internasional dan menyebabkan penolakan ekspor produk kacang tanah dari negara-negara berkembang (Jayaprakash et al., 2019).

Berbagai pendekatan pengendalian aflatoksin telah dikembangkan selama beberapa dekade terakhir. Metode pengendalian konvensional meliputi pendekatan fisik seperti iradiasi gamma, sinar UV-C, dan teknologi ekstrusi; pendekatan kimiawi menggunakan minyak atsiri dan senyawa kimia tertentu; serta pendekatan biologis dengan memanfaatkan mikroorganisme antagonis seperti khamir dan bakteri asam laktat (Broto, 2018). Meskipun metode-metode tersebut menunjukkan tingkat keberhasilan tertentu, penerapannya masih menghadapi berbagai kendala. Metode fisik memerlukan peralatan khusus dan biaya operasional yang tinggi, metode kimiawi berpotensi meninggalkan residu yang berbahaya bagi kesehatan, sedangkan metode biologis sering kali tidak konsisten dalam hal efektivitas di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan untuk mengatasi permasalahan kontaminasi aflatoksin.

Kemajuan pesat dalam bidang bioteknologi membuka peluang baru untuk pengembangan strategi pengendalian aflatoksin yang lebih inovatif. Pendekatan bioteknologi modern seperti *Host-Induced Gene Silencing* (HIGS), *RNA interference* (RNAi), dan teknologi penyuntingan genom CRISPR/Cas9 menawarkan solusi yang lebih tepat sasaran dan berpotensi memberikan perlindungan jangka panjang terhadap kontaminasi aflatoksin (Sharma et al., 2018). Teknologi-teknologi ini bekerja dengan cara menargetkan gen-gen esensial dalam jalur biosintesis aflatoksin pada jamur *A. flavus*, sehingga produksi toksin dapat ditekan secara signifikan. Selain itu, pendekatan genomik dan proteomik juga telah berhasil mengidentifikasi berbagai gen dan protein yang berperan dalam mekanisme ketahanan alami tanaman terhadap infeksi jamur, yang dapat dimanfaatkan dalam program pemuliaan tanaman (Pandey et al., 2019).

Berdasarkan uraian di atas, kajian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara komprehensif berbagai pendekatan bioteknologi yang telah dikembangkan dalam pengendalian *A. flavus* dan mitigasi kontaminasi aflatoksin pada kacang tanah. Secara khusus, kajian ini akan menganalisis efektivitas teknologi HIGS dan RNAi dalam menekan produksi aflatoksin, mengevaluasi potensi teknologi CRISPR/Cas9 untuk pengembangan kacang tanah tahan aflatoksin, mengidentifikasi gen-gen kunci yang berperan dalam mekanisme ketahanan tanaman, serta mengkaji prospek dan tantangan penerapan bioteknologi dalam pengendalian aflatoksin di masa mendatang. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang utuh mengenai perkembangan terkini di bidang bioteknologi pengendalian aflatoksin dan menjadi acuan bagi penelitian dan pengembangan selanjutnya.

2. Bahan dan Metode

Kajian ini dilakukan dengan menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR), yakni suatu pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menyintesis bukti-bukti ilmiah yang relevan dengan pertanyaan penelitian tertentu. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan analisis yang komprehensif dan terstruktur terhadap literatur ilmiah yang tersedia, serta meminimalkan bias dalam pemilihan dan interpretasi sumber referensi.

2.1. Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan melalui berbagai basis data ilmiah bereputasi, meliputi Scopus, Web of Science, PubMed, dan Google Scholar. Pencarian dilakukan pada periode Juni hingga Oktober 2024 dengan menggunakan kombinasi kata kunci dalam bahasa Inggris dan Indonesia. Kata kunci yang digunakan meliputi: "aflatoxin", "Aspergillus flavus", "peanut", "groundnut", "Arachis hypogaea", "biotechnology", "RNAi", "RNA interference", "gene silencing", "HIGS", "CRISPR", "genome editing", "resistance", dan "control". Operator Boolean (AND, OR) digunakan untuk mengombinasikan kata kunci dan memperluas atau mempersempit hasil pencarian sesuai kebutuhan.

2.2. Kriteria Seleksi

Artikel yang diperoleh dari hasil pencarian kemudian diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal *peer-reviewed* pada rentang tahun 2015 hingga 2025, (2) artikel yang secara spesifik membahas pendekatan bioteknologi dalam pengendalian aflatoksin atau *A. flavus* pada kacang tanah, (3) artikel yang tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia, dan (4) artikel yang dapat diakses secara penuh (*full-text*). Adapun kriteria eksklusi meliputi: (1) artikel berupa prosiding konferensi atau makalah tanpa proses *peer-review*, (2) artikel yang tidak menjadikan kacang tanah sebagai komoditas utama kajian, dan (3) artikel yang tidak membahas pendekatan bioteknologi secara substansial.

2.3. Ekstraksi dan Analisis Data

Berdasarkan proses seleksi yang ketat, diperoleh 11 artikel ilmiah yang memenuhi kriteria inklusi untuk dianalisis secara mendalam. Dari setiap artikel, diekstraksi data-data penting yang meliputi: fokus penelitian, metode yang digunakan, temuan utama, gen atau protein target, efektivitas pengendalian, serta kelebihan dan keterbatasan masing-masing pendekatan. Data yang diperoleh kemudian disintesis dan dianalisis secara kualitatif untuk mengidentifikasi pola, tren, konsensus, serta kesenjangan dalam penelitian terkait bioteknologi pengendalian aflatoksin pada kacang tanah. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel ringkas dan narasi deskriptif yang sistematis.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Jurnal yang Dikaji

Sebelas jurnal ilmiah yang dikaji dalam *review* ini berasal dari berbagai sumber yang bereputasi internasional maupun nasional, dengan rentang waktu publikasi antara tahun 2015 hingga 2025. Jurnal-jurnal tersebut mencakup berbagai aspek terkait bioteknologi pengendalian aflatoksin, mulai dari pendekatan *gene silencing*, penyuntingan genom, hingga karakterisasi mekanisme ketahanan tanaman. Tabel 1 menyajikan ringkasan karakteristik masing-masing jurnal yang dianalisis dalam kajian ini.

Tabel 1 Ringkasan karakteristik jurnal yang dikaji

Sumber	Fokus Penelitian	Temuan Utama
(Pandey et al., 2019)	Resistensi genetik dan manajemen terintegrasi aflatoksin pada kacang tanah	Pendekatan omics efektif untuk identifikasi gen ketahanan; integrasi pra-panen dan pasca-panen diperlukan
(Prasad et al., 2023)	Multiplexed HIGS untuk pengendalian aflatoksin	Pembungkaman 4 gen (nsdC, veA, aflR, aflM) menekan aflatoksin hingga <20 ppb
(Prasad et al., 2023; Sharma et al., 2018)	Overeksprepsi defensin dan HIGS untuk ketahanan aflatoksin	Kacang tanah dengan HIGS aflM/aflP menghasilkan biji hampir bebas aflatoksin (1-2 ppb)
(Arias et al., 2015)	Pengendalian aflatoksin melalui RNAi pada kacang tanah	Reduksi AFB1 dan AFB2 hingga 100% pada galur transgenik 288-72 dan 288-74
(Jayaprakash et al., 2019)	Mekanisme ketahanan <i>A. hypogaea</i> terhadap <i>A. flavus</i>	Identifikasi gen LOX, NBS-LRR, PR proteins, dan faktor transkripsi dalam ketahanan

Sumber	Fokus Penelitian	Temuan Utama
(Han et al., 2025)	Penyuntingan genom CRISPR pada kacang tanah	Teknologi CRISPR/Cas9 berpotensi untuk perbaikan sifat termasuk ketahanan penyakit
(Khadgi et al., 2025)	Precision breeding untuk ketahanan aflatoksin	Identifikasi 60 SNP dan 6 QTL terkait ketahanan aflatoksin
(Broto, 2018; Khadgi et al., 2025)	Status cemaran dan pengendalian aflatoksin di Indonesia	Cemaran aflatoksin di Indonesia masih tinggi; perlu strategi pengendalian terpadu
(Bhatnagar-Mathur et al., 2015)	Kemajuan bioteknologi untuk pengendalian <i>A. flavus</i>	HIGS, biokontrol, dan rekayasa genetika berpotensi menekan aflatoksin 70-90%
(Chowdhury et al., 2022)	Transformasi genetik <i>A. hypogaea</i> untuk ketahanan jamur	Berbagai gen antijamur berhasil ditransfer ke kacang tanah
(Salsabila et al., 2021)	Penetapan kadar aflatoksin pada olahan kacang tanah	Beberapa sampel produk olahan kacang tanah tidak terdeteksi aflatoksin

3.2. Status Kontaminasi Aflatoksin pada Kacang Tanah

Kontaminasi aflatoksin pada kacang tanah merupakan permasalahan global yang serius, terutama di negara-negara dengan iklim tropis dan subtropis. Berdasarkan data yang dihimpun dari berbagai jurnal yang dikaji, tingkat kontaminasi aflatoksin sangat bervariasi antarwilayah, bergantung pada kondisi iklim, praktik budidaya, serta penanganan pasca-panen. Tabel 2 menyajikan data status cemaran aflatoksin pada kacang tanah dan komoditas terkait di berbagai negara.

Tabel 2 Status cemaran aflatoksin pada komoditas pertanian di berbagai negara

Negara	Komoditas	Cemaran (ppb)	Sumber
Indonesia	Kacang tanah	0,3-329,7	(Broto, 2018)
Indonesia	Jagung pipil	11,98-19,63	(Broto, 2018)
Malaysia	Kacang tanah	17,2-350	(Broto, 2018)
Thailand	Kacang tanah	2,20-171,30	(Broto, 2018)
Tiongkok	Jagung	9-1.396	(Broto, 2018)
Brasil	Jagung	6,0-1.600	(Broto, 2018)

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa negara-negara di kawasan Asia Tenggara, termasuk Indonesia, Malaysia, dan Thailand, memiliki tingkat kontaminasi aflatoksin yang cukup tinggi pada kacang tanah. Kondisi ini berkaitan erat dengan iklim tropis yang mendukung pertumbuhan optimal jamur *A. flavus*. Menurut (Jayaprakash et al., 2019), zona lintang antara 26° hingga 35° dengan suhu hangat merupakan wilayah yang paling rentan terhadap kontaminasi aflatoksin. Faktor-faktor lingkungan seperti suhu tanah yang tinggi (28-31°C), kelembaban di atas 85%, jenis tanah berpasir, serta cekaman kekeringan pada 4-6 minggu sebelum panen berkontribusi signifikan terhadap peningkatan infeksi jamur dan produksi aflatoksin.

Di Indonesia, permasalahan kontaminasi aflatoksin semakin diperparah oleh praktik penanganan pasca-panen yang belum optimal. Pengeringan yang tidak sempurna, penyimpanan dalam kondisi lembab, serta distribusi yang panjang dengan fasilitas penyimpanan yang tidak memadai menjadi faktor penyebab utama akumulasi aflatoksin selama rantai pasok. Penelitian (Salsabila et al., 2021) yang menguji berbagai produk olahan kacang tanah di Indonesia menunjukkan variasi tingkat kontaminasi yang cukup lebar, meskipun beberapa sampel menunjukkan kadar aflatoksin yang tidak terdeteksi. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan penanganan yang tepat, kontaminasi aflatoksin sesungguhnya dapat ditekan secara signifikan.

3.3. Teknologi RNA interference (RNAi) dalam Pengendalian Biosintesis Aflatoksin

Teknologi *RNA interference* (RNAi) merupakan salah satu pendekatan bioteknologi yang paling menjanjikan untuk pengendalian biosintesis aflatoksin pada tingkat molekuler. RNAi adalah mekanisme alami pada sel eukariot yang berfungsi untuk meregulasi ekspresi gen melalui degradasi mRNA target secara spesifik. Prinsip ini kemudian dimanfaatkan dalam bioteknologi untuk membungkam (*silencing*) gen-gen tertentu yang tidak diinginkan, termasuk gen-gen yang bertanggung jawab dalam biosintesis aflatoksin pada jamur *A. flavus*.

Penelitian yang dilakukan oleh (Arias et al., 2015) merupakan salah satu terobosan penting dalam penerapan teknologi RNAi untuk pengendalian aflatoksin pada kacang tanah. Dalam penelitian tersebut, dikonstruksi plasmid p5XCAPD yang membawa sekuen untuk pembungkaman lima gen biosintesis aflatoksin secara simultan, yakni *aflS* (faktor transkripsi), *aflR* (regulator transkripsi), *aflC* (sintase poliketida), *pes1* (sintase peptida nonribosomal), dan *afllep* (efluks aflatoksin). Hasil yang diperoleh sangat menggembirakan, di mana galur transgenik 288-72 dan 288-74 menunjukkan reduksi produksi aflatoksin B1 dan B2 hingga 100% dibandingkan dengan kontrol non-transgenik.

Mekanisme kerja RNAi dalam pengendalian aflatoksin melibatkan beberapa tahapan yang kompleks namun sangat spesifik. Pertama, tanaman transgenik mengekspresikan dsRNA (*double-stranded RNA*) yang homolog dengan gen target pada jamur. Ketika *A. flavus* menginfeksi tanaman atau mengambil nutrisi dari jaringan tanaman, dsRNA tersebut masuk ke dalam sel jamur. Di dalam sel jamur, enzim Dicer memotong dsRNA menjadi fragmen-fragmen pendek yang disebut siRNA (*small interfering RNA*) dengan panjang sekitar 21-24 nukleotida. siRNA kemudian bergabung dengan kompleks RISC (*RNA-Induced Silencing Complex*) dan mengarahkan degradasi mRNA target yang memiliki sekuen komplementer. Akibatnya, ekspresi gen-gen biosintesis aflatoksin terhambat, dan produksi toksin dapat ditekan secara efektif (Prasad et al., 2023).

3.4. Host-Induced Gene Silencing (HIGS) sebagai Strategi Mitigasi Aflatoksin

Host-Induced Gene Silencing (HIGS) merupakan pengembangan lebih lanjut dari teknologi RNAi yang secara khusus dirancang untuk mengendalikan patogen tanaman. Dalam pendekatan HIGS, tanaman inang direkayasa untuk mengekspresikan dsRNA yang menargetkan gen-gen esensial pada patogen, sehingga ketika patogen menyerang tanaman, proses infeksi atau produksi metabolit berbahaya dapat dihambat. Strategi ini telah terbukti efektif dalam mengendalikan berbagai jenis patogen tanaman, termasuk jamur penghasil aflatoksin.

Penelitian yang dilakukan oleh (Sharma et al., 2018) menunjukkan keberhasilan penerapan HIGS untuk menghasilkan kacang tanah yang hampir bebas aflatoksin. Dalam penelitian tersebut, gen *aflM* (yang mengkode enzim versicolorin B sintase) dan gen *aflP* (yang mengkode enzim O-metiltransferase A) dijadikan target pembungkaman. Kedua gen ini berperan penting dalam tahapan akhir biosintesis aflatoksin, sehingga pembungkamannya secara efektif menghentikan produksi toksin. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kacang tanah transgenik yang mengekspresikan konstruk HIGS hanya mengandung aflatoksin sebesar 1-2 ppb, atau bahkan tidak terdeteksi sama sekali. Nilai ini jauh di bawah batas maksimum yang ditetapkan oleh FDA (20 ppb) maupun Uni Eropa (4 ppb), menandakan bahwa kacang tanah tersebut aman untuk dikonsumsi.

Pengembangan lebih lanjut dari pendekatan HIGS dilakukan oleh (Prasad et al., 2023) yang mengaplikasikan strategi *multiplexed* HIGS, yakni pembungkaman beberapa gen target sekaligus dalam satu konstruk. Dalam penelitian tersebut, empat gen yang berperan kritis dalam regulasi perkembangan jamur dan biosintesis aflatoksin dijadikan target secara simultan, yakni *nsdC* (regulator diferensiasi seksual), *veA* (regulator velvet yang mengontrol metabolisme sekunder), *aflR* (regulator transkripsi spesifik aflatoksin), dan *aflM* (enzim biosintesis aflatoksin). Pendekatan multiplex ini terbukti lebih efektif karena tidak hanya menekan produksi aflatoksin hingga di bawah 20 ppb, tetapi juga menghambat sporulasi jamur yang penting untuk penyebaran dan kelangsungan hidup patogen.

Tabel 3 Gen target dan efektivitas berbagai strategi bioteknologi untuk pengendalian aflatoksin

Gen Target	Metode	Hasil	Referensi
<i>aflM, aflP</i>	HIGS	Aflatoksin 1-2 ppb atau tidak terdeteksi	(Sharma et al., 2018)
<i>nsdC, veA, aflR, aflM</i>	Multiplexed HIGS	Aflatoksin <20 ppb, supresi sporulasi	(Prasad et al., 2023)
<i>aflS, aflR, aflC, pes1, aflep</i>	RNAi (plasmid p5XCAPD)	Reduksi AFB1 dan AFB2 hingga 100%	(Arias et al., 2015)
<i>ahFAD2A/2B</i>	CRISPR/Cas9	Peningkatan asam oleat 85-90%	(Han et al., 2025)
Gen defensin	Overekspresi	Peningkatan ketahanan terhadap infeksi jamur	(Sharma et al., 2018)

3.5. Potensi Teknologi CRISPR/Cas9 untuk Pengembangan Kacang Tanah Tahan Aflatoksin

Teknologi CRISPR/Cas9 (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats/CRISPR-associated protein 9*) merupakan terobosan revolusioner dalam bidang biologi molekuler yang memungkinkan penyuntingan genom dengan presisi tinggi. Berbeda dengan teknologi RNAi yang bekerja pada tingkat pasca-transkripsi, CRISPR/Cas9 bekerja langsung pada tingkat DNA, sehingga perubahan yang dihasilkan bersifat permanen dan dapat diwariskan ke generasi berikutnya. Teknologi ini telah banyak diaplikasikan untuk perbaikan berbagai sifat pada tanaman budidaya, termasuk kacang tanah (Han et al., 2025).

Meskipun aplikasi langsung CRISPR/Cas9 untuk ketahanan aflatoksin pada kacang tanah masih dalam tahap pengembangan, teknologi ini telah menunjukkan keberhasilan untuk perbaikan sifat-sifat lain yang relevan. (Han et al., 2025) melaporkan bahwa penyuntingan gen *ahFAD2A* dan *ahFAD2B* menggunakan CRISPR/Cas9 berhasil meningkatkan kandungan asam oleat pada biji kacang tanah hingga 85-90%. Peningkatan asam oleat ini tidak hanya memperbaiki kualitas minyak, tetapi juga berpotensi meningkatkan daya simpan biji karena asam oleat lebih stabil terhadap oksidasi. Keberhasilan ini membuka peluang untuk pengembangan kacang tanah dengan sifat-sifat unggul lainnya, termasuk ketahanan terhadap *A. flavus* dan kontaminasi aflatoksin.

(Khadgi et al., 2025) memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi *precision breeding* untuk pengembangan kacang tanah tahan aflatoksin. Melalui analisis QTL (*Quantitative Trait Loci*) dan GWAS (*Genome-Wide Association Study*), peneliti berhasil mengidentifikasi 6 QTL pada kromosom A01, A02, dan B05 yang berkontribusi lebih dari 10% terhadap variasi fenotipik ketahanan aflatoksin. Selain itu, ditemukan pula 60 penanda SNP (*Single Nucleotide Polymorphism*) yang terkait dengan ketahanan aflatoksin, dengan nilai *Phenotypic Variance Explained* (PVE) sebesar 16,87% hingga 31,70%. Informasi genetik ini sangat berharga untuk pengembangan marka molekuler yang dapat digunakan dalam seleksi berbantuan marka (*Marker-Assisted Selection*) maupun sebagai target penyuntingan genom menggunakan CRISPR/Cas9.

Kluster gen biosintesis aflatoksin pada *A. flavus* terletak pada wilayah sepanjang sekitar 70 kb pada kromosom 3, yang terdiri dari sekitar 30 gen yang diregulasi secara terkoordinasi, mulai dari *aflA* hingga *aflY* (Khadgi et al., 2025). Pemahaman mendalam mengenai organisasi dan regulasi kluster gen ini membuka peluang untuk pengembangan strategi pengendalian yang lebih terarah. Salah satu pendekatan potensial ialah menggunakan CRISPR/Cas9 untuk menyunting gen-gen regulator utama seperti *aflR* dan *aflS* yang mengendalikan ekspresi seluruh kluster gen biosintesis aflatoksin, sehingga produksi toksin dapat dihentikan secara permanen.

Salah satu keunggulan teknologi CRISPR/Cas9 dibandingkan pendekatan RNAi atau HIGS ialah sifat perubahannya yang permanen. Pada teknologi RNAi, pembungkaman gen bersifat sementara dan bergantung pada ekspresi dsRNA yang kontinu dari tanaman transgenik. Sementara itu, pada CRISPR/Cas9, modifikasi terjadi langsung pada tingkat DNA sehingga perubahan tersebut stabil dan dapat diwariskan ke generasi berikutnya tanpa memerlukan keberadaan transgenik dalam genom tanaman. Hal ini menjadi pertimbangan penting terutama dalam konteks regulasi tanaman hasil rekayasa genetika di berbagai negara.

Tantangan teknis dalam penerapan CRISPR/Cas9 pada kacang tanah antara lain berkaitan dengan sifat genom yang kompleks. Kacang tanah merupakan tanaman allotetraploid ($2n=4x=40$) dengan ukuran genom sekitar 2,7 Gb, yang terdiri dari subgenom A (1,25 Gb) dan subgenom B (1,56 Gb). Subgenom A mengandung sekitar 31.359 gen, sedangkan subgenom B mengandung sekitar 35.110 gen (Han *et al.*, 2025). Kondisi poliploid ini menyebabkan banyak gen hadir dalam bentuk homeolog pada kedua subgenom, sehingga penyuntingan harus dilakukan pada semua salinan gen untuk memperoleh fenotipe yang diinginkan. Selain itu, efisiensi regenerasi *in vitro* kacang tanah yang masih relatif rendah juga menjadi kendala dalam produksi tanaman hasil penyuntingan genom.

3.6. Gen dan Protein Kunci dalam Mekanisme Ketahanan Tanaman

Pendekatan genomik, transkriptomik, dan proteomik telah memberikan kontribusi besar dalam mengungkap mekanisme ketahanan kacang tanah terhadap infeksi *A. flavus* dan akumulasi aflatoksin. Pemahaman mendalam mengenai gen-gen dan protein yang terlibat dalam respons pertahanan tanaman sangat penting untuk pengembangan varietas unggul melalui pendekatan pemuliaan konvensional maupun rekayasa genetika. (Jayaprakash *et al.*, 2019) telah melakukan *review* komprehensif mengenai berbagai strategi untuk memahami mekanisme ketahanan ini.

Beberapa kelompok gen dan protein yang telah diidentifikasi memiliki peran kunci dalam mekanisme ketahanan tanaman terhadap *A. flavus* antara lain: (1) enzim hidrolitik seperti β -1,3-glukanase dan kitinase yang berperan dalam mendegradasi komponen dinding sel jamur; (2) *Lipoxygenase* (LOX) yang dapat menghambat biosintesis aflatoksin melalui produksi senyawa oksilipin; (3) protein NBS-LRR (*Nucleotide-Binding Site Leucine-Rich Repeat*) yang merupakan kelompok protein resisten (R protein) yang berperan dalam pengenalan patogen dan aktivasi respons pertahanan; (4) protein PR (*Pathogenesis-Related*) seperti PR10 yang terlibat dalam transduksi sinyal pertahanan; (5) RIPS (*Ribosome-Inactivating Proteins*) yang dapat memodifikasi dan menginaktivasi ribosom asing; serta (6) zeamatin yang dapat meningkatkan permeabilitas membran sel jamur (Jayaprakash *et al.*, 2019; Bhatnagar-Mathur *et al.*, 2015).

Tabel 4. Gen dan protein kunci yang berperan dalam mekanisme ketahanan terhadap *A. flavus*

Gen/Protein	Fungsi dalam Ketahanan	Sumber
β -1,3-glukanase	Mendegradasi β -1,3-glukan pada dinding sel jamur	(Jayaprakash <i>et al.</i> , 2019)
Kitinase	Mendegradasi kitin pada dinding sel jamur	(Bhatnagar-Mathur <i>et al.</i> , 2015)
<i>Lipoxygenase</i> (LOX)	Menghasilkan oksilipin yang menghambat biosintesis aflatoksin	(Jayaprakash <i>et al.</i> , 2019)
NBS-LRR	Pengenalan patogen dan aktivasi respons imun tanaman	(Jayaprakash <i>et al.</i> , 2019)
PR10	Transduksi sinyal pertahanan dan ketahanan terhadap aflatoksin	(Bhatnagar-Mathur <i>et al.</i> , 2015)
RIPs	Menginaktivasi ribosom jamur dan menghambat sintesis protein	(Bhatnagar-Mathur <i>et al.</i> , 2015)
Zeamin	Meningkatkan permeabilitas membran sel jamur	(Bhatnagar-Mathur <i>et al.</i> , 2015)
ERF, WRKY, bZIP	Faktor transkripsi yang meregulasi gen-gen pertahanan	(Jayaprakash <i>et al.</i> , 2019)

Studi transkriptomik pada genotipe J11 yang dikenal memiliki ketahanan tinggi terhadap *A. flavus* berhasil mengidentifikasi 663 *Differentially Expressed Genes* (DEGs) dan 314 *Differentially Expressed Proteins* (DEPs) yang terekspresi berbeda pascainfeksi. Studi lain bahkan melaporkan hingga 4.445 DEGs yang menunjukkan pola ekspresi berbeda antara genotipe tahan dan rentan (Khadgi *et al.*, 2025). Faktor-faktor transkripsi seperti ERF (*Ethylene Response Factor*), WRKY, dan bZIP juga telah diidentifikasi memiliki peran penting dalam meregulasi respons pertahanan tanaman terhadap infeksi jamur. Informasi mengenai gen-gen ini sangat berharga untuk pengembangan marka molekuler dan target rekayasa genetika dalam program pemuliaan kacang tanah tahan aflatoksin.

3.7. Germplasma Kacang Tanah dengan Ketahanan terhadap *A. flavus*

Identifikasi dan pemanfaatan germplasma yang memiliki ketahanan alami terhadap *A. flavus* dan akumulasi aflatoksin merupakan landasan penting dalam program pemuliaan kacang tanah. Berbagai lembaga penelitian internasional seperti ICRISAT (*International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics*) telah melakukan skrining intensif terhadap koleksi plasma nutrafah kacang tanah untuk mengidentifikasi aksesori-aksesi yang menunjukkan tingkat ketahanan yang baik. Jayaprakash *et al.* (2019) melaporkan beberapa aksesori dan kultivar yang telah diidentifikasi memiliki ketahanan terhadap berbagai komponen infeksi dan kontaminasi aflatoksin.

Ketahanan terhadap *A. flavus* dan akumulasi aflatoksin pada kacang tanah sesungguhnya melibatkan beberapa komponen yang berbeda. (Pandey et al., 2019) mengidentifikasi tiga komponen utama ketahanan, yakni: (1) *In Vitro Seed Colonization* (IVSC), yaitu ketahanan terhadap kolonisasi biji oleh jamur dalam kondisi laboratorium; (2) *Pre-harvest Aflatoxin Contamination* (PAC), yaitu ketahanan terhadap kontaminasi aflatoksin sebelum panen di lapangan; dan (3) *Aflatoxin Production* (AP), yaitu kemampuan biji untuk menghambat produksi aflatoksin oleh jamur meskipun terinfeksi. Beberapa aksesi yang menunjukkan ketahanan baik antara lain ICG 12625 dan ICG 4750 dari ICRISAT, Zhonghua 6 dari Tiongkok, J11 dari India, serta galur-galur ICGV 91278, 91283, dan 91284. Pemahaman mengenai mekanisme genetik dari masing-masing komponen ketahanan ini sangat penting untuk pengembangan varietas unggul melalui pendekatan seleksi berbantuan marka atau penyuntingan genom.

Karakteristik fisik dan biokimia biji juga memainkan peran penting dalam ketahanan terhadap infeksi jamur dan akumulasi aflatoksin. Biji dengan kulit yang tebal dan kompak cenderung lebih tahan terhadap penetrasi hifa jamur dibandingkan biji dengan kulit tipis. Kandungan senyawa fenolik, tanin, dan fitoaleksin pada kulit biji juga berkontribusi dalam menghambat pertumbuhan jamur. Selain itu, komposisi asam lemak pada biji turut mempengaruhi kerentanan terhadap kontaminasi aflatoksin. Biji dengan kandungan asam oleat tinggi menunjukkan stabilitas oksidatif yang lebih baik dan cenderung lebih tahan terhadap kontaminasi mikotoksin (Bhatnagar-Mathur et al., 2015).

Pengembangan varietas kacang tanah dengan ketahanan ganda, yakni tahan terhadap infeksi jamur sekaligus mampu menghambat biosintesis aflatoksin, merupakan sasaran utama dalam program pemuliaan modern. Pendekatan piramiding gen, yang menggabungkan beberapa gen ketahanan dalam satu genotipe, dapat menghasilkan varietas dengan ketahanan yang lebih stabil dan tahan lama. Teknologi seleksi berbantuan marka (MAS) memungkinkan pemulia untuk menyusun (*stack*) beberapa gen target secara efisien dalam satu program pemuliaan. Dengan demikian, varietas unggul dengan ketahanan komprehensif terhadap kontaminasi aflatoksin dapat dikembangkan dalam waktu yang lebih singkat dibandingkan metode pemuliaan konvensional.

3.8. Prospek dan Tantangan Penerapan Bioteknologi dalam Pengendalian Aflatoksin

Berbagai pendekatan bioteknologi yang telah dibahas menunjukkan prospek yang sangat menjanjikan untuk pengendalian *A. flavus* dan mitigasi kontaminasi aflatoksin pada kacang tanah. Teknologi HIGS dan RNAi telah membuktikan efektivitasnya dalam menekan kontaminasi aflatoksin hingga tingkat yang aman atau bahkan tidak terdeteksi. Teknologi CRISPR/Cas9 menawarkan presisi tinggi untuk modifikasi gen target dengan efek *off-target* yang minimal. Perpaduan berbagai pendekatan (*stacking strategies*) dapat memberikan perlindungan yang lebih komprehensif dan tahan lama terhadap kontaminasi aflatoksin.

Meskipun demikian, terdapat sejumlah tantangan yang perlu diatasi dalam penerapan teknologi ini secara luas. Pertama, efisiensi transformasi genetik pada kacang tanah relatif rendah karena sifat allotetraploid dengan ukuran genom yang besar (sekitar 2,7 Gb) dan regenerasi *in vitro* yang sulit. Kedua, regulasi dan penerimaan publik terhadap produk transgenik masih menjadi hambatan di banyak negara, meskipun pendekatan penyuntingan genom seperti CRISPR/Cas9 mulai mendapat perlakuan regulasi yang berbeda di beberapa negara. Ketiga, stabilitas ekspresi transgenik dalam kondisi lapangan yang beragam perlu divalidasi lebih lanjut melalui uji multilokasi dan multitanah. Keempat, biaya pengembangan dan produksi benih transgenik yang relatif tinggi dapat menjadi kendala bagi petani kecil di negara-negara berkembang. Kelima, evaluasi dampak ekologis dan kesehatan jangka panjang dari tanaman transgenik perlu dilakukan secara komprehensif untuk memastikan keamanan bagi manusia dan lingkungan (Chowdhury et al., 2022).

Untuk mengatasi berbagai tantangan tersebut, diperlukan pendekatan terintegrasi yang menggabungkan bioteknologi dengan strategi pengendalian konvensional. Manajemen pra-panen seperti penggunaan varietas tahan, pengairan yang memadai untuk menghindari cekaman kekeringan, serta pengendalian serangga hama yang dapat menjadi vektor infeksi jamur perlu dipadukan dengan pengendalian pasca-panen seperti pengeringan yang tepat, penyimpanan dalam kondisi yang terkontrol, dan pemantauan berkala terhadap tingkat kontaminasi (Pandey et al., 2019). Selain itu, pengembangan teknologi penyuntingan genom yang bersifat non-transgenik, seperti pengiriman ribonukleoprotein (RNP) CRISPR/Cas9 secara langsung ke dalam sel tanaman, dapat menjadi alternatif untuk menghindari isu regulasi terkait tanaman transgenik.

Di Indonesia, penerapan bioteknologi untuk pengendalian aflatoksin memiliki relevansi yang sangat tinggi mengingat kondisi iklim tropis yang mendukung pertumbuhan jamur serta masih tingginya tingkat kontaminasi pada komoditas pangan lokal. Pengembangan varietas kacang tanah transgenik atau hasil penyuntingan genom yang tahan aflatoksin dapat menjadi solusi jangka panjang untuk meningkatkan keamanan pangan dan daya saing produk pertanian Indonesia di pasar internasional. Namun demikian, penerapan teknologi ini memerlukan dukungan kebijakan yang kondusif, infrastruktur penelitian yang memadai, serta sumber daya manusia yang terampil dalam bidang bioteknologi tanaman.

Aspek sosioekonomi juga perlu mendapat perhatian dalam pengembangan dan diseminasi teknologi ini. Petani kacang tanah di Indonesia mayoritas merupakan petani kecil dengan kemampuan ekonomi yang terbatas. Oleh karena itu, teknologi yang dikembangkan hendaknya dapat diakses dengan mudah dan terjangkau oleh petani. Penyediaan benih varietas unggul tahan aflatoksin dengan harga yang kompetitif, pendampingan teknis dalam penerapan praktik budidaya yang baik, serta pengembangan sistem pemasaran yang menguntungkan petani merupakan prasyarat keberhasilan adopsi teknologi di tingkat petani.

Kolaborasi yang erat antara peneliti, pemulia tanaman, industri pangan, dan pembuat kebijakan sangat diperlukan untuk mempercepat adopsi teknologi ini secara luas dan berkelanjutan. Lembaga penelitian nasional seperti Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan perguruan tinggi perlu didorong untuk mengembangkan penelitian di bidang bioteknologi pengendalian

aflatoksin dengan memanfaatkan plasma nutfah lokal. Kerja sama dengan lembaga penelitian internasional seperti ICRISAT juga perlu diperkuat untuk transfer teknologi dan pertukaran materi genetik. Dengan dukungan semua pemangku kepentingan, diharapkan teknologi bioteknologi dapat memberikan kontribusi nyata dalam mewujudkan ketahanan pangan yang aman dan berkelanjutan di Indonesia.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur sistematis terhadap 11 jurnal ilmiah yang relevan, dapat ditarik beberapa simpulan penting mengenai aplikasi bioteknologi dalam pengendalian *A. flavus* dan mitigasi kontaminasi aflatoksin pada kacang tanah. Pendekatan bioteknologi modern menawarkan solusi yang sangat menjanjikan untuk mengatasi permasalahan kontaminasi aflatoksin yang selama ini sulit ditangani dengan metode konvensional.

Teknologi Host-Induced Gene Silencing (HIGS) dan RNA interference (RNAi) telah menunjukkan kemampuan yang sangat efektif dalam menekan kontaminasi aflatoksin hingga tingkat yang aman (kurang dari 20 ppb) atau bahkan tidak terdeteksi sama sekali. Pembungkaman gen-gen biosintesis aflatoksin seperti *aflM*, *aflP*, *aflR*, dan *aflS* melalui HIGS dan RNAi terbukti dapat menghentikan produksi toksin secara efektif tanpa memengaruhi pertumbuhan tanaman inang.

Teknologi CRISPR/Cas9 membuka peluang besar untuk pengembangan kacang tanah tahan aflatoksin melalui precision breeding. Dukungan dari ketersediaan data genomik, seperti identifikasi 60 penanda SNP dan 6 QTL yang terkait dengan ketahanan aflatoksin, memungkinkan penargetan yang lebih tepat dan efisien dalam program pemuliaan. Pendekatan genomik dan proteomik juga telah berhasil mengidentifikasi berbagai gen dan protein kunci yang berperan dalam mekanisme ketahanan tanaman, seperti LOX, NBS-LRR, protein PR, dan faktor transkripsi ERF, WRKY, serta bZIP.

Perpaduan strategi bioteknologi dengan manajemen pra-panen dan pasca-panen merupakan kunci keberhasilan dalam mitigasi kontaminasi aflatoksin secara efektif dan berkelanjutan. Meskipun masih terdapat tantangan dalam hal efisiensi transformasi, regulasi, penerimaan publik, dan biaya pengembangan, kemajuan pesat dalam teknologi penyuntingan genom dan pemahaman yang semakin mendalam mengenai mekanisme ketahanan tanaman memberikan harapan besar untuk pengembangan kacang tanah bebas aflatoksin di masa mendatang. Kolaborasi multipihak yang melibatkan peneliti, pemulia, industri, dan pembuat kebijakan sangat diperlukan untuk mempercepat adopsi dan penerapan teknologi ini secara luas demi terwujudnya ketahanan pangan yang aman dan berkelanjutan.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Mataram atas fasilitas riset yang digunakan dalam penelitian ini.

Pertimbangan Etika

Tidak perlu.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Pendanaan

Penulis tidak menerima dukungan dana apapun.

Pernyataan penggunaan AI Generatif

Penulis tidak menggunakan Generative AI dalam menulis artikel ini.

References

- Ajmal, M., Bedale, W., Akram, A., & Yu, J.-H. (2022). Comprehensive Review of Aflatoxin Contamination, Impact on Health and Food Security, and Management Strategies in Pakistan. *Toxins*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/toxins14120845>
- Akullo, J. O., Okello, D. K., Mohammed, A., Muyinda, R., Amayo, R., Magumba, D., Gidoi, R., Njoroge, S., & Mweetwa, A. (2025). A Comprehensive Review of Aflatoxin in Groundnut and Maize Products in Africa: Prevalence, Detection and Mitigation Strategies. *Journal of Food Quality*, 2025(1). <https://doi.org/10.1155/jfq/2810946>
- Arias, R. S., Dang, P. M., & Sobolev, V. S. (2015). RNAi-mediated control of aflatoxins in peanut: Method to analyze mycotoxin production and transgene expression in the peanut/aspergillus pathosystem. *Journal of Visualized Experiments*, 2015(106). <https://doi.org/10.3791/53398>
- Bhatnagar-Mathur, P., Sunkara, S., Bhatnagar-Panwar, M., Waliyar, F., & Sharma, K. K. (2015). Biotechnological advances for combating Aspergillus flavus and aflatoxin contamination in crops. In *Plant Science* (Vol. 234, pp. 119–132). Elsevier Ireland Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2015.02.009>
- Broto, W. (2018). STATUS CEMARAN DAN UPAYA PENGEDALIAN AFLATOKSIN PADA KOMODITAS SERREALIA DAN ANEKA KACANG TANAH. *Jurnal Litbang Pertanian*. <https://doi.org/10.21082/jp3.v37n2.2018.p81-90>

- Chowdhury, S., Datta, A., Ferdous, M.-E.-M., & Sinha, D. (2022). Genetic Transformation of *Arachis hypogaea* Using Novel Genes Conferring Fungal Resistance-A Review. *HORIZON E-Plublishing Group*. <https://plantsciencetoday.online>
- Gelaye, Y. (2025). Integrated breeding, genomics, and epigenetic approaches enhance aflatoxin resistance in peanut (*Arachis hypogaea* L.) under pathogen and climate stress. *Vegetos*. <https://doi.org/10.1007/s42535-025-01546-x>
- Han, S. J., Chae, J., Kim, H. J., Kim, J. H., Chung, Y. S., Karthik, S., & Heo, J. B. (2025). CRISPR-Mediated Genome Editing in Peanuts: Unlocking Trait Improvement for a Sustainable Future. In *Plants* (Vol. 14, Issue 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/plants14213302>
- Jayaprakash, A., Thanmalagan, R. R., Roy, A., Arunachalam, A., & Lakshmi, P. T. V. (2019). Strategies to understand *Aspergillus flavus* resistance mechanism in *Arachis hypogaea* L. In *Current Plant Biology* (Vol. 20). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2019.100123>
- Khadgi, A., Lekkala, S., Verma, P. K., Puppala, N., & Janga, M. R. (2025). Emerging Strategies for Aflatoxin Resistance in Peanuts via Precision Breeding. In *Toxins* (Vol. 17, Issue 8). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/toxins17080394>
- Konatham, A., Gaddam, V. R., & Cochran, D. S. (2026). Progress Roadmap and Information Hub for Purdue University Fort Wayne Student Success. In *Lecture Notes in Networks and Systems: Vol. 1605 LNNS*. https://doi.org/10.1007/978-3-032-03722-0_10
- Pandey, M. K., Kumar, R., Pandey, A. K., Soni, P., Gangurde, S. S., Sudini, H. K., Fountain, J. C., Liao, B., Desmae, H., Okori, P., Chen, X., Jiang, H., Mendu, V., Falalou, H., Njoroge, S., Mwololo, J., Guo, B., Zhuang, W., Wang, X., ... Varshney, R. K. (2019). Mitigating aflatoxin contamination in groundnut through a combination of genetic resistance and post-harvest management practices. In *Toxins* (Vol. 11, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/toxins11060315>
- Prasad, K., Yogendra, K., Sanivarapu, H., Rajasekaran, K., Cary, J. W., Sharma, K. K., & Bhatnagar-Mathur, P. (2023). Multiplexed Host-Induced Gene Silencing of *Aspergillus flavus* Genes Confers Aflatoxin Resistance in Groundnut. *Toxins*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/toxins15050319>
- Pushkarna, S., Gaba, K., Kharod, S., Kumar, A., Devi, S. U., Suneja, P., & Dang, A. S. (2025). Afatoxigenic Fungi: Human Health Impacts and Control Methods. In *Afatoxigenic Fungi Its Impact on Plant Animal and Human Health*. <https://doi.org/10.1201/9781003487043-25>
- Salsabila, A. T., Wardhani, R. M., Chodijayanti, A., Puryani, Damat, & Anggriani, R. (2021). Penetapan Kadar Aflatoksin B1, B2, G1, dan G2 pada Olahan Kacang Tanah dengan Metode HPLC Info Artikel. *Jurnal Teknologi Pangan Dan Hasil Pertanian*, 16(2), 2021–2022. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.26623/jtphp.v16i1>
- Sharma, K. K., Pothana, A., Prasad, K., Shah, D., Kaur, J., Bhatnagar, D., Chen, Z. Y., Raruang, Y., Cary, J. W., Rajasekaran, K., Sudini, H. K., & Bhatnagar-Mathur, P. (2018). Peanuts that keep aflatoxin at bay: a threshold that matters. *Plant Biotechnology Journal*, 16(5), 1024–1033. <https://doi.org/10.1111/pbi.12846>
- Wang, X., You, S.-H., Lien, K.-W., & Ling, M.-P. (2019). Using disease-burden method to evaluate the strategies for reduction of aflatoxin exposure in peanuts. *Toxicology Letters*, 314, 75–81. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2019.07.006>