

Peluang Pengembangan Pengendalian Penyakit Luka Api pada Tebu di Indonesia

Nurul Hidayah

Balai Penelitian Tanaman Pemanis dan Serat
Jl. Raya Karangploso KM 4 Malang
E-mail: noorhidaqoimun@gmail.com

Diterima: 11 April 2020; direvisi: 26 Agustus 2020; disetujui: 7 September 2020

ABSTRAK

Penyakit luka api merupakan salah satu penyakit utama pada tanaman tebu. Penyakit ini disebabkan oleh jamur *Sporisorium scitamineum* yang menginfeksi tanaman melalui mata tunas. Tanaman yang terinfeksi memiliki gejala yang sangat khas yakni terbentuknya cambuk pada bagian ujung tanaman. Cambuk ini terdiri atas teliospora jamur yang berperan sebagai sumber inokulum yang ditularkan melalui angin. Penyakit luka api akan berkembang dengan baik pada kondisi panas dan kering. Saat ini penyakit luka api telah menyebar di hampir seluruh pertanaman tebu di Indonesia. Varietas tebu yang tadinya diklaim tahan terhadap penyakit luka api, saat ini dilaporkan banyak yang terinfeksi juga. Pengetahuan tentang jamur *S. scitamineum* dan infeksiya pada tanaman tebu yang menyebabkan gejala penyakit luka api ini sangat penting untuk dapat menentukan metode pengendalian yang tepat. Review ini bertujuan membahas peluang teknik pengendalian luka api pada tebu yang dapat diterapkan pada agroekosistem tebu di Indonesia. Oleh karenanya dalam review ini akan memaparkan informasi tentang morfologi dan biologi jamur, mekanisme infeksi penyakit, mekanisme ketahanan tebu terhadap patogen, penyebarannya di Indonesia dan dunia, serta strategi pengendalian dan peluang pengembangannya di Indonesia.

Kata kunci: *Sporisorium scitamineum*, luka api, mekanisme ketahanan, varietas tahan

The Opportunity to Develop Control Methods of Smut Disease on Sugarcane in Indonesia

ABSTRACT

Smut disease caused by a basidiomycete fungus, *Sporisorium scitamineum*, is one of important diseases on sugarcane. The fungus infects the cane through the buds. The infected cane has a very distinctive symptom i.e. the emergence of whip-like structure at the top of the plant. This structure consists of fungal teliospores covered by a thin layer of plant tissue. These teliospores play a significant role as a source of primary inoculum which can be transmitted by wind assistance. The disease was favored by dry warm climates. Currently, the sugarcane smut disease has been widely spread to almost all of sugarcane plantations in Indonesia. In addition, sugarcane variety, which was previously known as a resistant variety, it becomes susceptible. It is important to understand the behavior of the pathogen, mechanism of infection and factors affecting disease development to determine a proper control method for the disease. This review aims to discuss the opportunity of strategy for the control of smut disease on sugarcane which can be applied on sugarcane agroecosystem in Indonesia. Therefore, the review will elaborate the characteristics of the pathogen including its morphology and biology, mechanism of infection, resistance mechanisms of the host to pathogen infection, distribution of the disease in Indonesia and across the world, factors affecting disease development, and management of disease control for the smut disease and its opportunity to be developed in Indonesia.

Keywords: *Sporisorium scitamineum*, sugarcane smut disease, resistance mechanisms, resistant variety

PENDAHULUAN

Tanaman tebu merupakan salah satu tanaman yang memiliki banyak fungsi dan mendukung sektor industri dan ekonomi. Selain sebagai tanaman utama penghasil gula, tebu juga dapat menghasilkan biomassa seperti serat, lignin, dan pentosan yang melalui berbagai proses kimiawi dengan penambahan bahan kimia tertentu serta biologi dengan memanfaatkan mikroba dapat dikonversikan menjadi produk yang memiliki nilai tambah (Solomon, 2011). Pada proses pembuatan gula, tebu juga dapat menghasilkan *by-product* seperti bagas dan molase yang dapat diproses menjadi *bioenergy*, *bioelectricity*, dan *bioethanol* (Solomon, 2011). Oleh karenanya tebu dibudidayakan di 101 negara dengan luas areal pertanaman lebih dari 26 juta hektar dan produktivitasnya dapat mencapai 1.83 miliar ton (Que et al., 2014). Namun demikian, tebu rentan terhadap infeksi patogen seperti jamur *Sporisorium scitamineum* (Syd.) M. Piepenbr., M. Stoll and Oberw. (sebelumnya bernama *Ustilago scitaminea* Sydow) penyebab penyakit luka api (*smut*).

Penyakit luka api merupakan salah satu penyakit utama pada tanaman tebu. Penyakit ini pertama kali ditemukan di Kepulauan Natal, Afrika Selatan, pada tahun 1877 (Alfieri et al., 1979). Selanjutnya penyakit luka api menyebar ke banyak negara yang memproduksi tebu seperti Indonesia, Amerika, Brazil, India, Cina, Pakistan, serta Australia (Hoy et al., 1986; Braithwaite et al., 2004; Kristini et al., 2008; Bhuiyan et al., 2009; Sundar et al., 2012). Penyakit ini dapat menyebabkan kerugian hasil pada tebu, baik secara kuantitatif maupun kualitatif. Secara kualitatif, terjadinya penyakit luka api ini dapat mengurangi kualitas tebu yang dihasilkan, sedangkan secara kuantitatif dapat menurunkan produksi secara signifikan (Schaker et al., 2016). Magarey et al. (2010) menyebutkan tanaman tebu yang rentan dapat kehilangan

hasil hingga lebih dari 60%. Que et al. (2014) juga menyatakan kerugian hasil akibat penyakit luka api sangat bervariasi, tergantung ketahanan tanaman terhadap patogennya, dengan kehilangan hasil mulai dari 30% hingga tidak dapat dipanen. Kehilangan hasil pada tanaman ratun lebih tinggi dibandingkan dengan *plant cane* (PC) (Lal et al., 2009).

Gejala penyakit luka api pada tebu ini sangat khas, yakni terbentuknya struktur seperti cambuk yang berwarna hitam (sorus) pada bagian atas tanaman tebu yang terinfeksi. Cambuk ini tersusun dari jaringan parenkim tanaman yang dikelilingi oleh spora jamur dan ditutup oleh jaringan tipis berwarna keperak-perakan. Spora ini menjadi sumber inokulum primer yang dengan bantuan angin dapat menyebar ke area lain (Que et al., 2014). Pada umumnya gejala ini muncul pada umur 6-8 minggu setelah terjadinya infeksi dan akan terus tumbuh hingga panjangnya dapat mencapai 1,5 m di atas daun tebu baik pada batang utama maupun sekunder (Comstock, 2000; Croft & Braithwaite, 2006). Menurut Lee-Lovick (1978) pertumbuhan sorus dapat mencapai 10 cm per minggu dan teliospore yang dihasilkan berkisar 10^8 - 10^9 per hari. Pada serangan lebih lanjut, pertumbuhan tanaman tebu menjadi tidak normal yakni memiliki diameter batang yang kecil sehingga menyerupai rumput (Comstock, 2000; Bhuiyan et al., 2010).

Kondisi lingkungan dan karakter ketahanan tebu sangat mempengaruhi perkembangan penyakit luka api di lapangan. Pengetahuan tentang bioekologi patogen juga penting dalam mendukung keberhasilan metode pengendalian. Oleh karena itu review yang berisikan tentang patogen luka api mulai dari morfologi dan biologinya hingga penyebaran dan faktor-faktor yang mempengaruhi perkembangan penyakit, serta mekanisme ketahanan tebu terhadap penyakit luka api, bertujuan untuk membahas peluang pengembangan teknik pengendalian penyakit

luka api pada tebu yang dapat diterapkan pada agroekosistem tebu di Indonesia.

PENYEBAB PENYAKIT LUKA API

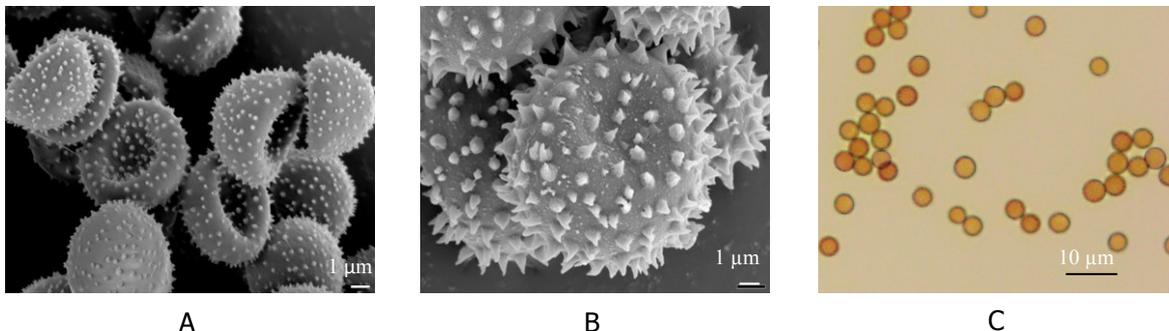
Morfologi dan biologi jamur *S. scitamineum*

Informasi tentang morfologi dan biologi jamur *S. scitamineum* diperoleh dari referensi yang cukup lama. Pada awalnya Lambert et al. (1968) mempelajari morfologi jamur *S. scitamineum* menggunakan 25 isolat asal India yang dikoleksi dari berbagai lokasi. Mereka menemukan adanya keragaman karakter spora jamur *U. scitaminea* yang meliputi ukuran, ketebalan dinding sel, warna, dan bentuk dinding spora. Adapun diameter spora berukuran mulai dari 5,61 hingga 8,67 μm , sedangkan ketebalannya berada pada kisaran 0,5-1,37 μm . Warna spora juga bervariasi mulai dari kuning hingga coklat. Adapun bentuk dinding spora ada yang berupa *verrucose* (permukaan dinding sel spora tidak beraturan), *echinulate* (dinding spora memiliki struktur semacam duri), dan *punctuate* (dinding spora yang permukaannya halus) (Gambar 1).

Pengujian terhadap enam isolat *S. scitamineum* yang dikoleksi dari berbagai lokasi di Australia, hasilnya menunjukkan bahwa ukuran teliospora jamur bervariasi dari 6,87-8,03 μm ; teliospora dapat berkecambah pada rentang suhu 15-35°C tetapi perkecambahan spora mencapai maksimum pada

suhu 30°C setelah 6 jam; pada media agar warna haploid koloni bervariasi tetapi untuk dikariotik warnanya seragam yakni miselia berwarna putih; pertumbuhan miselia pada media agar sangat lambat dengan laju pertumbuhan 6,2 mm per hari pada suhu 30°C (data belum dipublikasi).

Teliospora jamur *S. scitamineum* yang memiliki dinding sel tebal dan berpigmen merupakan struktur istirahat jamur yang dapat bertahan selama beberapa tahun dan dapat berperan sebagai sumber inokulum utama (Horton et al., 2005). Pada kondisi lingkungan yang menguntungkan, teliospora akan berkecambah dan dapat menginfeksi tanaman inang. Izadi & Moosawi-Jorf (2007) menjelaskan proses perkecambahan teliospora dimulai dari bertambahnya ukuran spora sehingga dapat memecahkan exosporidium. Selanjutnya dihasilkan promycelium yang diikuti dengan terbentuknya sporidia dari tiap sel promycelium. Promycelium ini terdiri atas tiga atau empat sel sporidia yang ukurannya bervariasi mulai dari 16 μm x 3-4 μm . Sporidia jamur yang memiliki satu nukleus tiap selnya terdiri atas dua tipe *mating type* yaitu + (*plus*) dan - (*minus*). Fase sporidia ini merupakan fase non-patogenik jamur *S. scitamineum*. Saat dua sporidia yang kompatibel mengalami fusi maka nukleus dari kedua sel akan berpindah menuju sel yang telah mengalami fusi tersebut dan menghasilkan miselium dikariotik yakni memiliki dua nukleus dalam satu sel nya. Fase dikariotik inilah yang



Gambar 1. Dinding sel spora jamur luka api yang berbentuk echinulate (A); verrucose-echinulate (B); punctuate (C)

Sumber: A) <https://collections.daff.qld.gov.au/web/key/smutfungi/Media/Html/ustilagoscitaminea.html>

B) <https://collections.daff.qld.gov.au/web/key/smutfungi/Media/Html/macalpinomycesordensis.html>

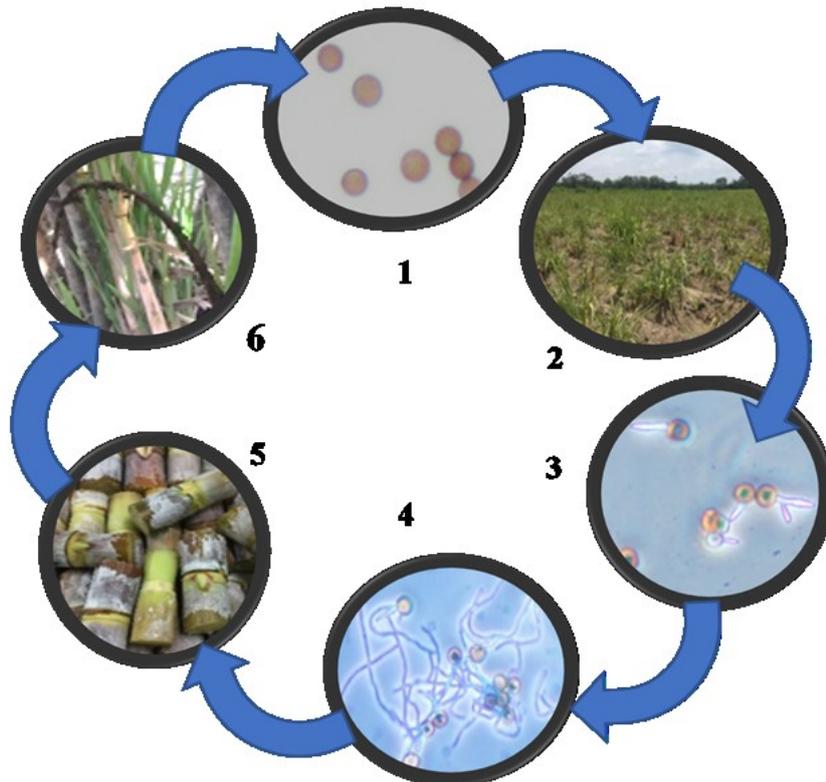
merupakan fase infeksi dan dapat menyebabkan penyakit pada tanaman inangnya (Trione, 1990; Schenck, 1999; Piepenbring, 2009; Kavitha et al., 2014).

Mekanisme infeksi *S. scitamineum* pada tanaman tebu

Mekanisme terjadinya penyakit luka api pada tanaman tebu dimulai ketika teliospora jamur *S. scitamineum* yang berkecambah berhasil menginfeksi inangnya melalui mata tunas (Gambar 2). Sebagaimana sudah banyak diketahui bahwa terjadinya penyakit pada tanaman karena adanya interaksi antara inang yang rentan, patogen yang virulen, dan kondisi lingkungan yang menguntungkan bagi perkembangan penyakit. Que et al. (2014) mengemukakan bahwa *S. scitamineum* yang dikenal sebagai jamur yang mampu memanfaatkan beragam karbon dan nitrogen (sumber energi) memiliki 192 gen yang

berasosiasi dengan virulensi di dalam genomnya, salah satunya berkaitan metabolisme energi.

Mekanisme infeksi jamur *S. scitamineum* pada tanaman tebu merupakan proses yang kompleks dan melibatkan banyak gen. Untuk dapat menginfeksi inangnya, patogen harus memiliki kemampuan untuk mendegradasi dinding sel inang sehingga dapat masuk ke dalam jaringan inangnya. Oleh karena itu patogen harus mampu menghasilkan enzim yang dapat menghidrolisis senyawa penyusun dinding sel tersebut, termasuk *carbohydrate active enzymes*, CAZymes. Analisis genom *S. scitamineum* yang dilakukan Que et al. (2014) menunjukkan bahwa jamur ini memiliki 867 CAZymes putatif yang terdiri atas 337 *glycoside hydrolases*, 253 *glycosyltransferases*, 92 *carbohydrate esterases*, 181 *carbohydrate binding molecules*, dan 4 *polysaccharide*



Gambar 2. Proses infeksi jamur *S. scitamineum* pada tanaman tebu 1) Teliospora *S. scitamineum*; 2) Jamur mulai menginfeksi tanah dan tanaman tebu; 3) Teliospora berkecambah; 4) Pembentukan hifa infeksi; 5) Hifa menginfeksi jaringan meristem dan titik tumbuh tebu; 6) Pembentukan sorus (struktur yang mirip cambuk).

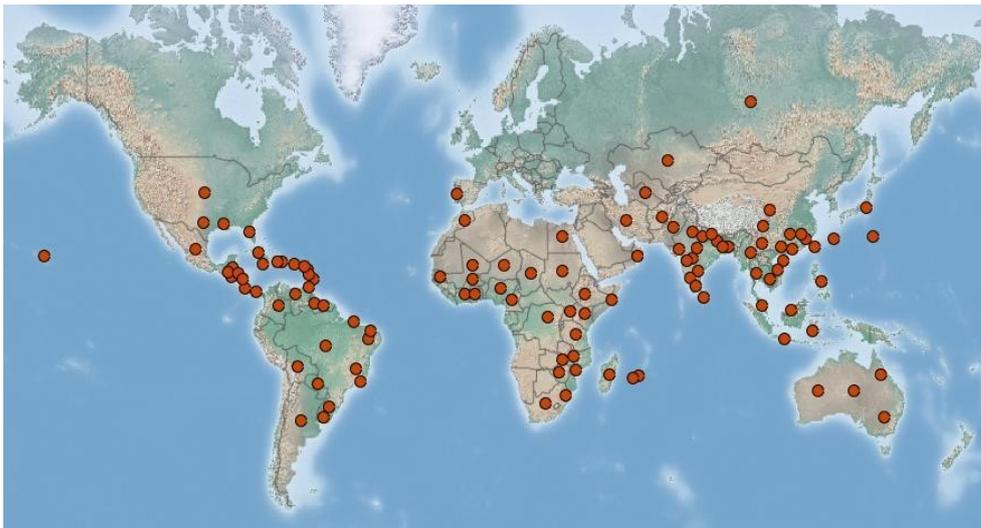
lyases. Apabila dinding sel inang telah berhasil terdegradasi, patogen dapat mempenetrasi jaringan inangnya dan jika kondisi lingkungan mendukung maka penyakit dapat berkembang. Namun demikian, proses infeksi tidak selalu berjalan dengan mudah karena inang memiliki kemampuan untuk memproteksi dirinya sendiri dari infeksi patogen. Mulai dari adanya ketahanan eksternal yang dapat berupa ketahanan fisik dari mata tunas maupun kimiawi yang terjadi pada tunas tersebut seperti terbentuknya lignin. Penjelasan lebih lanjut tentang mekanisme ketahanan tebu terhadap *S. scitamineum* akan dibahas pada bab selanjutnya.

Sebaran Penyakit Luka Api di Dunia dan Indonesia

Penyakit luka api pertama kali dilaporkan terjadi pada tahun 1877 di Kepulauan Natal, Afrika Selatan. Setelah kejadian itu, penyakit luka api menyebar ke berbagai areal pertanaman tebu yang ada di Afrika Barat, Timur, dan Tengah, Amerika Selatan dan Tengah, Amerika Utara, Brazil bagian selatan, Indonesia yang meliputi Jawa, Sulawesi, Sumbawa, serta Australia (Alfieri et al., 1979; Hoy et al., 1986; Braithwaite et al.,

2004; Sundar et al., 2012). Sejak tahun 1930, penyakit luka api menjadi ancaman bagi pertanaman tebu yang ada di India (Ferreira & Comstock, 1989; Kavitha et al., 2014). Di Cina, penyakit luka api dilaporkan pertama kali terjadi pada tahun 1932 (Shen et al., 2012). Peta sebaran penyakit luka api di seluruh dunia ditampilkan pada Gambar 3.

Pada tahun 1943, penyakit luka api menyebabkan kerusakan parah di Argentina (Ferreira & Comstock, 1989). Di Iran, kejadian penyakit luka api pertama kali dilaporkan di daerah Haft-Tappeh pada tahun 1971 (Izadi & Moosawi-Jorf, 2007). Di Brazil, epidemi luka api terjadi pada tahun 1980 yang menyebabkan dibatasinya penanaman tebu varietas NA56-79 yang dikenal memiliki produktivitas tinggi tetapi rentan terhadap *S. scitamineum* hanya di daerah yang memiliki kejadian penyakit tidak lebih dari 10% (Gloria et al., 1999). Di Louisiana, penyakit luka api ditemukan kali pertama pada tahun 1981 (Hoy et al., 1991). Di Australia, penyakit luka api pertama kali ditemukan pada tahun 1998 di daerah pertanaman tebu yang berlokasi di Ord River Irrigation Area di Australia bagian barat, yang saat itu menyebabkan kehilangan hasil sangat tinggi, sehingga pertanaman tebu



Gambar 3. Sebaran penyakit luka api di seluruh dunia (sumber: <http://www.cabi.org/isc/datasheet/55949>)

disana harus ditutup (Braithwaite et al., 2004). Menyusul delapan tahun kemudian, pada tahun 2006, penyakit luka api mulai ditemukan di Queensland yang menjadi pusat areal tebu yang ada di Australia (Croft & Braithwaite, 2006; Croft et al., 2008).

Di Indonesia, keberadaan penyakit luka api pertama kali diketahui pada tahun 1881 (Putra & Damayanti, 2012). Pada mulanya penyakit luka api dianggap bukan penyakit penting, namun pada tahun 1979 dilaporkan adanya kejadian penyakit tersebut di daerah Jawa Tengah bagian utara. Dalam beberapa tahun, laju infeksinya mencapai 40% di daerah pusat penyebaran penyakit. Lebih lanjut Putra dan Damayanti (2012) menyebutkan bahwa pada tahun 1994 penyakit luka api ini telah menyebar ke hampir sebagian besar pertanaman tebu yang ada di Indonesia, kecuali di Sulawesi Utara. Penyakit luka api terutama ditemukan pada tebu varietas M442-51 yang ditanam di lahan tadah hujan. Saat itu, varietas M442-51 merupakan varietas tebu yang populer dan ditanam lebih dari 60% area pengembangan tebu di Indonesia, sehingga penyakit luka api berubah statusnya menjadi penyakit penting yang dapat mempengaruhi produksi gula. Pada kurun waktu 2000-2008, kejadian penyakit luka api sempat mengalami penurunan hingga hanya 2.5% saja karena penggunaan varietas tahan PS864 dan PSJT941, namun penyakit luka api kembali ditemukan pada 90% dari 500 ha lahan pengembangan tebu di daerah Indramayu dan Cirebon pada tahun 2014 (Wibawanti, 2015). Pada tahun 2017, lokasi pengembangan tebu di Jawa Timur, Madura, dan Sulawesi Selatan diketahui terinfeksi luka api serta varietas BL yang sebelumnya diketahui tahan terhadap luka api juga ditemukan terinfeksi penyakit yang disebabkan oleh jamur *S. scitamineum* tersebut (Yulianti, 2020). Perubahan kondisi lingkungan, penggunaan varietas yang sama dalam kurun waktu yang lama, pergeseran penanaman tebu dari lahan sawah ke tadah hujan serta pergantian sistem tanam

merupakan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi perubahan status penyakit luka api di Indonesia (Yulianti, 2020).

Faktor yang Mempengaruhi Perkembangan Penyakit Luka Api

Sebagaimana pengetahuan yang jamak diketahui, penyakit tanaman terjadi karena adanya interaksi tiga faktor yang dikenal dengan segitiga penyakit yaitu adanya inang yang rentan, patogen yang virulen, serta kondisi lingkungan yang mendukung bagi perkembangan penyakit (Agrios, 2005). Apabila salah satu faktor itu tidak terpenuhi, maka penyakit tidak dapat terjadi. Studi *in-vitro* pada pengujian perkecambahan spora menunjukkan bahwa teliospora berkecambah optimal pada suhu 30 °C (Bhuiyan et al., 2009).

Di dalam tanah, kemampuan spora jamur *S. scitamineum* untuk bertahan sangat dipengaruhi oleh kelembaban tanah. Pada kondisi kering, spora masih dapat berkecambah hingga mencapai 70% meskipun telah bertahan lebih dari 200 hari, sementara pada kondisi basah spora akan berkecambah dengan cepat dalam waktu 48 jam (Abdou et al., 1990). Selain itu kemampuan spora bertahan pada tanah yang kering lebih lama dibandingkan kondisi basah (Abdou et al., 1990; Bhuiyan et al., 2009). Bhuiyan et al. (2009) juga menyatakan bahwa spora jamur *S. scitamineum* dapat bertahan lebih dari 24 minggu di dalam tanah dengan kelembaban 0%, sementara itu pada kondisi kelembaban tanah 30% spora hanya mampu bertahan selama 12 minggu. Hoy et al. (1991) dan Akalach & Touil (1996) menyatakan bahwa kondisi lingkungan, utamanya suhu, sangat mempengaruhi perkembangan penyakit luka api, yakni suhu yang tinggi (30-35 °C) merupakan kondisi yang menguntungkan bagi perkembangan penyakit. Sebagaimana faktor lingkungan, karakteristik varietas tebu (tahan, moderat, ataupun rentan) juga sangat mempengaruhi perkembangan penyakit luka api di lapangan (Que et al., 2012). Hoy et al.

(1991) juga menyatakan perbedaan karakter ketahanan tebu terhadap *S. scitamineum* dapat menyebabkan perbedaan lama masa inkubasi dan produksi sorus dengan masa inkubasi bervariasi antara 1,5 hingga 8 bulan dengan kemampuan setiap sorus untuk memproduksi spora mencapai 8×10^6 spora per hari selama 1-3 bulan. Ketahanan tebu terhadap penyakit luka api dipengaruhi oleh tipe morfologi bud (mata tunas) serta respon tanaman terhadap patogen setelah mampu masuk ke dalam jaringan tanaman inangnya.

Selain faktor lingkungan dan karakter ketahanan tebu, umur tebu serta konsentrasi spora juga mempengaruhi tingkat perkembangan penyakit luka api. Konsentrasi spora yang tinggi meningkatkan peluang terjadinya infeksi pada tunas tebu (Bock, 1964). Apabila batang utamanya telah terinfeksi, ini dapat meningkatkan peluang batang sekundernya untuk terinfeksi juga (Bock, 1964; Elston & Simmonds, 1988). Lebih lanjut Lee-Lovick (1978) menyatakan bahwa penyebaran terjadinya infeksi sekunder sangat dipengaruhi oleh umur batang (batang yang muda lebih rentan), kelembaban, suhu serta konsentrasi spora.

MEKANISME KETAHANAN TEBU TERHADAP *S. scitamineum*

Ketahanan tebu terhadap penyakit luka api dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu ketahanan eksternal dan internal (Elston & Simmonds, 1988; Heinze et al., 2001; Bhuiyan et al., 2013). Ketahanan eksternal meliputi struktur morfologi tanaman yang secara fisik dapat menjadi penghalang bagi patogen untuk menginfeksi serta mencegah spora untuk dapat mendarat di permukaan batang dan menahan penyebaran patogen, misalnya bentuk dan ukuran mata tunas, adanya lapisan *wax* (lilin) serta konsentrasi *trichome* yang ada pada tanaman (Waller, 1970; Dean, 1982; Gloria et al., 1999; Łażniewska et al., 2012; Serrano et al., 2014). Waller (1970)

menyatakan adanya indikasi tunas tebu yang memiliki kemampuan berkecambah dan laju pertumbuhan awal lebih lambat lebih tahan terhadap infeksi *S. scitamineum*. Selain morfologi mata tunas, ketahanan eksternal juga meliputi terbentuknya senyawa kimia di daerah sekitar tunas tersebut seperti senyawa fenol, phenylpropanoids, dan glycosyle-flavonoids (Waller, 1970; Dean, 1982; Gloria et al., 1999; Fontaniella et al., 2002; Millanes et al., 2005; Millanes et al., 2008). Phenylpropanoids merupakan salah satu jalur metabolisme yang berperan dalam mekanisme ketahanan tanaman terhadap infeksi patogen (McNeil et al., 2018).

Adapun ketahanan internal terjadi ketika patogen telah berhasil masuk ke dalam jaringan tanaman inangnya, yang berarti patogen telah dapat mematahkan ketahanan eksternal inang. Ketahanan internal ini dipengaruhi oleh interaksi antara tebu sebagai tanaman inang dan jamur *S. scitamineum* di dalam jaringan inangnya (Aitken et al., 2012). Pembentukan lignin dipercaya sebagai salah satu metode pertahanan fisik tanaman terhadap infeksi patogen. Ketika lignin terbentuk maka patogen menjadi lebih sulit untuk merusak jaringan tanaman inang. Selain itu lignin juga dapat memblokir pergerakan metabolit yang dihasilkan patogen baik itu berupa enzim maupun toksin ke jaringan inang dan sebaliknya patogen juga tidak dapat memperoleh pasokan nutrisi dari inang yang mungkin dibutuhkan untuk pertumbuhan patogen sehingga pada akhirnya dapat mengurangi virulensi patogen (Vance et al., 1980). Kadar lignin di dalam jaringan tunas juga dapat menjadi indikasi tingkat ketahanan tebu terhadap penggerek pucuk (*Chilo infuscatellus*). Hasil analisis lignin pada tebu dengan berbagai tingkat ketahanan (kurang rentan, moderat rentan, dan sangat rentan) menunjukkan kadar lignin yang berbeda-beda pada masing-masing varietas tebu dengan kisaran sebagai berikut 6,61-7,09%; 5,99-6,38% dan 4,96-5,69%, sedangkan kontrol

rentan memiliki kadar lignin 5,11%. Hal ini mengindikasikan kadar lignin pada jaringan tunas berkorelasi negatif dengan kerentanan tebu terhadap penggerek pucuk yang berarti semakin rentan tebu, kadar lignin di tunasnya semakin rendah (Bhavani et al., 2012).

Mekanisme ketahanan tanaman terhadap infeksi patogen merupakan suatu hal yang kompleks yang melibatkan banyak gen ketahanan dan jalur metabolit sekunder seperti akumulasi senyawa fenol dan pathogenesis-related (PR) protein (Lao et al., 2008). Santiago et al. (2008) mengemukakan pada tebu varietas tahan menghasilkan senyawa *hydroxycinnamic acid* lebih tinggi dibandingkan varietas yang rentan. Peningkatan senyawa ini terjadi akibat meningkatnya aktivitas enzim *phenylalanine ammonia lyase* (PAL). Selain peningkatan aktivitas enzim PAL, pada tanaman yang tahan juga terjadi peningkatan enzim yang berkaitan dengan ketahanan seperti peroksidase, kitinase, esterase dan β -1,3 glucanase (de Armas et al., 2007; Esh et al., 2014). Hasil penelitian Song et al. (2019) menunjukkan adanya peningkatan aktivitas peroxidase (+4,08%), superoxide dismutase (+11,83%), polyphenol oxidase (+38,46), kitinase (+12,28%) dan β -1,3 glucanase (3,31%) pada daun tebu setelah diinjeksi dengan jamur *S. scitamineum*. Senyawa-senyawa tersebut berkaitan dengan mekanisme ketahanan tanaman terhadap infeksi patogen, termasuk pembentukan lignin dan kemampuannya dalam menghambat pertumbuhan patogen maupun menghancurkan dinding sel patogen.

Gen ketahanan yang ada di dalam tanaman ini dapat diturunkan dari tetua pada progeninya (Aitken et al., 2012; Santiago et al., 2012). Ada beberapa faktor yang mempengaruhi ekspresi gen tahan ini diantaranya adalah aktivitas gen lain, tahap perkembangan tanaman (beberapa tanaman

saat masih muda rentan namun ketahanannya akan meningkat seiring dengan bertambahnya umur tanaman), serta lingkungan terutama suhu (Vale et al., 2001; Que et al., 2011).

Analisis ekspresi gen yang berkaitan dengan ketahanan ini dapat dilakukan melalui pendekatan dengan metode molekuler seperti sequence-related amplified polymorphism (cDNA-SRAP), RT-qPCR, serta RNA-seq (Huang et al., 2015; Su et al., 2015; McNeil et al. 2018). Melalui metode cDNA-SRAP, Huang et al. (2015) berhasil mengidentifikasi beberapa gen yang berasosiasi dengan terjadinya infeksi jamur *S. scitamineum* yang meliputi topoisomerase, etilen, dan tetraspanin. Dalam waktu 72 jam setelah infeksi, ada peningkatan ekspresi topoisomerase dan etilen, namun tetraspanin menurun. Su et al. (2015) dapat mengidentifikasi adanya peningkatan enzim kitinase pada awal terjadinya infeksi *S. scitamineum* dan konsentrasi kitinase ini tetap tinggi pada tebu varietas Yacheng 05-179 (tahan), sedangkan pada varietas yang rentan (ROC22) tidak ditemukan terjadinya peningkatan kitinase. Adapun McNeil et al. (2018) dengan memanfaatkan informasi dari RNA-seq telah berhasil mengidentifikasi 861 gen yang memiliki ekspresi yang berbeda-beda pada tebu varietas CP74-2005 setelah diinokulasi *S. scitamineum*. Dari 861 gen, sebanyak 343 gen (40%) ekspresinya meningkat dan 518 gen (60%) menurun. Gen yang berhasil diidentifikasi tersebut meliputi gen yang terlibat pada jalur pembentukan phenylpropanoid, dinding sel, hormon tanaman, dan respon ketahanan tanaman terhadap patogen, studi ini juga mengidentifikasi gen yang berkaitan dengan jalur phenylpropanoid diketahui berperan dalam ketahanan tanaman-meningkat pada periode awal terjadi infeksi yang mengindikasikan adanya reaksi ketahanan eksternal dari tanaman.

STRATEGI PENGENDALIAN PENYAKIT LUKA API

Secara umum ada dua pendekatan dalam pengendalian penyakit tanaman yaitu secara preventif dan kuratif. Pengendalian secara preventif dimaksudkan untuk mencegah supaya tidak terjadi atau meminimalkan kejadian penyakit, sedangkan pengendalian kuratif dilakukan ketika sudah ditemukan adanya tanaman yang bergejala di lapangan.

Hal pertama yang harus diperhatikan dalam pengendalian secara preventif adalah penggunaan benih yang sehat (Ovalle & Viswanathan, 2020). Ini berarti harus memastikan sumber bahan tanamnya sehat dan tidak terinfeksi jamur *S. scitamineum*. Hal ini dikarenakan penyakit luka api bersifat sistemik, sehingga apabila satu batang sudah terinfeksi maka dapat dipastikan anaknya juga dapat terinfeksi. Perlakuan perendaman air panas atau *hot water treatment* (HWT) selama 30 menit pada suhu 52 °C sebelum benih ditanam dan rotasi tanaman dengan menggunakan tanaman bukan inang juga dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya penyakit luka api. Adapun pengendalian secara kuratif dapat dilakukan dengan eradikasi tanaman yang terinfeksi dengan mencabut seluruh batang dalam satu rumpun meskipun hanya ada satu batang yang bergejala untuk mencegah menyebarnya spora di lapangan (Wada et al. 1999; Bhuiyan et al. 2013; Shailbala et al. 2013).

Lal et al. (2009) membuka peluang pengendalian secara biologi dengan memanfaatkan kultur filtrat agen hayati *Trichoderma viride* dan ekstrak daun *Calendula officinalis* dan *Solanum nigrum*. Penggunaan filtrat *T. viride* tidak hanya dapat menekan kejadian penyakit luka api, tetapi dapat juga meningkatkan persentase perkecambahan benih serta produksi tebu. Sementara uji *in vitro* kedua bahan tanaman tersebut menunjukkan adanya penghambatan pertumbuhan miselia dan perkecambahan

teliospora jamur *S. scitamineum*. Penggunaan fungisida berbahan aktif carbendazim, cyproconazole, propiconazole, triademifon, azoxystrobin, dan flutriafol dapat menjadi alternatif pengendalian penyakit luka api (Bhuiyan et al., 2012; Rajput et al., 2019). Aplikasi fungisida ini dimaksudkan untuk mengurangi sumber inokulum awal dan menurunkan laju perkembangan penyakit (Putra & Damayanti, 2012). Rajput et al., (2019) mengemukakan apabila diaplikasikan sebelum tanam, fungisida tidak hanya menghilangkan jamur dari bahan tanamnya, tetapi juga dapat mencegah infeksi. Menurut hasil penelitiannya, perendaman tebu di dalam larutan fungisida dalam air panas (52 °C) selama 30 menit lebih efektif dibandingkan direndam dalam air pada suhu normal.

Di atas beberapa alternatif pengendalian yang telah disebutkan, penggunaan varietas yang tahan merupakan metode pengendalian yang paling efektif untuk mencegah penyakit luka api (Comstock, 2000). Apalagi varietas yang memiliki dua tipe ketahanan, eksternal dan internal, dapat memberikan perlindungan yang utuh terhadap infeksi luka api (McNeil et al., 2018). Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia (P3GI) telah menghasilkan varietas tebu yang tahan terhadap penyakit luka api ini, setelah sebelumnya varietas M 442-51 yang populer di jamannya ternyata rentan terhadap luka api. Program pengembangan varietas tahan ini telah dimulai sejak tahun 1979 melalui pengujian ketahanan tebu terhadap *S. scitamineum* dan telah menghasilkan beberapa varietas tebu yang tahan yaitu PS 79-82, PS 864, PS 891, PS 95, dan PSJT 941 (Putra & Damayanti, 2012). Sejak tahun 2003, melalui program bongkar ratun, varietas-varietas tahan ini seperti PS 864 dan PSJT 941 telah banyak dikembangkan di lahan tadah hujan menggantikan varietas M 442-51.

Di Indonesia, pola tanam tebu terdiri atas pola tanam A dan B. Pola tanam A atau pola I merupakan masa tanam tebu pada

musim kemarau (Mei hingga Agustus), sedangkan pola tanam B atau pola II merupakan masa tanam tebu pada awal musim penghujan (Oktober hingga Desember). Berdasarkan kebiasaan pola tanam tersebut, maka penting bagi kita untuk memiliki dan mengetahui tipe ketahanan varietas tebu. Seperti yang dijelaskan sebelumnya, tebu yang memiliki dua tipe ketahanan, eksternal dan internal, merupakan tipe varietas yang sangat menjanjikan untuk dikembangkan. Namun apabila hanya memiliki salah satu tipe ketahanan saja, maka dapat dipilih sesuai dengan pola tanamnya, misalnya tebu yang ditanam pada pola A adalah varietas tebu yang memiliki ketahanan eksternal karena pola tanam A pada musim kering dan kondisi inilah yang mendukung bagi perkembangan penyakit luka api. Dengan memiliki ketahanan eksternal, tanaman dapat terlindungi sejak sebelum patogen berhasil masuk ke dalam jaringannya. Di sisi lain, pada pola tanam B, varietas tebu dengan tipe ketahanan internal dapat menjadi pilihan, meskipun tidak memiliki ketahanan eksternal. Hal ini dikarenakan pola tanam B pada musim penghujan yang bukan merupakan kondisi yang disukai oleh jamur *S. scitamineum*.

PELUANG PENGEMBANGAN TEKNIK PENGENDALIAN DAN PENELITIAN KETAHANAN TEBU TERHADAP PENYAKIT LUKA API

Sampai dengan saat ini penggunaan varietas tahan adalah metode pengendalian yang terbaik untuk penyakit luka api. Oleh karena itu program pemuliaan untuk memperoleh varietas tahan harus terus dilakukan baik itu melalui kegiatan persilangan maupun induksi mutasi. Selanjutnya hasil pemuliaan tersebut diuji ketahanannya terhadap luka api melalui metode perendaman dalam teliospora jamur *S. scitamineum* (kerapatan spora 5×10^6 teliospora per mL). Untuk memperoleh varietas tebu yang

memiliki dua tipe ketahanan, galur-galur yang diperoleh diinokulasi selain dengan metode perendaman juga injeksi dengan menggunakan teliospora jamur *S. scitamineum*. Metode inokulasi secara injeksi ditujukan untuk mengetahui adanya ketahanan internal tanaman, karena injeksi dapat merusak ketahanan eksternal tanaman sehingga tanaman yang tidak bergejala ketika diinokulasi dengan injeksi mengindikasikan bahwa mereka memiliki ketahanan internal (Aitken et al., 2012).

Saat ini Balai Penelitian Tanaman Pemanis dan Serat (Balittas) juga telah berupaya untuk mengembangkan varietas tahan luka api melalui metode persilangan dan induksi mutasi. Melalui induksi mutasi telah diperoleh beberapa genotipe yang menunjukkan sifat tahan terhadap *S. scitamineum* pada tahap pengujian tanaman PC dan sekarang genotipe-genotipe tersebut tetap dipelihara untuk mengetahui ketahanannya pada tanaman RC1. Sebagaimana disebutkan sebelumnya, tanaman ratun lebih rentan dibandingkan tanaman PC. Tahap selanjutnya genotipe ini juga akan diuji tipe ketahanannya, apakah memiliki tipe ketahanan eksternal atau internal. Apabila ternyata memiliki dua tipe ketahanan (eksternal dan internal) tentunya akan sangat bagus karena dapat menjamin keberlangsungan sifat ketahanannya terhadap infeksi patogen.

Teknik pengendalian tebu secara hayati dengan memanfaatkan mikroba juga berpeluang untuk dikembangkan. Indonesia adalah negara dengan keanekaragaman hayati tertinggi kedua di dunia, baik itu flora, fauna, maupun mikroba, sehingga potensinya sangat besar untuk dilakukan eksplorasi mikroba yang berperan dalam pengendalian hayati penyakit luka api, salah satunya adalah jamur atau bakteri endofit. Di Indonesia, penggunaan jamur endofit telah banyak digunakan untuk mengendalikan penyakit tanaman hortikultura, namun untuk penyakit luka api sendiri belum ada informasi

yang jelas. Oleh karena itu ke depan, penelitian tentang eksplorasi dan pemanfaatan mikroba endofit ini merupakan peluang yang sangat bagus sekaligus memberikan harapan penerapan pengendalian yang ramah lingkungan bagi penyakit luka api. Hasil penelitian Jayakumar et al. (2019) menunjukkan bahwa penggunaan bakteri endofit yang diisolasi dari internod, mata tunas, dan akar dapat menurunkan kejadian penyakit luka api hingga 50% dibandingkan perlakuan kontrol. Selain itu aplikasi bakteri endofit juga dapat meningkatkan perkecambahan, jumlah tebu yang dapat dipanen, brix serta sukrosa. Penggunaan mikroba endofit ini menjadi sangat penting untuk mendukung budi daya tebu yang berkelanjutan (Ovalle & Viswanathan, 2020).

Peluang lain penelitian adalah terkait dengan mekanisme ketahanan terhadap luka api. Meskipun di luar negeri telah banyak dilakukan penelitian tentang ekspresi gen yang berkaitan dengan ketahanan tebu terhadap *S. scitamineum*, namun informasi masih sangat terbatas untuk varietas tebu yang dikembangkan di Indonesia. Selain itu, informasi tentang perubahan senyawa kimia yang ada di dalam varietas tebu setelah terinfeksi *S. scitamineum* juga belum banyak dipelajari di Indonesia, padahal ini dapat dimanfaatkan sebagai metode skrining varietas tebu tahan terhadap penyakit luka api. Su et al. (2016) mengemukakan akumulasi senyawa peroksidase, ascorbate peroksidase, catalase, superoxide dismutase, β -1,3-glucanase, dan malondialdehyde pada tanaman tebu dapat menjadi seleksi awal yang mengindikasikan adanya ketahanan terhadap jamur *S. scitamineum* pada saat awal terjadinya infeksi. Selanjutnya, pengembangan marka molekuler penyandi ketahanan tebu terhadap penyakit luka api juga sangat penting karena apabila marka tersebut ditemukan maka skrining ketahanan tebu terhadap luka api dapat lebih simpel dan efisien, tidak memerlukan lahan yang luas dan

waktu yang dibutuhkan juga lebih pendek. Hal ini juga dapat mendukung upaya untuk memperoleh varietas tebu tahan terhadap penyakit luka api dengan lebih cepat.

Pada akhirnya, pengelolaan penyakit secara terpadu sangat disarankan untuk penyakit luka api melalui penggunaan varietas tahan yang dipadukan dengan perlakuan air panas pada suhu 52 °C selama 30 menit kemudian aplikasi mikroba endofit sebelum budzet ditanam. Setelah ditanam di lahan, harus selalu dilakukan monitoring penyakit secara teratur. Apabila ditemukan ada tanaman yang bergejala, seluruh rumpun harus dicabut dan dimusnahkan untuk mengurangi sumber inokulum dan mencegah penularan pada tanaman atau lokasi lain yang sehat.

PENUTUP

Penyakit luka api yang disebabkan oleh jamur *S. scitamineum* merupakan salah satu penyakit penting pada tanaman tebu yang dapat berkembang dengan baik pada kondisi panas dan kering. Penyakit ini ditemukan pertama kali pada tahun 1877 di Kepulauan Natal, Afrika Selatan yang selanjutnya menyebar ke hampir seluruh negara yang mengembangkan tebu. Di Indonesia sendiri, penyakit luka api dilaporkan pertama kali pada tahun 1881. Pengendalian penyakit yang paling efektif adalah dengan menggunakan varietas yang tahan. Benih yang digunakan harus berasal dari tanaman yang sehat dengan didukung dengan perlakuan air panas pada suhu 52 °C selama 30 menit. Program pemuliaan untuk memperoleh varietas tahan masih sangat diperlukan. Identifikasi tipe ketahanan serta faktor yang berperan dalam mekanisme ketahanan tebu terhadap jamur *S. scitamineum* juga sangat penting untuk mendukung pengembangan varietas tahan. Selain itu penelitian tentang eksplorasi dan pemanfaatan mikroba endofit juga sangat penting dilakukan untuk mendukung

pelaksanaan pengendalian penyakit tebu yang ramah lingkungan. Pengembangan marka molekuler penyandi ketahanan juga sangat penting dilakukan untuk mendukung skrining ketahanan terhadap penyakit luka api.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Prof. Ir. Nurindah, Ph.D., Ir. Titiak Yulianti, M.Agr. Sc., Ph.D., dan seluruh pihak yang membantu dalam proses penyusunan tinjauan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdou, Y., Moursy, M., Abdel-Fattah, M., Mansour, I., 1990. Effects of temperature and certain cultural practices on longevity of teliospores of *Ustilago scitaminea*. Bull. Fac. Agric. Univ. Cairo 41, 511–520.
- Agrios, G., 2005. Plant Pathology, 5th ed. Academic Press, New York.
- Aitken, K., Bhuiyan, S., Berkman, P., Croft, B., McNeil, M., 2012. Investigation of the genetic mechanisms of resistance to smut in sugarcane. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. 1–9.
- Akalach, M., Touil, B., 1996. Occurrence and Spread of Sugarcane Smut Caused by *Ustilago scitaminea* in Morocco. Plant Dis. 80, 1363–1366.
- Alfieri, S., Seymour, C., Miller, J., 1979. Sugarcane smut in Florida. Phytopathology 69, A2–A.
- Bhavani, B., Reddy, K., NV, R., Lakshmi, M., 2012. Biochemical basis for antibiosis mechanism of resistance in sugarcane to early shoot borer, *Chilo infuscatellus* Snellen. Trop. Agric. Res. 23, 126–141.
- Bhuiyan, S., Croft, B., Cox, M., 2009. Survival of sugarcane smut teliospores under South East Queensland conditions. Proc Aust Soc Sugar Cane Technol 135–144.
- Bhuiyan, S., Croft, B., Cox, M., Bade, G., 2010. Varietal resistance of sugarcane to natural infection of smut-preliminary results. Proc Aust Soc Sugar Cane Technol 355–365.
- Bhuiyan, S., Croft, B., Deomano, E., James, R., Stringer, J., 2013. Mechanism of resistance in Australian sugarcane parent clones to smut and the effect of hot water treatment. Crop Pasture Sci. 64, 892–900.
- Bhuiyan, S., Croft, B., James, R., Cox, M., 2012. Laboratory and field evaluation of fungicides for the management of sugarcane smut caused by *Sporisorium scitamineum* in seedcane. Australas. Plant Pathol 41, 591–599.
- Bock, K., 1964. Studies on sugar-cane smut (*Ustilago scitaminea*) in Kenya. Trans. Br. mycol. Soc. 47, 403–417.
- Braithwaite, K., Bakkeren, G., Croft, B., Brumbley, S., 2004. Genetic variation in a worldwide collection of the sugarcane smut fungus *Ustilago scitaminea*. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol 48–56.
- Comstock, J., 2000. Smut, in: Rott, P., Bailey, R., Comstock, J., Croft, B., Saumtally, A. (Eds.), A Guide to Sugarcane Diseases. CIRAD and ISSCT, Montpellier, France, pp. 181–185.
- Croft, B., Braithwaite, K., 2006. Management of an incursion of sugarcane smut in Australia. Australas. Plant Pathol. 35, 113–122.
- Croft, B., Magarey, R., Allsopp, P., Cox, M., Willcox, T., Milford, B., Wallis, E., 2008. Sugarcane smut in Queensland: arrival and emergency response. Australas. Plant Pathol. 37, 26–34.
- De Armas, R., Santiago, R., Legaz, M., Vicente, C., 2007. Levels of phenolic compounds and enzyme activity can be used to screen for resistance of sugarcane to smut (*Ustilago scitaminea*),. Australas. Plant Pathol. 36, 32–38.
- Dean, J., 1982. The effect of wounding and high-pressure spray inoculation on the smut reactions of sugarcane clones. Phytopathology 72, : 1023–1025.
- Elston, D., Simmonds, N., 1988. Models of sugarcane smut disease and their

- implications for testing variety resistance. *J. Appl. Ecol.* 25, 31929.
- Esh, A., Guirgis, A., El-kholi, M., El-Absawy, E., Nasr, M., Hassanien, E., 2014. The activity of pathogenesis related proteins in smut resistant and susceptible sugarcane (GT54-9) mutants induced by gamma radiation. *Adv Plants Agric Res.* 1, 146–156.
- Ferreira, S., Comstock, J., 1989. Smut, in: Ricaud, C., Egan, B., Gillaspie, A., Hughes, C. (Eds.), *Diseases of Sugarcane*. Elsevier Science Publisher B.V., The Netherlands.
- Fontaniella, B., Márquez, A., Rodríguez, C., Piñón, D., Solas, M., Vicente, C., Legaz, M., 2002. A role for sugarcane glycoproteins in the resistance of sugarcane to *Ustilago scitaminea*. *Plant Physiol. Biochem.* 40, 881–889.
- Gloria, Ba., Albernás, M., Amorim, L., Filho, A., 1999. Morphological characteristics of sugarcane clones, susceptible and resistant to smut (*Ustilago scitaminea*), in: Rao, G., Filho, A., Magarey, R., Autrey, L. (Eds.), *Sugarcane Pathology*. Science Publishers, p. 16782.
- Heinze, B., Thokoane, L., Williams, N., Barnes, J., Rutherford, R., 2001. The smut sugarcane interaction as a model system for the integration of marker discovery and gene isolation. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 88–93.
- Horton, J., Bakkeren, G., Klosterman, S., Garcia-Pedrajas, M., Gold, S., 2005. Genetics of morphogenesis in basidiomycetes, in: Dilip, K., Randy, M. (Eds.), *Applied Mycology and Biotechnology*. Elsevier, pp. 353–422.
- Hoy, J., Grisham, M., Chao, C., 1991. Production of spores and dispersal of teliospores of *Ustilago scitaminea* in Louisiana. *Phytopathology* 81, 574–579.
- Hoy, J., Hollier, C., Fontenot, D., Grelen, L., 1986. Incidence of sugarcane smut in Louisiana and its effect on yield. *Plant Dis.* 70, 59–60.
- Huang, N., Zhang, Y., Xiao, X., Huang, L., Wu, Q., 2015. Identification of smut responsive genes in sugarcane using cDNA-SRAP. *Genet. Mol. Res.* 14, 6808–6818.
- Izadi, M., Moosawi-Jorf, S., 2007. Isolation and identification of yeast-like and mycelial colonies of *Ustilago scitaminea* using specific primers. *Asian J. Plant Sci.* 6, 1137–1142.
- Jayakumar, V., Sundar, A., Viswanathan, R., 2019. Biological suppression of sugarcane smut with endophytic bacteria. *Sugar Tech* 21, 653–660.
- Kavitha, M., Sundar, A., Padmanaban, P., Viswanathan, R., Malathi, P., 2014. Comparative study on early detection of sugarcane smut (*Sporisorium scitamineum*) by polymerase chain reaction (PCR) and microscopy. *African J. Biotechnol.* 13, 4635.
- Kristini, A., Achadian, E., Irawan, Putra, L., Dianpratiwi, T., Mulyadi, M., Murwandono, 2008. An overview of sugarcane disease in Java: distribution and domination of important sugarcane diseases. *MPG* 44, 205–218.
- Lal, R., Sinha, O., Bhatnagar, S., Lal, S., Awasthi, S., 2009. Biological control of sugarcane smut (*Sporisorium scitamineum*) through botanicals and *Trichoderma viride*. *Sugar Tech* 11, 381–386.
- Lambat, A., Chenulu, V., Chona, B., 1968. Morphological variation in the sugarcane smut *Ustilago scitaminea* Syd., *Mycopathol. Mycol. Appl.* 36, : 300–304.
- Lao, M., Arencibia, A., Carmona, E., Acevedo, R., Rodriguez, E., Leon, G., Santana, I., 2008. Differential expression analysis by cDNA-AFLP of *Saccharum* spp. after inoculation with the host pathogen *Sporisorium scitamineum*. *Plant Cell Rep.* 27, 1103–1111.
- łażniewska, J., Macioszek, V., Kononowicz, A., 2012. Plant-fungus interface: The role of surface structures in plant resistance and susceptibility to pathogenic fungi. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 78, 24–30.
- Lee-Lovick, G., 1978. Smut of sugarcane - *Ustilago scitaminea*. *Rev. Plant Pathol.* 57, 181–188.

- Magarey, R., Bull, J., Sheahan, T., Denney, D., 2010. Yield losses caused by sugarcane smut in several crops in Queensland. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol* 347–354.
- McNeil, M., Bhuiyan, S., Berkman, P., Croft, B., Aitken, K., 2018. Analysis of the resistance mechanisms in sugarcane during *Sporisorium scitamineum* infection using RNA-seq and microscopy. *PLoS One* 13, e0197840.
- Millanes, A., Fontaniella, B., Legaz, M.-E., Vicente, C., 2005. Glycoproteins from sugarcane plants regulate cell polarity of *Ustilago scitaminea* teliospores. *J. Plant Physiol.* 162, 253–265.
- Millanes, A., Vicente, C., Legaz, M., 2008. Sugarcane glycoproteins bind to surface, specific ligands and modify cytoskeleton arrangement of *Ustilago scitaminea* teliospores. *J. Plant Interact.* 3, 95–110.
- Ovalle, W., Viswanathan, R., 2020. Sustaining sugarcane production in Guatemala and Nicaragua through efficient disease management approaches. *Sugar Tech.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12355-020-00801-6>
- Piepenbring, M., 2009. Diversity, ecology, and systematics of smut fungi, in: Claro, K., Oliveira, P., Rico-Gray, V. (Eds.), *Tropical Biology and Conservation Management Phytopathology and Entomology*. Eolss Publisher Co. Ltd., Oxford, United Kingdom, pp. 141–172.
- Putra, L., Damayanti, T., 2012. Major diseases affecting sugarcane production in Indonesia. *Funct. Plant. Sci. Biotechnol.* 6, 124–129.
- Que, Y., Lin, J., Song, X., Xu, L., Chen, R., 2011. Differential gene expression in sugarcane in response to challenge by fungal pathogen *Ustilago scitaminea* revealed by cDNA-AFLP. *J. Biomed. Biotechnol.*
- Que, Y., Xu, L., Lin, J., Chen, R., Grisham, M., 2012. Molecular variation of *Sporisorium scitamineum* in mainland China revealed by RAPD and SRAP markers. *Plant Dis.* 96, 1519–1525.
- Que, Y., Xu, L., Wu, Q., Liu, Y., Ling, H., Liu, Y., Zhang, Y., Guo, J., Su, Y., Chen, J., Wang, S., Zhang, C., 2014. Genome sequencing of *Sporisorium scitamineum* provides insights into the pathogenic mechanisms of sugarcane smut. *BMC Genomics* 15, 996.
- Rajput, M., Syed, R., Khanzada, M., Rajput, N., Khoso, F., Lodhi, A., 2019. Chemical control of whip smut of sugarcane caused by *Sporisorium scitamineum*. *Pak. J. Bot* 51, 1891–1897. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.30848/PJB2019-5\(17\)](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.30848/PJB2019-5(17))
- Santiago, R., Alarcon, B., de Armas, R., Vicente, C., Legaz, M., 2012. Changes in cinnamyl alcohol dehydrogenase activities from sugarcane cultivars inoculated with *Sporisorium scitamineum* sporidia. *Physiol. Plant.* 145, 245–259.
- Santiago, R., Legaz, R., Vicente, R., de Armas, R., 2008. Separation from *Ustilago scitaminea* of different elicitors which modify the pattern of phenolic accumulation in sugarcane leaves. *J. Plant Pathol.* 90, 87–96.
- Schaker, P., Palhares, A., Taniguti, L., Peters, L., Creste, S., Aitken, K., Van Sluys, M.-A., Kitajima, J., Vieira, M., Monteiro-Vitorello, C., 2016. RNAseq transcriptional profiling following whip development in sugarcane smut disease. *PLoS One* 11, e0162237.
- Schenck, S., 1999. Molecular aspects of the sugarcane smut disease pathogen, *Ustilago scitaminea*, in: Rao, G., Filho, A., Magarey, R., Autrey, L. (Eds.), *Sugarcane Pathology*. Science Publishers, USA, p. 13140.
- Serrano, M., Coluccia, F., Torres, M., L'Haridon, F., Metraux, J.-P., 2014. The cuticle and plant defense to pathogens. *Front. Plant Sci.* 5, 274.
- Shailbala, Singh, V., Kashyap, S., 2013. Integrated management of sugarcane smut caused by *Sporisorium scitamineum* (Meike). *Res. Crop.* 14, 567–570.

- Shen, W., Xi, P., Li, M., Liu, R., Sun, L., Jiang, Z., Zhang, L., 2012. Genetic diversity of *Ustilago scitaminea* Syd. in Southern China revealed by combined ISSR and RAPD analysis. *African J. Biotechnol.* 11, 11693–11703.
- Solomon, S., 2011. Sugarcane by-products based industries in India. *Sugar Tech* 13, 408–416.
- Song, X., Mo, F., Verma, K., Wei, J., Zhang, X., Yang, L., Li, Y., 2019. Effect of sugarcane smut (*Ustilago scitaminea* Syd) on ultrastructure and biochemical indices of sugarcane. *Biomed J Sci Tech Res* 17, BJSTR.MS.ID.002950.
<https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.17.002950>
- Su, Y., Wang, Z., Xu, L., Peng, Q., Liu, F., Li, Z., Que, Y., 2016. Early selection for smut resistance in sugarcane using pathogen proliferation and changes in physiological and biochemical indices. *Front. Plant. Sci.* 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01133>
- Su, Y., Xu, L., Wang, S., Wang, Z., 2015. Identification, phylogeny, and transcript of chitinase family genes in sugarcane. *Sci. Rep.* 5, 10708.
- Sundar, A., Barnabas, E., Malathi, P., Viswanathan, R., 2012. A mini-review on smut disease of sugarcane caused by *Sporisorium scitamineum*, in: Mworio, J. (Ed.), *Botany*. Rijeka: InTech Publisher, pp. 109–128.
- Trione, E., 1990. Growth and sporulation of *Ustilago scitaminea*, in vivo and in vitro. *Mycol. Res.* 94, 489–493.
- Vale, F., Parlevliet, J., Zambolim, L., 2001. Concepts in plant disease resistance. *Fitopatol. Bras.* 26, 577–589.
- Vance, C., Kirk, T., Sherwood, R., 1980. Lignification as a mechanism of disease resistance. *Ann. Rev. Phytopathol* 18, 259–288.
- Wada, A., Mian, M., Anaso, A., Busari, L., Kwon-Ndung, E., 1999. Control of sugarcane smut (*Ustilago scitaminea* Syd) disease in Nigeria and suggestions for an integrated pest management approach. *An Int. J. Sugar Crop. Relat. Ind.* 1, 48–53.
- Waller, J., 1970. Sugarcane smut (*Ustilago scitaminea*) in Kenya: II. Infection and resistance. *Trans. Br. mycol. Soc* 54, 405–414.
- Wibawanti, R., 2015. Luka api serang pertanaman tebu di Indramayu-Jabar,. Kementerian. Pertanian. Direktorat Jenderal Perkebunan. Direktorat Perlindungan Tanaman.
- Yulianti, T., 2020. Status dan strategi teknologi pengendalian penyakit utama tebu di Indonesia. *Perspektif* 19, 01–16.