

เมแทบอลิต์เฉพาะทางของพืช

เมแทบอลิต์เฉพาะทางหรือ *specialized metabolites* เดิมเรียกว่า secondary metabolites ไม่ได้ทำหน้าที่พื้นฐานร่วมกันในพืชทุกชนิดเหมือนน้ำตาล กรดอะมิโน หรือกรดไขมัน แต่ช่วยให้พืชปรับตัวต่อสิ่งแวดล้อม ป้องกันศัตรู สื่อสารกับสิ่งมีชีวิตอื่น ดึงดูดผู้ผสมเกสร และเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างพืช

หน้าที่ทางชีวภาพและนิเวศวิทยาของเมแทบอลิต์เฉพาะทาง

พืชไม่สามารถเคลื่อนหนีศัตรูได้ จึงสร้างระบบป้องกันทั้งในรูปของโปรตีนพืช เช่น lectin, protease inhibitor และ amylase inhibitor รวมถึงสารเคมี เช่น cyanogenic glycosides, glucosinolates, alkaloids, isoprenoids และ phenylpropanoids

การตอบสนองต่อเชื้อโรคและสัตว์กินพืช

พืชตรวจจับโมเลกุลอันตรายจากเชื้อโรค สัตว์กินพืช ไล่เตือนฝอย หรือเซลล์พืชที่เสียหาย ได้แก่ PAMPs/MAMPs, HAMPs, NAMPs และ DAMPs ผ่านตัวรับบนเยื่อหุ้มเซลล์ เช่น receptor-like kinases จากนั้นกระตุ้นสัญญาณภายในเซลล์ ได้แก่

- การเพิ่ม Ca^{2+} ในไซโทซอล
- การทำงานของ MAP kinase
- การสร้าง ROS เช่น superoxide และ H_2O_2
- การสร้าง nitric oxide
- การส่งสัญญาณด้วย salicylic acid, jasmonic acid และ ethylene

Salicylic acid มีบทบาทเด่นต่อเชื้อที่อาศัยเซลล์มีชีวิต ส่วน jasmonic acid และ ethylene เกี่ยวข้องกับการป้องกันแมลงและเชื้อก่อโรคแบบ necrotroph

Phytoalexins คือสารต้านจุลชีพที่พืชสังเคราะห์ขึ้นใหม่เมื่อถูกโจมตี เช่น camalexin, pisatin และ glyceollin ขณะที่ **phytoanticipins** เป็นสารหรือสารตั้งต้นที่สะสมไว้มาก่อน และถูกกระตุ้นให้มีฤทธิ์เมื่อเนื้อเยื่อเสียหาย เช่น cyanogenic glycosides, glucosinolates, tannins และ saponins

Cyanogenic glycosides

เป็นสารไกลโคไซด์ที่เก็บอย่างปลอดภัยในแวคิวโอล ส่วนเอนไซม์ β -glucosidase อยู่คนละตำแหน่ง เมื่อเซลล์ถูกกัดหรือฉีก สารทั้งสองจึงสัมผัสกัน ทำให้เกิด cyanohydrin และสลายต่อเป็น

HCN + สารประกอบคาร์บอนิลหรือแอลดีไฮด์

HCN ยับยั้งการหายใจระดับเซลล์ ส่วนแอลดีไฮด์บางชนิดก็เป็นพิษ จึงเป็นระบบป้องกันที่มีประสิทธิภาพ ตัวอย่างได้แก่ amygdalin, dhurrin, linamarin และ lotaustralin

Glucosinolates

พบมากในพืชวงศ์กะหล่ำ เช่น กะหล่ำ มัสตาร์ด หัวไชเท้า และบรอกโคลี เมื่อเซลล์เสียหาย เอนไซม์ myrosinase หรือ thioglucosidase จะย่อย glucosinolate ให้เป็นสารระเหย เช่น **isothiocyanates** หรือ **mustard oils** ซึ่งมีกลิ่นฉุนและเป็นพิษต่อแมลงหรือเชื้อโรค ตัวอย่างสำคัญคือ sinigrin และ glucobrassicin

Alkaloids

เป็นสารที่มีไนโตรเจน มักสร้างจากกรดอะมิโนและเก็บในแวคิวโอลในรูปที่มีประจุ ตัวอย่างได้แก่

- nicotine ป้องกันแมลง
- coniine และ atropine เป็นพิษต่อสัตว์
- morphine และ quinine มีประโยชน์ทางยา
- caffeine เป็นสารกระตุ้น
- pyrrolizidine alkaloids ป้องกันสัตว์กินพืช
- paclitaxel และอนุพันธ์ของ camptothecin ใช้หรือศึกษาเพื่อรักษามะเร็ง

สารเหล่านี้อาจเป็นพิษต่อพืชเอง พืชจึงควบคุมด้วยการสร้างเฉพาะเมื่อจำเป็น ดัดแปลงให้อยู่ในรูปไม่ออกฤทธิ์ และแยกเก็บในแวคิวโอล ต่อมา ขนพืช ท่อ หรือหยดไขมัน

ความหลากหลายของไอโซพรีนอยด์

Isoprenoids หรือ terpenoids เป็นกลุ่มสารธรรมชาติขนาดใหญ่มาก พืชมีรายงานมากกว่า 80,000 ชนิด ทำหน้าที่ตั้งแต่เป็นฮอร์โมน รงควัตถุ องค์ประกอบเยื่อหุ้ม ตัวพาอิเล็กตรอน ไปจนถึงกลิ่น สารป้องกัน และยารักษาโรค

หน่วยพื้นฐานและเส้นทางสังเคราะห์

หน่วยพื้นฐานคือสารคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่

- isopentenyl pyrophosphate หรือ IPP
- dimethylallyl pyrophosphate หรือ DMAPP

พืชมีเส้นทางสร้าง IPP สองเส้นทาง

เส้นทาง	ตำแหน่ง	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์เด่น
Mevalonate pathway	ไซโทซอล	Acetyl-CoA	sesquiterpenes, triterpenes, sterols

เส้นทาง	ตำแหน่ง	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์เด่น
MEP/DOXP pathway	พลาสติด	Pyruvate + glyceraldehyde-3-phosphate	isoprene, monoterpenes, diterpenes, carotenoids และ phytol

IPP และ DMAPP เชื่อมกันโดย prenyl transferases เกิดสารตั้งต้นที่มีความยาวเพิ่มขึ้น ได้แก่

GPP (C10) → FPP (C15) → GGPP (C20)

กลุ่มสำคัญ

- **C5 hemiterpenes:** isoprene เป็นสารระเหยที่พืชปล่อยออกมา
- **C10 monoterpenes:** limonene, pinene, menthol, geraniol และ linalool ทำหน้าที่เป็นกลิ่นดึงดูดผู้ผสมเกสรหรือขับไล่แมลง
- **C15 sesquiterpenes:** capsidiol เป็น phytoalexin และ artemisinin เป็นสารต้านมาลาเรีย
- **C20 diterpenes:** gibberellins เป็นฮอร์โมนพืช และ phytol เป็นส่วนของ chlorophyll
- **C30 triterpenes:** squalene, sterols และ saponins
- **C40 tetraterpenes:** carotenoids เป็นรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสงและสารตั้งต้นของ ABA และ strigolactones
- **Polyterpenes:** rubber
- **Polyprenols:** dolichol ทำหน้าที่เป็นตัวพา oligosaccharide ในการสร้าง N-glycoprotein

การเติมหมู่ prenyl ให้โปรตีนยังช่วยให้โปรตีนมีสมบัติละลายในไขมันและยึดติดกับเยื่อหุ้มเซลล์ได้

การสร้าง isoprenoids ถูกควบคุมทั้งตามอวัยวะ ชนิดเซลล์ ออร์แกเนลล์ และระดับการถอดรหัส เมื่อเกิดบาดแผลหรือติดเชื้อพืชสามารถเปลี่ยนทรัพยากรจากการสร้าง sterols เพื่อการเจริญ ไปสู่การสร้าง phytoalexins เพื่อการป้องกันได้

Phenylpropanoids และองค์ประกอบผนังเซลล์

Phenylpropanoids มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นวง phenyl เชื่อมกับสายคาร์บอน 3 อะตอม หรือ C6–C3 มีหน้าที่หลากหลาย เช่น เป็นสารต้านจุลชีพ รงควัตถุ สารป้องกัน UV สัญญาณในการอยู่ร่วมกับไรโซเบียม และวัสดุเสริมความแข็งแรงของผนังเซลล์

ขั้นตอนเริ่มต้นของเส้นทาง

Phenylalanine ที่มาจาก shikimate pathway ถูกเปลี่ยนโดยเอนไซม์ **phenylalanine ammonia lyase** หรือ PAL เป็น trans-cinnamic acid

จากนั้น cytochrome P450 monooxygenases เติมหมู่ -OH และ O-methyltransferases เติมหมู่เมทิล เกิดสารสำคัญ เช่น

- p-coumaric acid
- ferulic acid
- sinapic acid
- salicylic acid
- coumarins และ vanillin

PAL เป็นจุดควบคุมสำคัญและถูกกระตุ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพืชติดเชื้อหรือเกิดบาดแผล

Lignans และ lignin

p-Coumaric, ferulic และ sinapic acids ถูกรีดิวซ์เป็น monolignols ได้แก่

- p-coumaryl alcohol
- coniferyl alcohol
- sinapyl alcohol

การรวม monolignols สองโมเลกุลให้ lignans ซึ่งหลายชนิดมีฤทธิ์ต้านจุลชีพหรือมีประโยชน์ทางยา ส่วนการพอลิเมอไรซ์ด้วยอนุมูลอิสระผ่าน laccase และ peroxidase ทำให้เกิด lignin

Lignin เชื่อมกับ cellulose ทำให้ผนังเซลล์แข็งแรง รองรับต่อลำเลียง ลดการย่อยโดยสัตว์กินพืช และขัดขวางการแทรกซึมของเชื้อโรค เปรียบได้กับคอนกรีตที่หุ้มเส้นใยเหล็กซึ่งแทนด้วย cellulose

Suberin และ cutin

Suberin ประกอบด้วย phenylpropanoids ร่วมกับกรดไขมันสายยาว fatty alcohols และ hydroxy fatty acids พบใน Casparian strip และเนื้อเยื่อคอร์ก ทำหน้าที่เป็นกำแพงกันน้ำ ก๊าซ ความร้อน และเชื้อโรค

Cutin เป็นพอลิเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เคลือบผิวส่วนเหนือดินร่วมกับ wax เกิดเป็น cuticle ลดการสูญเสียน้ำและช่วยให้พืชปรับตัวขึ้นอาศัยบนบก

Flavonoids และ stilbenes

p-Coumaroyl-CoA รวมกับ malonyl-CoA 3 โมเลกุลผ่าน **chalcone synthase** เกิด chalcone ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของ flavones, flavonols, isoflavones และ anthocyanins

ในอีกเส้นทางหนึ่ง stilbene synthase สร้าง stilbenes เช่น **resveratrol** และ viniferin ซึ่งทำหน้าที่เป็น phytoalexins และสารต้านเชื้อรา

Flavonoids มีบทบาทสำคัญ ได้แก่

- ดูดกลืนรังสี UV และป้องกันเนื้อเยื่อ
- เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ
- เป็นสารป้องกันเชื้อโรคและสัตว์กินพืช
- ควบคุมการขนส่ง auxin
- ดึงดูดและกระตุ้น rhizobia ให้สร้างปมราก
- isoflavones บางชนิดมีฤทธิ์คล้าย estrogen

Anthocyanins เป็นไกลโคไซด์ที่สะสมในแวคิวโอล ให้สีแดง ม่วง และน้ำเงินแก่ดอกและผล สีเปลี่ยนได้ตาม pH ชนิดของหมู่แทนที่ และการจับกับโลหะ จึงทำหน้าที่ทั้งดึงดูดผู้ผสมเกสรและป้องกันแสงที่มากเกินไป

Tannins

Tannins แบ่งเป็น condensed tannins ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของ flavonoids และ hydrolyzable tannins ซึ่งประกอบด้วย gallic acid สารเหล่านี้จับกับโปรตีนอย่างแน่น ทำให้อาหารย่อยยาก มีรสฝาด และลดการทำงานของเอนไซม์ในระบบย่อยอาหารของสัตว์ จึงช่วยป้องกันสัตว์กินพืชและจุลชีพ

เมแทบอลิต์เฉพาะทางไม่ได้เป็นเพียง “ผลิตภัณฑ์รอง” แต่เป็นระบบสำคัญที่ทำให้พืชอยู่รอด สืบพันธุ์ ป้องกันตัว และปรับตัวต่อระบบนิเวศได้สำเร็จ