การใช้ประโยชน์เชื้อราทางด้านการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมทางชีวภาพ
Utilization of Fungi for Bioremediation Propose

วิไลลักษณ์ โคมพันธุ์[1]* และ วราภรณ์ ฉุยฉาย[2]

[1,2]อาจารย์ สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์
จังหวัดนครสวรรค์ 60000

บทคัดย่อ

เชื้อราเป็นสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทสำคัญในฐานะผู้ย่อยสลายของระบบนิเวศ มีการดำรงชีวิตได้หลากหลาย ทั้งอยู่เป็นอิสระ ดำรงชีวิตแบบปรสิต และราเอนโดไฟต์ เชื้อราส่วนใหญ่จะมีการดำรงชีวิตแบบการย่อยสลายและดูดซึมสารอาหารจากซากของสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้ว จากการดำรงชีวิตที่หลากหลายของเชื้อรา ทำให้มีการนำเชื้อราไปใช้ประโยชน์ได้มากมาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การแพทย์ และสิ่งแวดล้อม ทั้งนี้ ทางด้านการฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมทางชีวภาพ พบว่า เชื้อราสามารถกำจัดสารพิษออกจากสิ่งแวดล้อมได้หลายชนิดทั้งสารประกอบโพลีไซคลิก อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีน สีย้อม และโลหะหนัก กลไกที่เชื้อราใช้ในการบำบัดมีทั้งการดูดซับไว้กับโครงสร้างของผนังเซลล์และการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ที่หลั่งออกมานอกเซลล์

Abstract

Fungi are the important decomposer in ecosystem. They inhabit in environments as parasites, saprophytes and endophytes. Most of fungi are saprophytes. With these several livings, fungi can be utilized with several proposes, such as industrial,agricultural, medical and environmental proposes. In bioremediation, it is found that fungi could clean up the contaminated environments. Fungi could remove many types of pollutants including polycyclic aromatic hydrocarbons, organochlorine pesticides, dyes, and heavy metals. Fungal mechanisms include both cell wall absorbtion and biodegradation with extracellular enzymes.

คำสำคัญ : การย่อยสลายทางชีวภาพ การฟื้นฟูสภาพแวดล้อมทางชีวภาพ รา
Keywords : Biodegradation, Bioremediation, Fungi

* *ผู้นิพนธ์ประสานงานไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ wililuck_12@hotmail.com โทร. 089-564-2606*

1. บทนำ

เชื้อราเป็นสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งที่ไม่สามารถสร้างอาหารได้เอง แต่ต้องอาศัยอาหารจากแหล่งอื่น ด้วยวิธีการย่อยสลายและดูดซึม ดังนั้น เชื้อราจึงมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในธรรมชาติ โดยเฉพาะการเป็นผู้ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุต่าง ๆ เพื่อให้เกิดการหมุนเวียนแร่ธาตุและสารอาหารต่าง ๆ ในระบบนิเวศ เชื้อราสามารถพบได้ทั่วไปในดิน น้ำ หรือบนพืช เป็นต้น (สมจิตร, 2552)

การดำรงชีวิตของเชื้อราในสิ่งแวดล้อมมีทั้งที่ดำรงชีวิตแบบปรสิต (Parasite) บางชนิดอาศัยรวมกับสิ่งมีชีวิตอื่นในแบบได้ประโยชน์ร่วมกัน เช่น ไลเคนส์ (Lichens) ไมคอร์ไรซา (Mycorrhiza) และราเอนโดไฟต์ (Endophytic fungi) เชื้อราส่วนใหญ่จะมีการดำรงชีวิตแบบการย่อยสลายและดูดซึมสารอาหารจากซากของสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้ว (Saprophytism) จากการดำรงชีวิตที่หลากหลายของเชื้อรานี้ ทำให้มีการนำเชื้อราไปใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การแพทย์ และสิ่งแวดล้อม (สมจิตร, 2552)

ในบทความนี้ จะกล่าวถึงการใช้ประโยชน์เชื้อราทางด้านการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมทางชีวภาพ โดยเฉพาะการใช้เชื้อราเพื่อการย่อยสลายสารพิษที่ย่อยสลายยาก เช่น สารประกอบโพลีไซคลิก อะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (PAHs) สารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีน และอื่น ๆ เพื่อเป็นแนวคิดในการนำเชื้อราไปใช้ประโยชน์ทางด้านการบำบัดและฟื้นฟูสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. ลักษณะของเชื้อรา

เชื้อรา ประกอบด้วย เซลล์หลายเซลล์เรียงต่อกันจนเกิดเป็นเส้นใย (Hypha) สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ เส้นใยแบบไม่มีผนังกั้น (Non-septate hypha) พบในเชื้อรากลุ่มโอโอไมสีท (Oomycetes) ไซโกไมสีท (Zygomycetes) เป็นต้น ส่วนเส้นใยแบบมีผนังกั้น (Septate hypha) พบในเชื้อรากลุ่มแอสโคไมสีท (Ascomycetes) บาสิดิโอไมสีท (Basidiomycetes) เป็นต้น (สมจิตร, 2552) เส้นใยของเชื้อราจะรวมกันเป็นกลุ่มเรียกว่า ไมซีเลียม (Mycelium) (วิจัย, 2546) ปกติเส้นใยมีการเจริญบริเวณส่วนปลายเส้นใย ซึ่งทำให้เส้นใยมีลักษณะที่ยืดยาว และมีการแตกแขนง ตลอดจนบริเวณผนังของส่วนปลายเส้นใยก็ยังใช้ในการดูดซึมอาหารอีกด้วย

ส่วนใหญ่เส้นใยของเชื้อรามักจะไม่มีสี แต่บางชนิดอาจจะมีสีดำ เส้นใยของเชื้อราถ้าเจริญอยู่บนอาหารเลี้ยงเชื้อมักมีลักษณะเป็นใยคล้ายลำลี นอกจากนี้ เส้นใยยังเป็นส่วนที่ใช้ดูดซึมอาหารจากภายนอกเข้าสู่เชื้อรา โดยผนังเซลล์ของเส้นใย ประกอบด้วย สารจำพวกไคติน และอาจจะมี โปรตีน กลูแคน และโพลีแซ็กคาไรด์อื่น ๆ เช่น เซลลูโลสรวมอยู่ด้วย ขึ้นอยู่กับชนิดของเชื้อรา (วิจัย, 2546) การสืบพันธุ์มีการสร้างสปอร์ 2 แบบ คือ แบบไม่อาศัยเพศจัดเป็นการสร้างสปอร์ที่เกิดจากการหลุดออกเป็นท่อนของเส้นใย ได้แก่ โคนิดิโอ สปอร์ (Conidiospore) หรือ โคนิเดีย (Conidia), สปอร์แอนจิโอสปอร์ (Sporangiospore) ส่วนแบบอาศัยเพศ ได้แก่ โอโอสปอร์ (Sospore), ไซโกสปอร์ (Zygospore), แอสโคสปอร์ (Ascospore) และบาสิดิโอสปอร์ (Basidiospore) เป็นต้น (บุษกร, 2545)

เชื้อราส่วนใหญ่ดำรงชีวิตแบบย่อยสลายและดูดซึมสารอาหารจากซากของสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้ว โดยสร้างเอนไซม์แล้วปลดปล่อยออกภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง เพื่อที่จะดูดซึมเข้าสู่เซลล์หรือเส้นใย และนำไปใช้ใน

กระบวนการต่าง ๆ ภายในเซลล์ ตัวอย่างสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลาย เช่น แป้ง เซลลูโลส โปรตีน ไคติน เคอราติน เป็นต้น (Deacon, 2006) การย่อยสลายโมเลกุลของสารอินทรีย์นี้ทำให้มีการปลดปล่อยแร่ธาตุกลับคืนสู่ธรรมชาติและอยู่ในรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตได้ ดังนั้น จึงถือได้ว่าเชื้อรามีบทบาทสำคัญอย่างมากในระบบนิเวศ โดยเป็นผู้ย่อยสลายซากอินทรีย์วัตถุที่สำคัญ ทั้งนี้ เชื้อราที่พบโดยทั่วไปแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้เป็น 4 กลุ่มด้วยกัน คือ

เชื้อรากลุ่มไซโกไมสีท มีลักษณะสำคัญ คือ เส้นใยไม่มีผนังกั้น ภายในเส้นใยจะมีนิวเคลียสกระจายอยู่ทั่วเส้นใย ผนังเซลล์ของเส้นใยเป็นสารพวกไคติน การสืบพันธุ์มีทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ ซึ่งการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศเป็นการสร้างสปอร์ที่เรียกว่าสปอร์แอนจิโอสปอร์ ส่วนการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศมีสร้างสปอร์ที่เรียกว่า ไซโกสปอร์ พบได้ทั่วไปในดิน และมักจะดำรงชีวิตแบบเป็นผู้ย่อยสลาย ตัวอย่างเชื้อราที่รู้จักกันดี เช่น *Rhizopus, Rhizomucor* เป็นต้น

เชื้อรากลุ่มบาสิดิโอไมสีท มีลักษณะสำคัญ คือ เส้นใยมีผนังกั้น แต่ผนังกั้นจะมีลักษณะที่เป็นรูพรุน และแต่เซลล์ของเส้นใยมีนิวเคลียส 2 อัน ผนังเซลล์ของเส้นใยส่วนใหญ่ ประกอบด้วย ไคติน และกลูแคน การสืบพันธุ์มีทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ ซึ่งถ้าเป็นการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศมีการสร้างโคนิดิโอสปอร์เกิดขึ้น ส่วนการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศมีการสร้างบาสิดิโอสปอร์ (วิจัย, 2546) เชื้อราในกลุ่มนี้มีการดำรงชีวิตทั้งแบบย่อยสลายซากสิ่งมีชีวิตปรสิต และดำรงชีวิตรวมกับสิ่งมีชีวิตอื่นในแบบได้ประโยชน์ร่วมกัน ตัวอย่างเชื้อราในกลุ่มนี้ที่มีความสำคัญและรู้จักกันดี คือ เห็ด (สมจิตร, 2552)

เชื้อรากลุ่มแอสโคไมสีท มีลักษณะสำคัญ คือ เส้นใยมีผนังกั้นตามขวาง ผนังเซลล์ของเส้นใยเป็นสารพวกไคติน และสารประกอบอีกหลายชนิด เช่น โปรตีน น้ำตาลแมนโนส และน้ำตาลกลูโคส เป็นต้น การสืบพันธุ์มีทั้งแบบอาศัยเพศและไม่อาศัยเพศ ซึ่งการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ มีการสร้างโคนิดิโอสปอร์บริเวณส่วนปลายของเส้นใย บางชนิดที่มีลักษณะเป็นเซลล์เดี่ยวสืบพันธุ์ด้วยวิธีการแตกหน่อ เช่น ยีสต์ (Yeast) ส่วนการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศมีการสร้างแอสโค-สปอร์ที่มีลักษณะคล้ายถุง (สมจิตร, 2552) พบได้ทั่วไปในดิน น้ำจืด และน้ำเค็ม มักจะดำรงชีวิตเป็นผู้ย่อยสลาย ตัวอย่างเชื้อรากลุ่มนี้ที่รู้จักกันดี เช่น *Saccharomyces cerevisiae, Monascus* sp. เป็นต้น (วิจัย, 2546)

เชื้อรากลุ่มโอโอไมสีท มีลักษณะสำคัญ คือ มีรูปร่างที่แตกต่างกันออกไป ตั้งแต่เป็นเซลล์เดียวจนถึงเป็นเส้นใยที่แตกกิ่งก้านมากมาย เส้นใยไม่มีผนังกั้น ผนังเซลล์ของเส้นใยต่างไปจากรากลุ่มอื่น ๆ คือ ไม่มีไคตินเป็นองค์ประกอบแต่ประกอบด้วย เซลลูโลส และกลูแคน การสืบพันธุ์มีทั้งแบบไม่อาศัยเพศและอาศัยเพศการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศมีการสร้างสปอร์ที่เรียกว่า แอนจิโอ-สปอร์ ส่วนการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศมีการสร้างสปอร์ที่เรียกว่า โอโอสปอร์ พบได้ทั่วไปทั้งในน้ำ ดิน หรือเป็นปรสิตกับพืช ตัวอย่างเชื้อราที่รู้จักกันดี เช่น *Aphanomyces* เป็นต้น (วิจัย, 2546)

3. บทบาทของเชื้อราในการย่อยสลายสารมลพิษ

3.1 สารประกอบโพลีไซคลิกอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs)

เชื้อราที่ย่อยสลาย PAHs มีหลายกลุ่ม ได้แก่ ไซโกไมสีท (เช่น *Cunninghamella*

elegans) แอสโคไมสีท (เช่น *Aspergillus niger*) บาสิดิโอไมสีทแบบ white rot (เช่น *Phanerochaete chrysosporium*) และบาสิดิโอไมสีทแบบ brown rot (เช่น *Lentinus lepideus*) โดยทั่วไป เชื้อราไม่ได้ใช้ PAHs เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงาน รากลุ่มที่ไม่ใช่บาสิดิโอไมสีทจะเพียงแต่เปลี่ยนรูป (Transformation) แต่ไม่ได้ย่อยสลาย PAHs อย่างสมบูรณ์จนได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำบาสิดิโอไมสีท แบบ white rot บางชนิดสามารถตัดวงอะโรมาติกและย่อยสลาย PAHs ให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำได้แต่การย่อยสลายให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำของราไม่ได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเท่ากับแบคทีเรีย (Cerniglia, 1997) การเติมเชื้อราเพิ่มการย่อยสลาย PAHs ในดินได้ ดังเช่น การทดลองของ Andersson และคณะ (2000) ที่แสดงให้เห็นว่าการเติม *Pleurotus ortreatus* and *Phanerochaete chrysoporium,* เพิ่มการย่อยสลาย PAH ในดินที่นึ่งฆ่าเชื้อแล้ว แต่จะพบเมแทบอไลท์ที่ย่อยสลายต่อไปไม่ได้เกิดขึ้น การเติม *Irpex lacteus* และ *Pleurotus ostreatus,* เพิ่มการย่อยสลาย PAHs ในดินที่ปนเปื้อนเช่นกัน การเติมสารลดแรงตึงผิว เช่น Tween 20 เพิ่มการย่อยสลาย PAHs ได้แต่ชนิดของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้กระตุ้นการย่อยสลาย PAHs ได้ดีนั้นขึ้นกับชนิดของดินมากกว่าชนิดของเชื้อรา (Leonardi et al., 2007)

ระบบเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของ PAHs โดยเชื้อรามีหลายชนิด ทั้งเอนไซม์ภายในเซลล์ เช่น ไซโตโครม พี-450 โมโนออกซิจีเนส (Cytochrome P-450 monooxygenase) และเอนไซม์ที่ถูกหลั่งออกมาภายนอกเซลล์ เช่น ลิกนิน เปอร์รอกซิเดส (Lignin peroxidase; LiP), แมงกานีส เปอร์รอกซิเดส (Manganese peroxidase; MnP) และแลกเคส (Laccase) โดยเชื้อรากลุ่ม White rot จะออกซิไดส์ PAHs ด้วย LiP ให้เป็นควิโนน (Quinones) ราหลายชนิดใช้ไซโตโครม พี-450 โมโนออกซิจีเนสออกซิไดส์ PAHs ไปเป็น arene oxides จากนั้นจึงเปลี่ยนรูปไปเป็น *trans*-dihydrodiols (Olson et al., 2003) การย่อยสลายในหลอดทดลองของ LiP MnP และแลกเคสจาก *Nematoloma frowardii* แสดงให้เห็นว่า LiP เปลี่ยนรูปแอนทราซีน 58.6% ไพรีน 34.2% แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับฟีแนนทรีนและฟลูโอแรนทีน MnP เปลี่ยนรูปฟีแนนทรีน 30% ฟลูโอแรนทีน 25% เมื่อมีกลูตาไทโอนในรูปรีดิวซ์ และจะเพิ่มการเปลี่ยนรูปแอนทราซีนจาก 30% เป็น 100% และเพิ่มการเปลี่ยนรูปไพรีนจาก 10% เป็น 60% เมื่อมีกลูตาไทโอนในรูปรีดิวซ์ แลกเคสจะทำปฏิกิริยากับ PAHs ได้เมื่อมี 2,2-azinobis- 3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonate (ABTS) เท่านั้น เอนไซม์ทุกชนิดดังกล่าวจะเปลี่ยนรูปอนุพันธ์ของ PAHs ในรูป hydroxylated PAH ได้ดีมาก แต่แทบจะทำปฏิกิริยากับอนุพันธ์ในรูป PAH-quinone ไม่ได้เลย (Gnther et al., 1998) ดังนั้น การผลิตสารตัวกลางในรูปไฮโดรซีเลทจึงเป็นขั้นตอนสำคัญในการย่อยสลาย PAHs โดยเชื้อรา

เมแทบอไลท์ของเชื้อราที่ได้จากการย่อยสลายฟีแนนทรีน โดยทั่วไปจะเป็นอนุพันธ์ชนิด monohydroxy เช่น 3-hydroxyphenanthrene, 4-hydroxyphenanthrene, หรือ 9-hydroxy phenanthrene สารเหล่านี้อาจจะจับกับกลูโคซิลซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีขั้วมากขึ้น *Phanerochaete chrysosporium* สามารถออกซิไดส์ฟีแนนทรีน และ phenanthrene-9, 10-quinone ไปเป็น 2,2-diphenic acid ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกวง (Müncenerová & Augustin, 1994)

เชื้อราสามารถผลิตเมแทบอไลท์ที่ละลายน้ำได้ดีของ PAHs มวลโมเลกุลสูง ซึ่งอาจจะถูกย่อยสลายต่อไปด้วยแบคทีเรียในบริเวณนั้นได้การทำงานร่วมกันของเชื้อราและแบคทีเรียที่ย่อยสลาย PAHs จะเพิ่มการย่อยสลาย PAHs มวลโมเลกุลสูง (Jacques et al., 2007; Li et al., 2007) ในการศึกษาบทบาทของเชื้อราและแบคทีเรียในดินต่อการย่อยสลายแอนทราซีน พบว่า แบคทีเรียเป็นสิ่งมีชีวิตที่ทำหน้าที่หลักในการย่อยสลายโดยไม่เกิดการย่อยสลาย PAHs อย่างสมบูรณ์ เมื่อเติม เตตราไซคลิน แอมพลิซิลิน และสเตรปโตไมซิน ซึ่งยับยั้งกิจกรรมของแบคทีเรียในดิน (Kastner et al., 1999) บทบาทของเชื้อรามีความสำคัญรองลงมาในการย่อยสลาย PAHs โดยเมื่อกิจกรรมของเชื้อราในดินถูกยับยั้งด้วยยาปฏิชีวนะที่ฆ่าเชื้อรา การย่อยสลาย PAHs อย่างสมบูรณ์ลดลงและเพิ่มการยึดเกาะกับอนุภาคดินมากขึ้น (Kastner et al., 1999) เมแทบอลิซึมของเชื้อราจะเพิ่มการยึดเกาะกับฮิวมัสและอนุภาคต่าง ๆ ของดิน กระบวนการนี้จัดได้ว่าเป็นกระบวนการลดพิษชนิดหนึ่ง (Cerniglia, 1997)

3.2 สารประกอบกลุ่มออร์กาโนคลอรีน (Organochlorine)

เชื้อราที่สามารถย่อยสลายลิกนินได้ เช่น *Phanerochaete chrysosporium* และ *Trametes hirsutus* สามารถย่อยสลายลินเดน (Lindane) ซึ่งเป็นสารกำจัดศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนชนิดหนึ่งได้โดยสภาวะที่เอนไซม์ย่อยสลายลินเดนได้ดีนั้นเป็นสภาวะเดียวกับสภาวะที่เอนไซม์ย่อยสลายลิกนินได้ดี (Phillips et al., 2005) นอกจากนั้น พบว่า เชื้อราในสกุล *Trametes* ที่คัดแยกได้จากดอกเห็ดสามารถย่อยสลายเอนโดซัลแฟน (Endosulfan) ซึ่งเป็นสารกำจัดแมลงศัตรูพืชกลุ่มออร์กาโนคลอรีนที่มีความเป็นพิษและมีความคงทนสูงในสิ่งแวดล้อมให้มีความเป็นพิษ และคงทนในสิ่งแวดล้อมน้อยลง (จิตตรา, 2550) การคัดแยกเชื้อราจากดินที่ปนเปื้อนเอนโดซัลแฟนจากการเกษตรกรรมจะพบเชื้อราที่ย่อยสลายเอนโดซัลแฟนเช่นกัน ตัวอย่างของเชื้อราที่คัดแยกได้และสามารถย่อยสลายเอนโดซัลแฟนได้ ได้แก่ *Chaetosartorya stromatoides, Aspergillus terricola* และ *A. terreus* (Hussain et al., 2007)

3.3 สีย้อม

การบำบัดสีย้อมของเชื้อราเกิดขึ้นได้สองแบบ คือ การย่อยสลายทางชีวภาพใช้เอนไซม์ที่หลั่งออกนอกเซลล์เช่นเดียวกับเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสลาย PAHs คือ แลกเคส LiP และ MnP (Vijaykumar et al., 2006) เชื้อราที่ใช้ในการย่อยสลายสีย้อมส่วนใหญ่เป็นเชื้อรากลุ่มบาสิดิโอไมสีท เพราะเป็นกลุ่มที่มีการสร้างเอนไซม์สำหรับย่อยสลายลิกนิน ที่มีความจำเพาะต่ำ โดยเฉพาะเปอร์รอกซิเดสและแลกเคส แต่เอนไซม์ที่ใช้ในการกำจัดสีย้อมได้ดีที่สุด คือ แลกเคส เพราะเป็นเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นมาเป็นจำนวนมาก ผลิตได้สม่ำเสมอ และต้องการสภาวะเฉพาะในการกระตุ้นน้อยกว่า LiP และ MnP (Anastasi et al., 2009)

อีกกลไกหนึ่งในกำจัดสีย้อมของเชื้อรา คือ การดูดซับทางชีวภาพซึ่งนิยมใช้เชื้อรากลุ่มไซโกไมสีท เช่น *Cunninghemella* spp., *Rhizomucor* spp., และ *Rhizopus* spp. ซึ่งให้ผลที่ดี ส่วนรากลุ่มแอสโคไมสีทในระยะ telomorphic และ anamorphic สามารถดูดซับสีย้อมได้ แต่พบเชื้อราที่มีความสามารถเช่นนี้น้อยชนิด (Anastasi et al., 2009) การดูดซับทางชีวภาพอาจประกอบ

ด้วยกลไกต่าง ๆ มากมายทั้งการดูดซับไว้ที่ผนังเซลล์โดยไม่ใช้พลังงาน หรือการดูดซับทางชีวภาพที่มีความเกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของเซลล์ เช่น การแลกเปลี่ยนไอออน การเกิดสารเชิงซ้อน การจับด้วยคีเลต และการตกตะกอนภายในเซลล์ (Anastasi et al., 2009) ซึ่งจะต้องศึกษาในรายละเอียดต่อไป

3.4 โลหะหนัก

กลไกที่สำคัญของเชื้อราในการกำจัดโลหะหนักออกจากสิ่งแวดล้อม คือ การสะสมไว้ภายในเซลล์ ซึ่งไมซีเลียมของเชื้อราสามารถสะสมธาตุได้ทุกชนิดรวมทั้งโลหะหนัก โดยเฉพาะใน sporocarp และสะสมได้สูงกว่าความเข้มข้นในบริเวณที่เชื้อราเจริญอยู่ องค์ประกอบที่เป็นโพลี-แซคคาไรด์ของเห็ด เช่น ไคติน มีคุณสมบัติในการจับโลหะหนักด้วยหมู่ฟังก์ชัน เช่น หมู่ฟอสเฟต หมู่คาร์บอกซิล หมู่เอมีน โลหะหนักเหล่านี้ถูกขนส่งเข้าไปภายในเซลล์อย่างรวดเร็ว และจะสะสมในไมซีเลียม (Campos et al., 2009) ความสามารถในการสะสมโลหะหนักของเชื้อราขึ้นกับลักษณะทางพันธุกรรมด้วย โดยการปรากฏของโปรตีนเฉพาะและสารชีวโมเลกุลบางตัวจะเกี่ยวข้องกับการรับส่งโลหะหนักภายในเซลล์ของเชื้อรา (Campos et al., 2009)

4. สรุป

4.1 สรุปและข้อเสนอแนะ

เชื้อราจัดเป็นสิ่งมีชีวิตที่น่าสนใจในการนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านการฟื้นฟูสภาพแวดล้อม เพราะสามารถใช้ฟื้นฟูสารมลพิษได้หลากหลาย และยังต้องการการศึกษาวิจัยในรายละเอียดต่อไป ข้อเสียของการย่อยสลายด้วยเชื้อรา คือ การย่อยสลายด้วยเชื้อราเป็นการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ที่ไม่จำเพาะ โดยเฉพาะในกรณีการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสลายลิกนิน ทำให้การย่อยสลายที่เกิดขึ้นไม่สมบูรณ์ กล่าวคือ ไม่เกิดการย่อยสลายจนได้น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย แต่อาจจะเกิดเมแทบอไลท์ที่เป็นพิษมากขึ้นตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้ ในขณะที่การใช้กลไกในการดูดซับจำเป็นที่จะต้องหากระบวนการมารองรับการกำจัดสารมลพิษที่เชื้อราดูดซับออกจากสิ่งแวดล้อมได้ต่อไป

วิธีการหนึ่งที่นำมาใช้ในการแก้ปัญหาและลดข้อเสียของการกำจัดสารมลพิษดังกล่าวของเชื้อรา คือ การใช้เชื้อราร่วมกับสิ่งมีชีวิตอื่น เช่น การใช้เชื้อราร่วมกับแบคทีเรียในการย่อยสลายสารประกอบกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดร-คาร์บอน (Arun et al., 2008) หรือการใช้เชื้อราไมคอไรซาที่อยู่ร่วมกับรากพืช (Joner et al., 2001; 2006) ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพของการย่อยสลายและการฟื้นฟูสภาพสิ่งแวดล้อมดีขึ้น เช่น การเติมเชื้อรา *Suillus bouinus* ในไรโซ-สเฟียร์ของ *Pinus sylrestris* ที่ปลูกในดินปนเปื้อน PAHs พบว่า การย่อยสลาย PAHs เกิดในไรโซสเฟียร์มากกว่าดินรอบนอกไรโซสเฟียร์ (Joner et al., 2006)

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศที่อยู่ในเขตร้อนและมีความหลากหลายทางด้านชีวภาพของสิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ สูงรวมทั้งเชื้อราด้วย แต่การคัดแยกเชื้อราในท้องถิ่นที่มีความสามารถในการกำจัดสารมลพิษและนำมาฟื้นฟูสภาพแวดล้อมในประเทศไทยที่เกิดการปนเปื้อนจริงยังค่อนข้างจำกัด ดังนั้น การศึกษาทางด้านการฟื้นฟูสภาพทางชีวภาพด้วยเชื้อราท้องถิ่นจึงเป็นหัวข้อที่ควรส่งเสริมให้ทำวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ และเป็นการฟื้นฟูสภาพแวดล้อมอย่างยั่งยืนต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

จิตตรา เพียภูเขียว. 2550. **การย่อยสลายทางชีวภาพของเอ็นโดซัลแฟนโดยรา** เข้าถึงได้จาก http://www.research.chula.ac.th/abstract/libraly/sci18.pdf สืบค้นวันที่ 8 กันยายน 2553.

บุษกร อุตรภิชาติ. 2545. **จุลชีววิทยาทางอาหาร.** หาดใหญ่: มหาวิทยาลัยทักษิณ.

วิจัย รักวิทยาศาสตร์. 2546. **ราวิทยาเบื้องต้น.** กรุงเทพฯ: จามจุรีโปรดักท์.

สมจิตร อยู่เป็นสุข. 2552. **ราวิทยา.** เชียงใหม่: พงษ์สวัสดิ์การพิมพ์.

Anastasi, A., Prigione, V., Casieri, L., & Varese, G.C. 2009. **Decolourisation of model and industrial dyes by mitosporic fungi in different culture condition.** World Journal of Microbiology and Biotechnology. 25: 1363-1374.

Andersson, B.E., Welinder, L., Olsson, P.A., Olsson, S., & Henrysson, T. 2000. **Growth of inoculated white-rot fungi and their interactions with the bacterial community in soil contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons, as measured by phospholipids fatty acids.** Bioresource Technology. 73: 29-36.

Arun, A., Raja, P.P., Arthi, R., Ananthi, M., Kumar, K.S., & Eyini, M. 2008. **Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) biodegradation by basidiomycetes fungi, Pseudomonas isolate, and their coculture: Comparative in vivo and in silico approach.** Applied Biochemistry and Biotechnology. 151: 132-142.

Campos, J.A., Tejera, N.A., & Sanchez, C.J. 2009. **Substrate role in the accumulation of heavy metals in sporocarps of wild fungi.** Biometals. 22: 835-841.

Cerniglia, C.E. 1997. **Fungal metabolism of polycyclic aromatic hydrocarbons: Past, present, and future applications in bioremediation.** Journal of Industrial Microbiology. 19: 324-333.

Deacon, J.W. 2006. **Fungal Biology.** (4th ed.). Australia: Blackwell Publishing.

Gramss, G., Voigt, K., & Kirsche, B. 1999. **Degradtion of polycyclic aromatic hydrocarbons with three to seven aromatics rings by higher fungi in sterile and unsterile soils.** Biodegradation. 10: 51-62.

Günther, T., Sack, U., Hofrichter, M., & Lätz, M. 1998. **Oxidation of PAH and PAH-derivatives by fungal and plant oxidoreductases.** Journal of Basic Microbiolog, 38(2): 113-122.

Hussain, S., Arshad, M., Saleem, M., & Zahir, Z.A. 2007. **Screening of soil fungi for in vitro degradation of endosulfan.** World Journal of Microbiology and Biotechnology. 23: 939-945.

Jacques, R.J.S., Okeke, B.C., Bento, F.M., Teixeira, A.S., Peralba, M.C.R., & Camargo, F.A.O. 2007. **Microbial**

consortium bioaugmentation of a polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soil. Bioresource Technology, in press.

Joner, E.J., Briones, R., & Leyval, C. 2000. **Metal-binding capacity of arbuscular mycorrhizal mycelium.** Plant and Soil. 226: 227-234.

Joner, E.J., Johnsen, A., Loibner, A.P., Cruz, M.A.D., Szolar, O.H.J., Portal, J., & Leyval, C. 2001. **Rhizosphere effects on microbial community structure and dissipation and toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in spiked soil.** Environmental Science and Technology. 35: 2773-2777.

Joner, E.J., Leyval, C., & Colpaert, J.V. 2006. **Ectomycorhizas impede phytoremediation of polycyclic aromotic hydrocarbons (PAHs) both within and beyond the rhizosphere.** Environmental Pollution. 142: 34-38.

Kastner, M., Stereibich, S., Beyrer, M., Richnow, H.H., & Fritsche, W. 1999. **Formation of bound residuces during microbial degradation of [^{14}C] anthracene in soil.** Applied and Environmental Microbiology. 65: 1834-1842.

Leonardi, V., Šaešk, V., Petruccioli, M., D'Annibale, A., Erbanová, P., & Cajthaml, T. 2007. **Bioavailability modification and fungal biodegradation of PAHs in aged industrial soils.** International Biodeterioration and Biodegradation, in press.

Li, X., Li, P., Lin, X., Zhang, C., Li, Q, & Gong, Z. 2007. **Biodegradation of aged polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by microbial consortia in soil and slurry phases.** Journal of Hazardous Materials. in press.

Müncnerová, D., & Augustin, J. 1994. **Fungal metabolism and detoxification of polycyclic aromatic hydrocarbons: A review.** Bioresource Technology. 48: 97-106.

Olson, P.E., Reardon, K.F., & Pilon-Smits, E.A.H. 2003. Ecology of rhizosphere bioremediation. In S.C. McCutcheon & J.L. Schnoor (Eds.), **Phytoremediation: Transformation and control of contaminants** (pp. 317-354). Hoboken: Johon Wiley & Sons.

Phillips, T.M., Seech, A.G., Lee, H., Trevors, J.T. 2005. **Biodegradation of hexachlorocyclohexane (HCH) by microorganisms.** Biodegradation. 16: 363-392.

Ravelet, C., Krivobok, S., Sage, L.,& Steiman, R. 2000. **Biodegradation of pyrene by sediment fungi.** Chemosphere. 40: 557-563.

Vijaykumar, M.H., Veeranagouda, Y., Neelakanteshwar, K., & Karegoudar, T.B. 2006. **Decolorization of 1:2 metal complex dye acid blue 193 by a newly isolated fungas, *Cladosporium cladosporioides*.** World Journal of Microbiology and Biotechnology. 22: 157-162.

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพการบำบัดสารมลพิษชนิดต่าง ๆ ในดินโดยเชื้อรา

ชนิดของสาร	เชื้อราที่ใช้	ผล	อ้างอิง
แอนทราซีน 1000 มก./กก. ไครซีน 1000 มก./กก. ไดเบนโซ [a,h] แอนทราซีน 50 มก./กก.	*Suillus bouinus* (เชื้อราไมคอไรซา)	แอนทราซีน 95-98% ถูกย่อยสลายในไรโซสเฟียร์ของ *Pinus sylrestris* ภายในเวลา 16 สัปดาห์ ในขณะที่มีเพียง 50-70% ถูกย่อยสลายในดินรอบนอก ไครซีน 65-70% และไดเบนโซ [a,h] แอนทราซีน 40-60% ถูกย่อยสลายในไรโซสเฟียร์โดยไม่ถูกย่อยสลายในดินรอบนอก	Joner et al., 2006
แอนทราซีน 500 มก./กก. ไครซีน 500 มก./กก. ไดเบนโซ [a,h] แอนทราซีน 50 มก./กก.	*Glomus mosseae* BEG69	ในดินที่ปลูกหญ้าไรน์หรือ *Trifolium repens* ที่เติมเชื้อรา พบว่า แอนทราซีน ไครซีน ไดเบนโซ [a,h] แอนทราซีน ลดลงจาก 500 เป็น 10-20, 500 เป็น 250-385, 50 เป็น 34-42 มก./กก. ภายใน 8 สัปดาห์ ตามลำดับ โดยการยึดครองพื้นที่ของเชื้อราที่รากของ *T. repens* ดีกว่าหญ้าไรน์	Joner et al., 2001
PAHs ผสม	*Gymnopilus. sapineus* และ *Hypholoma fasciculare*	ราทั้งสองชนิดย่อยสลายฟีแนนทรีนได้ 100% แอนทราซีน 95.8 และ 87% ไพรีน 92.6 และ 94.7% ตามลำดับ	Gramss et al., 1999
ไพรีน	เชื้อราจากดินตะกอน	คัดแยกเชื้อราจากดินตะกอนที่ย่อยสลายไพรีนได้ พบเชื้อราที่ย่อยสลายไพรีนได้ 41 สายพันธุ์ ราที่ย่อยสลายไพรีนได้มากกว่า 2.4 มก./ก. มี 10 สายพันธุ์ โดยที่มีประสิทธิภาพสูงคือ *Mucor racemosus*	Ravalet et al., 2000
สีย้อมที่ใช้ในอุตสาหกรรม	*Aspergillus ochraceus*	เชื้อราดูดซับสีย้อมได้ 100% ภายในเวลา 150 ชั่วโมง เมื่อเลี้ยงในอาหาร EQ และ GN1	Anastasi et al., 2009
ตะกั่ว	ตัวอย่างเห็ดจากแหล่งที่ไม่มีการปนเปื้อน 3 บริเวณในคาบสมุทรไอบีเรีย	พบการสะสมตะกั่วในเห็ด โดยพบมากที่สุด คือ *Cantharellus cibarius* พบ 4.86 มก./กก รองลงมา คือ *Lactarius controversus* พบ 4.06 มก./กก.	Campos et al., 2009
แคดเมียม	*Glomus mosseae*	สะสมแคดเมียมได้ 10-15 มก./ก. ชีวมวล ภายในเวลา 60 นาทีขึ้นกับสารละลายที่ใช้เลี้ยงเซลล์	Joner et al., 2000