

Lensa **Biologi Molekul**

Memperkasakan Kajian Tumbuhan Karnivor *Nepenthes* di Semenanjung Malaysia

Seiring dengan perkembangan sains dan teknologi moden, analisis jujukan asid-deoksiribonukleik (DNA) kini menjadi satu daripada elemen kritikal yang digunakan oleh pengkaji untuk membuat pengecaman dan pembezaan spesies pada peringkat molekul. Hal ini dikatakan demikian kerana jujukan DNA mempunyai tahap kebolehbandingan yang tinggi dan tidak dipengaruhi oleh faktor persekitaran seperti ciri morfologi, seterusnya membolehkan penentuan spesies baharu bagi kumpulan kriptik.

Bahagian tertentu DNA seperti *internal transcribed spacer* (ITS) dan gen *ribulose-bisphosphate carboxylase large subunit* (rbcL) merupakan antara barkod DNA yang biasanya digunakan oleh pengkaji dalam menentusahkan pengelasan tumbuhan melalui cabang disiplin sistematik molekul. Tambahan pula, penggunaan pangkalan data raya genomik National Center for Biotechnology Information dapat memacu keperluan perbandingan kod DNA pada peringkat global dengan lebih komprehensif.

Sejak tahun 2015, tinjauan lapangan untuk mengenal pasti lokaliti kesemua spesies *Nepenthes* di Semenanjung Malaysia telah dimulakan oleh pengkaji dari Pusat Penyelidikan Bioteknologi dan Nanoteknologi, Institut Penyelidikan dan Kemajuan Pertanian Malaysia (MARDI). Usaha ini turut bertujuan untuk menyemak dan mengemas kini daftar spesies periuk kera tempatan (*Nepenthes* spp.), khususnya di kawasan pergunungan yang masih kurang diteroka serta mengenal pasti kemungkinan kewujudan spesies baharu berpaksikan pencirian DNA.

Seterusnya, penyelidikan *Nepenthes* dilanjutkan kepada kajian gen enzim pencernaan yang berpotensi untuk dimanfaatkan dalam aplikasi bioteknologi. Untuk memenuhi objektif tersebut, pendekatan bioteknologi yang menggabungkan disiplin

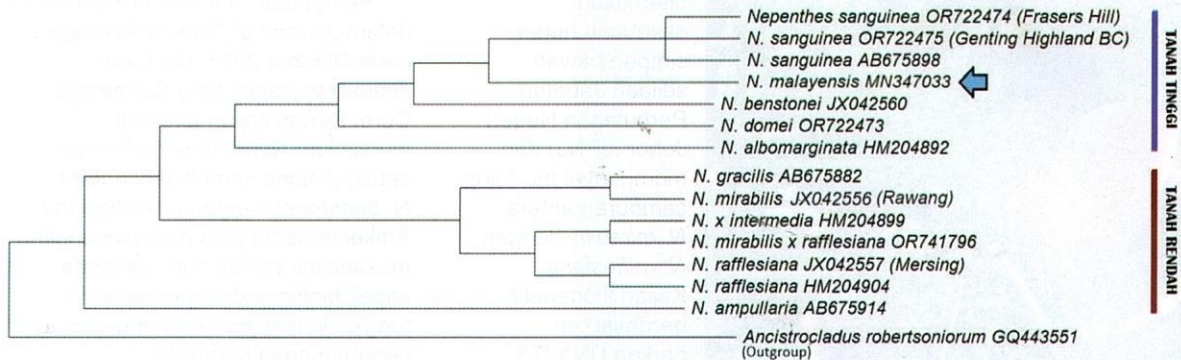
biologi molekul, genomik dan bioinformatik telah digunakan. Perbincangan berikut merupakan sorotan penemuan penyelidikan yang telah dicapai oleh MARDI setakat ini.

Kajian DNA Memangkin Penemuan Spesies Baharu *Nepenthes*

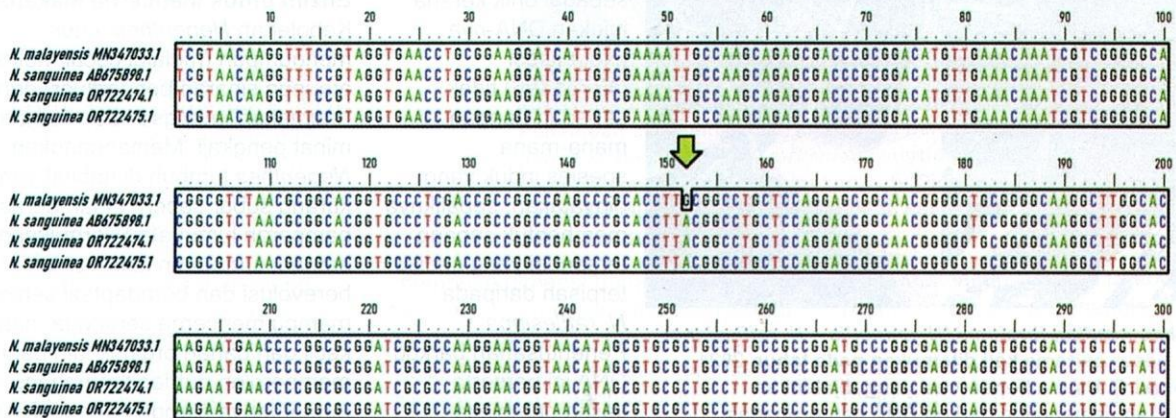
Pada tahun 2018, satu spesies periuk kera tanah tinggi yang tidak dapat dikenal pasti telah ditemukan di Terengganu. Kebanyakan populasi *Nepenthes* tumbuh di kawasan puncak dan lereng berbatu yang sukar diakses. Pencirian DNA ITS serta morfologi telah dilakukan bagi pengesahan dan



Nepenthes malayensis yang pertama kali dihiduraikan pada tahun 2020 merupakan spesies tanah tinggi yang lazimnya tumbuh di kawasan berbatu. Spesies ini mampu menghasilkan periuk bersaiz besar dan mempunyai isi padu mencapai 900 mililiter (mL).



Rajah 1 Analisis filogenetik beberapa takson *Nepenthes* di Semenanjung Malaysia berdasarkan jujukan DNA ITS menunjukkan bahawa *N. malayensis* (anak panah biru) tergolong dalam klad tanah tinggi dan membentuk jalur filogenetik yang terpisah daripada *N. sanguinea*.



Rajah 2 Penjajaran jujukan DNA berbilang antara *N. malayensis* dengan tiga *N. sanguinea* daripada lokaliti berbeza menunjukkan perbezaan satu nukleotida (anak panah hijau) pada satu posisi DNA ITS.

membezakannya daripada takson yang paling mirip. Spesies ini kemudiannya diterbitkan pada tahun 2020 dalam jurnal antarabangsa, *Kew Bulletin* sebagai spesies baharu, iaitu *Nepenthes malayensis*. Nama saintifik ini dipilih bagi mengetengahkan asal usulnya sebagai spesies yang endemik di Semenanjung Malaysia.

Analisis filogenetik dan perbandingan jujukan DNA ITS antara spesies lain jelas menunjukkan bahawa *N. malayensis* merupakan takson yang tersendiri dan tergolong dalam klad tanah tinggi. Berdasarkan analisis fragmen DNA ITS, *N. malayensis* (No. akses MN347033.1) berbeza satu nukleotida berbanding dengan *N. sanguinea* daripada tiga lokaliti berbeza (No. akses AB675898, OR722474

dan OR722475). Analisis DNA ini membuktikan bahawa *N. malayensis* bukan sekadar variasi dalam kumpulan spesies *N. sanguinea*, tetapi merupakan entiti genetik yang unik, sekali gus menyokong pemisahan taksonomi berdasarkan pencirian molekul.

Dari segi morfologi, *N. malayensis* merupakan spesies yang mampu menghasilkan periuk bersaiz besar (panjang 35 sentimeter dan isi padunya 900 mL) serta mempunyai beberapa ciri yang tidak sepadan dengan mana-mana spesies berdaftar di Semenanjung Malaysia. Dari segi morfologi secara kasar, *N. malayensis* agak mirip apabila dibandingkan dengan *N. sanguinea*.

Walau bagaimanapun, *N. malayensis* mempunyai penutup periuk (lid) yang membulat dan

berlekuk di pangkal serta mempunyai alur lipatan di tengah-tengahnya, manakala penutup *N. sanguinea* membujur dan tidak berlekuk di pangkal. Spesies ini juga mempunyai peristom (bibir) periuk yang lebih lebar dan berbucu serta mempunyai alur berwarna merah yang ketara dan konsisten.

N. malayensis turut dicirikan oleh kehadiran trikom halus berwarna putih pada batang serta bentuk batang yang sedikit silinder dengan sisi bersegi lebar, manakala *N. sanguinea* memiliki permukaan batang yang licin dengan sudut batang yang lebih tajam.

Dua spesies baharu, iaitu *N. domei* dan *N. latiffiana* turut ditemukan di habitat yang sama dengan *N. malayensis* ditemukan. Tiga penemuan spesies baharu ini merupakan yang pertama untuk abad



Nepenthes × sultan-ibrahimii (*N. mirabilis* × *N. rafflesiana*) bersaiz besar pertama kali ditemukan pada tahun 2021 di Johor (kiri). Usaha konservasi yang dijalankan termasuklah pemencilan barkod DNA dan propagasi menggunakan keratan pucuk bagi menghasilkan beberapa klon anak pokok (kanan).

ke-21 bagi kawasan Semenanjung Malaysia, sekali gus memainkan peranan penting dalam menghidupkan kembali usaha penyelidikan tumbuhan *Nepenthes*. Jika sebelum ini, hanya 11 spesies telah direkodkan, kini Semenanjung Malaysia merupakan habitat kepada 20 spesies periuk kera yang diiktiraf pada peringkat antarabangsa dan jumlah ini dijangka akan meningkat dari semasa ke semasa.

Penentusahan dan Konservasi Hibrid Langka melalui Barkod DNA

Selain digunakan untuk tujuan pengecaman dan pembezaan spesies, kod DNA juga dimanfaatkan untuk menentukan afiliasi *Nepenthes × sultan-ibrahimii*, iaitu sejenis periuk kera hibrid kacukan semula jadi (*N. mirabilis* × *N. rafflesiana*). Hibrid ini

ditemukan di sebuah hutan simpan bawah seliaan Jabatan Perhutanan Negeri Johor (JPNJ) dan mempunyai morfologi campuran antara *N. mirabilis* dengan *N. rafflesiana*. Kajian filogenetik berdasarkan barkod DNA ITS mengklasifikasikan hibrid tersebut sebagai unik kerana jujukan DNA-nya (No. aksesori OR741796) tidak sepadan dengan mana-mana spesies induk yang dinyatakan, sebaliknya membentuk cabang tersendiri yang sedikit terpisah daripada *N. rafflesiana*. Penentusahan barkod DNA ini berserta kajian pembiakan yang dijalankan oleh MARDI telah

menyokong usaha konservasi *Nepenthes* langka tersebut. Hasil kerjasama penyelidikan antara MARDI, Universiti Tun Hussein Onn dengan JPNJ tersebut telah diterbitkan dalam *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*.

Periuk Kera Berpendarfluor Hijau (Green Fluorescent)

Tambahan kepada penemuan takson baharu, terdapat juga sejenis *Nepenthes* di Semenanjung Malaysia yang direkodkan menghasilkan periuk berpendarfluor hijau. Apabila didedahkan kepada cahaya ultraungu pada rangsangan 365 nanometer, bahagian peristom periuk *Nepenthes* ini menghasilkan sinar hijau dan pemerhatian ciri unik ini merupakan rekod yang pertama bagi tumbuhan karnivor, khususnya dalam genus *Nepenthes*.

Penemuan istimewa ini diterbitkan dalam *Journal of Tropical Ecology* pada Oktober 2025 dan turut dimuatkan dalam blog Cambridge Core. Kertas kajian tersebut mencirikan *Nepenthes* berkenaan sebagai hibrid semula jadi antara *N. benstonei* dengan *N. rafflesiana*. Artikel tersebut juga membincangkan mekanisme pendarfluor daripada aspek biokimia dan genetik serta fungsi ciri unik ini dalam membantu pengumpulan serangga.

Tumbuhan Karnivor Menghasilkan Enzim untuk Mencerna Makanan

Kebolehan *Nepenthes* untuk mengumpukan (melalui cecair nektar ataupun sinaran pendarfluor) dan “memakan” mangsa telah menarik minat pengkaji. Memandangkan *Nepenthes* tumbuh di habitat yang kurang subur seperti tanah berasid, hamparan lumut atau permukaan batuan, tumbuhan karnivor ini berevolusi dan beradaptasi sehingga mampu mencerna serangga, haiwan kecil dan bahan organik lain bagi memperoleh nutrien tambahan, terutamanya nitrogen dan fosforus.

Kantung atau periuk *Nepenthes* yang terbentuk pada hujung daun berupaya menghasilkan cecair berasid serendah pH 1.7 (hampir sama dengan keasidan perut manusia) dan merembeskan sejumlah jenis enzim yang unik untuk tujuan pencernaan. Antara enzim pencernaan utama yang pernah direkodkan daripada *Nepenthes* termasuklah proteinase, ribonuklease, kitinase, fosfatase, esterase dan β -1,3-glukanase. Hampir kesemua kelas enzim yang dihasilkan oleh *Nepenthes* mempunyai potensi untuk dimanfaatkan dalam aplikasi bioteknologi dan biopemprosesan, namun penyelidikan asas bagi membuat pencirian enzim tersebut perlu dilakukan terlebih dahulu.

MARDI telah memulakan kajian untuk memencilkan gen enzim daripada sekurang-kurangnya tujuh spesies serta hibrid *Nepenthes* yang natif di Semenanjung Malaysia. Gen tersebut dipencilkan berbantuan data

genom *Nepenthes* dan jujukan gen yang diperoleh serta dicirikan dengan menggunakan beberapa perisian bioinformatik. Seterusnya, kajian prediksi terhadap motif dan struktur menunjukkan enzim *Nepenthes* berkenaan agak mirip dengan enzim pencernaan yang dihasilkan oleh kulat dan enzim yang dirembeskan dalam perut haiwan.

Sebagai rumusannya, penyelidikan yang dijalankan oleh MARDI telah membuktikan bahawa integrasi pendekatan biologi molekul, bioinformatik dan taksonomi memainkan peranan penting dalam pengecaman, pembezaan dan konservasi spesies *Nepenthes* di Semenanjung Malaysia. Analisis jujukan DNA dan penggunaan barkod DNA telah membolehkan penentuan spesies baharu seperti *Nepenthes malayensis*, sekali gus menyumbang kepada pertambahan rekod diversiti di Malaysia.

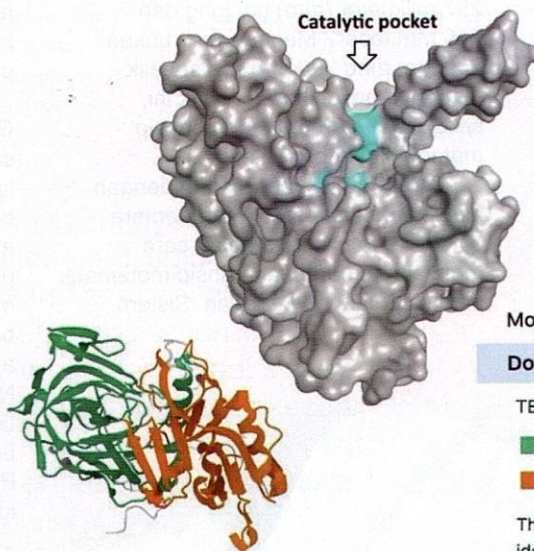
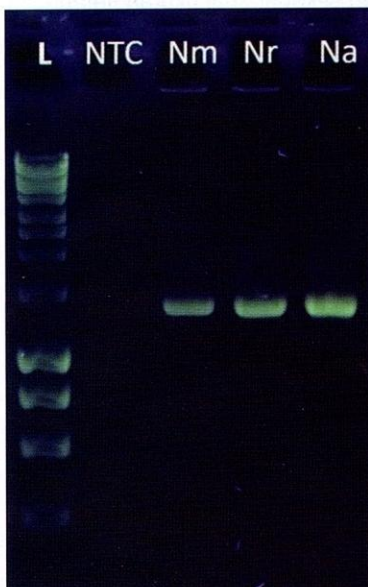
Selain itu, penentusahan hibrid semula jadi seperti *Nepenthes* × *sultan-ibrahimii* melalui barkod DNA telah menyokong usaha konservasi, manakala penemuan ciri pendarfluor hijau pada *N. benstonei* × *N. rafflesiana*



Penemuan ciri pendarfluor hijau pada bahagian bukaan periuk *N. benstonei* × *N. rafflesiana* merupakan rekod yang pertama bagi tumbuhan karnivor. Sinar hijau ini dapat dilihat apabila terdedah kepada cahaya ultraungu dalam keadaan gelap.

membuka dimensi baharu kepada pemahaman tentang interaksi ekologi tumbuhan karnivor dengan mangsa. Kajian enzim pencernaan yang sedang dijalankan pula merintis peluang untuk digunakan dalam lapangan biologi sintetik. Kesemua penemuan

ini menekankan bahawa pendekatan biologi molekul bukan sahaja memperkukuh pengetahuan berkaitan dengan kepelbagaian *Nepenthes*, tetapi juga memacu pengembangan pengetahuan dan aplikasi bioteknologi dalam kajian tumbuhan karnivor.④



Model Confidence

Domains (2)

TED

Domain 1

Domain 2

The Encyclopedia of Domains (TED) identifies and classifies structural

Rajah 3 Pemencilan gen enzim daripada *Nepenthes* untuk penjujukan (kiri) dan analisis struktur 3D enzim *Nepenthes* dengan menggunakan perisian bioinformatik I-TASSER dan AlphaFold (kanan).