



การดูดซับโลหะหนักโดยใช้กากยีสต์จากโรงงานเบียร์



รพีพร คำรัตน์

๕

อภินันทนาการ

จาก

อุทิศให้แก่วัดค้อมและพระพรหมคุณาภรณ์ ม.มหิดล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

พ.ศ.2542

ISBN 974-663-302-3

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยมหิดล

Copyright by Mahidol University

วฟ
ร1467
2542
ด.3

วิทยานิพนธ์
เรื่อง
การดูดซับโลหะหนักโดยใช้กากยีสต์จากโรงงานเบียร์

นางสาว พิศาลย์ คำรัตน์

นางสาวพิพร คำรัตน์
ผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภินันท์ เอี่ยมศิริ Ph.D.
ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ขึ้นจิตต์ บุญเกิด Ph.D.
กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

ศาสตราจารย์เลียงชัย ถัมถ้อยวงศ์ Ph.D.
คณบดี
บัณฑิตวิทยาลัย

อาจารย์เรวดี โรจนกานันท์ M.Sc.
ประธานคณะกรรมการประจำหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม
คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การดูดซับโลหะหนักโดยใช้กากยีสต์จากโรงงานเบียร์

ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม

วันที่ 4 ตุลาคม 2542

นางสาว..... ดัชนี

นางสาวไพพร คำรัตน์

ผู้วิจัย

.....

ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรพินท์ เอี่ยมศิริ Ph.D.

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชชาติ บุญเจ็ด Ph.D.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

อาจารย์เพ็ญพรรณ ทะสะโฮ M.Eng.

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....

ศาสตราจารย์เลียงชัย ล้อมมวงค์ Ph.D.

คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

.....

รองศาสตราจารย์อนุชาติ พวงสำลี Ph.D.

คณบดี

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์

มหาวิทยาลัยมหิดล

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจากหลายท่าน ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ ดังนี้คือ

ดร.อรพินท์ เอี่ยมศิริ ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ดร.ชินจิตต์ บุญเจิด กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาควบคุมช่วยเหลือ และให้คำแนะนำในการทำวิจัย ตลอดจนแก้ไขเนื้อหาของงานวิจัยฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์ ข้าราชการและเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และห้อง BT111 ที่ช่วยอำนวยความสะดวกและให้คำปรึกษาในการทำการทดลอง ในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณ ดร.เสาวนีย์ ธรรมสถิตี ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้ความกรุณาในการใช้ห้องปฏิบัติการ ในการเลี้ยงยีสต์และเตรียมตัวอย่างกาบยีสต์ และขอขอบคุณพี่ดินและน้องรวมทั้งเจ้าหน้าที่ ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำการทดลองและให้คำปรึกษาในการทำการทดลอง

ขอขอบคุณ อ.เพ็ญพรรณ ทะสะโต หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และใช้ห้องปฏิบัติการเพื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักโดยเครื่องAAS และขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในขณะที่ทำการวิเคราะห์

ขอขอบคุณ บริษัทบุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณกิตติ รัตนานุกูล หัวหน้าแผนกต้ม-หมัก-เย็น ที่กรุณาอำนวยความสะดวกและจัดเก็บตัวอย่างกาบยีสต์

ขอขอบคุณ บริษัท NS Electronics Bangkok(1993) จำกัด ที่กรุณาให้ตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานก่อนการบำบัดเพื่อนำมาใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องสมุด ฝ่ายการศึกษา ฝ่ายห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ประจำคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ทุกท่าน เพื่อนปริญญโทสาขาเทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อมรุ่นที่ 21 โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณวรรณมา จินดาศรี คุณวิรัชดา แพทอง คุณสาวิตรี เอี่ยมตระกูล คุณจุลพจน์ การุณพิภคร์ สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร รุ่นที่ 9 โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสุรัช อินทสุวรรณ ที่ให้การช่วยเหลือและกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์กับผู้วิจัย

ท้ายที่สุดนี้ต้องขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ที่คอยเกื้อหนุนและเป็นกำลังใจ ขอขอบคุณพี่ๆน้องๆที่คอยเป็นกำลังใจ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งนายแพทย์ชาญศักดิ์ จึงมันคง ผู้เป็นที่รักยิ่งที่คอยเอื้ออาทร ให้กำลังใจ กำลังใจในการศึกษาจนสำเร็จในครั้งนี้

รพีพร คำรัตน์



3736432 ENTM/M : สาขาวิชา : เทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม ; วท.ม.

(เทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม)

คำสำคัญ : การดูดซับ/โลหะหนัก/กากยีสต์/โรงงานเบียร์

รพีพร คำรัตน์ : การดูดซับโลหะหนักโดยใช้กากยีสต์จากโรงงานเบียร์(BIOSORPTION OF HEAVY METAL USING SPENT BREWER'S YEAST) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ : อรพินท์ เอี่ยมศิริ, Ph.D., ชื่นจิตต์ บุญเจิด, Ph.D., ศ.ค. 118 หน้า. ISBN 974-663-302-3

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการดูดซับโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้กากยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* จากโรงงานเบียร์ ทั้งนี้ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถและประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนัก กล่าวคือ ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถของกากยีสต์และยีสต์สายพันธุ์เดียวกันที่เพาะเลี้ยงในการดูดซับ โดยดูค่าความเป็นกรด่างของสารละลาย การปรับสภาพยีสต์ด้วยความร้อน นอกจากนั้นยังดูความสามารถของกากยีสต์ที่ผ่านการจัดหอด้วยต่าง โดยทำการทดลองในระบบ batch test ด้วยการใช้ทั้งน้ำเสียสังเคราะห์โลหะเดี่ยวและโลหะผสม และน้ำเสียจากโรงงาน และใช้ Atomic Absorption Spectrometer ในการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก รวมทั้งใช้สถิติ Analysis of Variance และ Duncan's Multiple Range Tests ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ยีสต์ที่เพาะเลี้ยง กากยีสต์ และกากยีสต์จัดหอด้วยสามารถดูดซับโลหะหนักกึ่ง ทองแดงและตะกั่วได้ แต่การปรับสภาพเซลล์ด้วยความร้อนจะมีผลทำให้การดูดซับเพิ่มขึ้นเฉพาะทองแดงเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การจัดหอด้วยออกจากกากยีสต์ไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแต่อย่างใด ประสิทธิภาพในการดูดซับดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด่างของสารละลาย การใช้ความร้อนในการปรับสภาพยีสต์ ประเภทของโลหะหนักทั้งโลหะเดี่ยวและโลหะผสมในสารละลาย กล่าวคือ ที่ pH 4 ยีสต์จะดูดซับตะกั่วได้มากกว่าทองแดงและนิกเกิล ($Pb > Cu > Ni$) คือ $75 > 70 > 60$ เปอร์เซ็นต์ สำหรับทองแดงและตะกั่วที่ pH 3 และ 5 จะถูกดูดซับได้ไม่แตกต่างจากที่ pH 4 และในกรณีสารละลายผสมระหว่างทองแดงกับตะกั่ว ค่าความเป็นกรด่างที่เหมาะสมที่สุดคือ pH 4 ทั้งนี้ความสามารถของยีสต์ในการจับกับทั้งโลหะเดี่ยวและโลหะผสมไม่แตกต่างกัน เมื่อทำการศึกษากับน้ำเสียโรงงานที่ปรับให้เป็น pH 4 พบว่าความสามารถในการดูดซับของยีสต์และกากยีสต์ลดลงอย่างมาก (>20 และ 30%) โดยกากยีสต์สามารถดูดซับได้เพียงประมาณ 20% ในขณะที่ยีสต์จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่ากากยีสต์ถึงประมาณเท่าตัว ($\sim 40\%$) อย่างไรก็ตามความสามารถดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะทำให้คุณภาพน้ำทิ้งของโรงงาน ทั้งปริมาณทองแดงและตะกั่วต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรมได้



3736432 ENTM/M : MAJOR : TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT ;
M.Sc. (TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT)

KEY WORDS : BIOSORPTION/HEAVY METAL/SPENT BREWER'S YEAST

RAPEEPORN KUMRAT : BIOSORPTION OF HEAVY METAL USING
SPENT BREWER'S YEAST . THESIS ADVISOR : AURAPIN EAMSIRI, Ph.D. ,
CHUENCHIT BOONCHIRD, Ph.D. 118 p. ISBN 974-663-302-3

This research was carried out to investigate removal of heavy metals from wastewater produced by the electronics industry through biosorption using spent brewer's yeast, *S. cerevisiae*. The experiments were set to study the factors effecting heavy metal removal efficiency by spent brewer's yeast comparatively with the cultivated brewer's yeast, namely initial pH of solution, heat treatment in yeast biomass. In addition, the effect of hop oil removal from spent brewer's yeast using an alkali solution was also studied. The study of heavy metals biosorption capacity was conducted heavy metal removal by batch experiments using synthetics, single metal and co-metal ions competition, and industrial wastewater. Experimental samples were analyzed using AAS for heavy metals and then data were statistically processed by ANOVA and DMRT.

The results revealed that biosorbent produced from spent brewer's yeast could remove nickel, copper and lead. Heat treatment in yeast biomass could increase only copper biosorption capacity. However, hop oil removal from cells could not increase any adsorption capacity. The biosorption capacity and removal efficiency of nickel, copper and lead depended on the initial pH of the solution, treatment of yeast cells and types of metals and co-metal ions competition in mixed solutions. The highest removal efficiency using *S. cerevisiae* appeared on lead (75%) and then gradually decreased to copper (70%) and nickel (60%) (Pb>Cu>Ni) at pH 4. While the efficiency of copper and lead at pH 3 and pH 5 were the same as at pH 4. In case of mixed solutions, an appropriate pH was 4 in which the biosorption capacity of both single and co-metals showed no difference. However, using electronics industrial wastewater at pH 4 the biosorption capacity of both yeast biomass and spent brewer's yeast were significantly decreased (>20% and 30%). A higher biosorption capacity of yeast biomass (~40%) than spent's brewer yeast (~20%) were appeared. From these results, it can be demonstrated that by using biosorbent the amount of both copper and lead from electronics industrial wastewater cannot be lowered than industrial standard.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรม	
2.1 ผลกระทบของโลหะหนักต่อสิ่งแวดล้อม	6
2.2 แนวทางการจัดการโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	12
2.3 ยีสต์กับอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์	15
2.4 การดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพ	19
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	
3.1 การวางแผนการทดลอง	38
3.2 การเก็บตัวอย่าง	41
3.3 การเตรียมตัวอย่าง	41
3.4 การตรวจวิเคราะห์หาค่าความขม	44
3.5 การดูดซับโลหะหนักโดยยีสต์ด้วยวิธี Batch experiment	45
3.6 ขั้นตอนการทดลอง	46
3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล	47

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล	
4.1 คุณสมบัติของยีสต์และกากยีสต์ที่นำมาใช้ในการทดลอง	49
4.2 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์	50
4.3 ผลของพีเอชในน้ำสังเคราะห์โลหะหนักต่อการดูดซับโลหะหนักของ ยีสต์ <i>S. cerevisiae</i>	51
4.4 ผลของการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์โดยยีสต์และกากยีสต์	56
4.5 ผลของพีเอชต่อการดูดซับโลหะหนัก	63
4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงาน อิเล็กทรอนิกส์โดยตัวอย่างยีสต์	67
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก ก	82
ภาคผนวก ข	86
ภาคผนวก ค	87
ภาคผนวก ง	111
ประวัติผู้เขียน	118

สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

2.1 ระดับตะกั่วในเลือดและปัสสาวะของคนไทย จำแนกตามกลุ่มต่างๆ และปีที่สำรวจ/ศึกษา	9
2.2 อัตราชุกของโรคพิษตะกั่วเรื้อรังในคนไทย จำแนกตามกลุ่มประชากรต่างๆ	9
2.3 อาการเป็นพิษจากสารตะกั่วเรื้อรังลำดับจากอาการที่พบได้บ่อยไปหาที่พบได้น้อย	10
2.4 แสดงองค์ประกอบของกากยีสต์แห้ง	16
2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของผนังเซลล์ยีสต์ <i>S. cerevisiae</i>	18
2.6 แสดงปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตของยีสต์ <i>S. cerevisiae</i>	19
2.7 เปรียบเทียบราคาของตัวดูดซับกับตัวดูดซับทางชีวภาพ (Biosorbent)	36
2.8 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการจัดโลหะหนักกับวิธีBiosorption	37
3.1 ตัวอย่างยีสต์ที่ใช้ในการทดลอง	38
4.1 แสดงค่าความขม (Bitterness)และการขจัดความขม (เปอร์เซ็นต์)	49
4.2 แสดงผลเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างยีสต์ (เปอร์เซ็นต์ moisture) และน้ำหนักยีสต์ที่ใช้ในการทดลอง (0.2 g dry weight/100mL)	50
4.3 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักเกิด ทองแดงและตะกั่ว (เปอร์เซ็นต์) ในน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโลหะ 10 mg/L ในแต่ละตัวอย่างน้ำโดยตัวอย่างยีสต์ <i>S. cerevisiae</i> 0.2 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร	54
4.4 ตัวอย่างยีสต์	57
4.5 ผลของพีเอชของตัวอย่างยีสต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักเกิด ทองแดงและตะกั่ว ในน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นโลหะ 10 mg/L ณ พีเอช 4 ในแต่ละตัวอย่างน้ำโดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร	61
4.6 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม/น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร ณ พีเอช3-6	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.7 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะทองแดง ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร ณ พีเอช 3-6	69
4.8 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะทอง แดงในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์โดยตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรมน้ำหนักแห้ง ต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร ณ พีเอช 3-5	73
4.9 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว ในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์โดยตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรมน้ำหนักแห้งต่อ สารละลาย 100 มิลลิลิตร ณ พีเอช 3-5	74
4.10 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงาน อิเล็กทรอนิกส์โดยตัวอย่างยีสต์ 6 ทริทเมนต์โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร ณ พีเอช 4	75

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นทางของสารมลพิษในระบบดิน-น้ำ-มนุษย์	7
2.2 โครงสร้างของยีสต์ <i>S. cerevisiae</i>	17
2.3 ยีสต์ <i>S. cerevisiae</i> ที่ 5 ชั่วโมงของการดูดซับยูเรเนียม(x27,500เท่า)	23
2.4 ยีสต์ <i>S. cerevisiae</i> ที่ 24 ชั่วโมงของการดูดซับยูเรเนียม	24
2.5 เซลล์ยีสต์ <i>S. cerevisiae</i> ที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมที่ A: 5 นาที B: 5 ชั่วโมง และC:15 ชั่วโมง	26
2.6 ผลของพีเอชต่อการดูดซับยูเรเนียมโดย <i>S. cerevisiae</i>	28
2.7 ผลของพีเอชต่อการดูดซับทองแดงโดย <i>S. cerevisiae</i>	28
2.8 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับยูเรเนียมโดย <i>S. cerevisiae</i>	30
2.9 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับทองแดงโดย <i>S. cerevisiae</i>	30
2.10 การดูดซับทองแดงโดย <i>S. cerevisiae</i> ที่มีพีเอชแตกต่างกัน ณ ความเข้มข้นของทองแดงที่ 5×10^{-5} M ที่พีเอช 2-9	32
2.11 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงโดยตัวดูดซับต่างๆ	35
3.1 แผนการดำเนินการทดลอง	40
3.2 แผนผังแสดงการเตรียมตัวอย่างยีสต์ที่เก็บจากโรงงานเบียร์	43
3.3 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับโลหะหนักโดยวิธี Batch	46
4.1 แสดงปริมาณโลหะทองแดงและตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์	51
4.2 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลของ <i>S. cerevisiae</i>	54
4.3 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงของ <i>S. cerevisiae</i>	55
4.4 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของ <i>S. cerevisiae</i>	55
4.5 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วของ <i>S. cerevisiae</i>	56
4.6 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลที่ความเข้มข้น 10 mg/L ณ พีเอช 4 โดยตัวอย่างยีสต์	64
4.7 แสดงประสิทธิภาพ การดูดซับทองแดงที่ความเข้มข้น 10 mg/L ณ พีเอช 4 กับตัวอย่างยีสต์	61
4.8 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 mg/L ณ พีเอช 4 กับตัวอย่างยีสต์	62

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วที่ความเข้มข้น โลหะ 10 mg/L ณ พีเอช 4 กับตัวอย่างยีสต์	63
4.10 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว ณ ความเข้มข้นของโลหะชนิดละ 10 mg/L	68
4.11 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะทองแดง ณ ความเข้มข้นของโลหะชนิดละ 10 mg/L	69
4.12 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำทิ้งโรงงาน อิเล็กทรอนิกส์ ณ สภาวะพีเอช 3-5 โดยตัวอย่างยีสต์ 6 ทรีทเมนต์	73
4.13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงาน อิเล็กทรอนิกส์ ณ สภาวะพีเอช 3-5 โดยตัวอย่างยีสต์ 6 ทรีทเมนต์	74
4.14 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงาน อิเล็กทรอนิกส์โดยตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 4	75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศไทยที่ผ่านมา ได้มีการเจริญเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็วมากเนื่องจากรัฐบาลมีนโยบายเน้นการส่งเสริมอุตสาหกรรมการผลิตสินค้าเพื่อการส่งออก ทำให้จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา พบว่าในปี พ.ศ.2522 มีจำนวนโรงงานอุตสาหกรรมเพียง 19,691 โรง และได้เพิ่มจำนวนเป็น 104,509 โรงในปี พ.ศ.2536 โดยแยกเป็นเขตภูมิภาค 82,240 โรงและอยู่ในเขตกรุงเทพมหานคร 22,269 โรง ในจำนวนนี้อุตสาหกรรมอาหารมีจำนวนมากที่สุด (กรมควบคุมมลพิษ, 2536: 3)

การพัฒนาอุตสาหกรรมนั้น ได้ส่งผลต่อการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ ตลอดจนสามารถช่วยยกระดับรายได้ของประชาชนในประเทศให้ดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการขยายตัวของอุตสาหกรรม ก็ยังส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมได้ ถ้าขาดการป้องกันและควบคุมมลพิษจากอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะทำให้เกิดปัญหามลพิษทางดิน น้ำและอากาศ มลพิษเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิต สุขภาพอนามัยของคน รวมทั้งคุณภาพสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไป โดยเฉพาะปัญหาการเสื่อมสภาพของน้ำ พบว่าแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง นอกจากจะได้รับน้ำทิ้งจากชุมชนแล้ว ยังได้รับมลสารในรูปของบีโอดีจากภาคอุตสาหกรรม ประมาณ 2,000 ตัน ในขณะที่ปริมาณสารโลหะหนักที่ทิ้งลงไปในอ่าวไทยตามแม่น้ำสายต่างๆ ทั้ง 22 สาย นั้นสูงถึงปีละ 14,000 ตัน (รังสรรค์ ปิ่นทอง, 2536: 3) สารโลหะหนักที่เป็นของเสียอันตรายเหล่านี้ แทบทั้งหมดมีต้นกำเนิดจากโรงงานอุตสาหกรรม และการทำเหมืองแร่แทบทั้งสิ้น ในปี พ.ศ.2532 การศึกษาถึงปริมาณของเสียที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นทั่วประเทศ โดยบริษัท Engineering Science ซึ่งได้รายงานไว้ใน The National Hazardous Waste Management Plan พบว่า จะมีของเสียที่เป็นของเสียอันตรายเกิดขึ้นทั่วประเทศจากทุกกิจกรรม รวมประมาณปีละ 2.8 ล้านตัน โดยร้อยละ 55 มาจากอุตสาหกรรมหลอมหรือถลุงโลหะ ร้อยละ 17 เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม นอกนั้นก็มาจากด้านธุรกิจพาณิชย์ การเดินเรือ โรงพยาบาล ห้องวิเคราะห์ หรือปนในขยะชุมชนและกิจกรรมของเกษตรกร (ประเสริฐ คุปน์ยางกูร, 2536: 350)

ของเสียที่เป็นอันตรายมีได้หลายลักษณะ อาทิเช่น อยู่ในรูปน้ำมัน กากสารอินทรีย์เหลว ตะกอนสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ตะกอนโลหะและอื่นๆ คาดประมาณว่า ในปัจจุบันมีของเสียอันตรายกระจัดกระจายอยู่ทั่วประเทศ ประมาณปีละเกือบหนึ่งล้านตัน โดยประมาณร้อยละ 75 ของของเสียเหล่านี้ จะอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (อดิศักดิ์ ทองไข่มุกด์, 2536: 3) ซึ่งมีโรงงานอุตสาหกรรมอยู่เป็นจำนวนมาก

ดังนั้นในการควบคุมปัญหามลพิษดังกล่าว โดยอาศัยพระราชบัญญัติโรงงานปี พ.ศ.2512 กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้กำหนดลักษณะของน้ำทิ้งที่ระบายออกนอกบริเวณโรงงาน ให้มีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ภาคผนวก ก) ซึ่งรวมถึง การกำหนดปริมาณของโลหะหนักที่ออกมาแก่น้ำทิ้งก่อนระบายลงสู่แหล่งน้ำและการกำจัดกากตะกอนหลังการบำบัดแล้วด้วย

อย่างไรก็ตามแนวทางการจัดการของเสียที่เป็นอันตราย ควรจะได้มีการปฏิบัติอย่างเหมาะสม เริ่มตั้งแต่ของเสียที่ผลิตออกมา จนกระทั่งของเสียดังกล่าวได้รับการกำจัดในขั้นสุดท้าย การจัดการควรทำเป็นระบบครบวงจร ตั้งแต่การลดปริมาณการผลิตของเสีย การเก็บกักของเสีย การเก็บขนและการขนส่งของเสีย การบำบัดหรือการทำลายฤทธิ์ของเสีย การนำของเสียกลับมาใช้ประโยชน์และการกำจัดของเสียในขั้นสุดท้าย (อดิศักดิ์ ทองไข่มุกด์, 2536: 342)

ในประเทศไทย มีอุตสาหกรรมหลายประเภทที่น้ำทิ้งมีโลหะหนักเป็นจำนวนมาก อาทิ โรงงานชุบโลหะรวมถึงโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โรงงานฟอกย้อมสีและทอผ้า โรงงานฟอกหนังสัตว์ โรงงานผลิตเยื่อกระดาษ โรงงานผลิตสารเคมี โรงงานทำสี โรงงานแบตเตอรี่และถ่านไฟฉาย

สิ่งของเครื่องใช้ชุบโลหะนับว่าทำได้ง่าย ในกรุงเทพมหานครจึงมีโรงงานขนาดเล็กตั้งในตึกแถวมากกว่า 100 โรงงาน มีน้ำทิ้งรวมวันละประมาณ 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร การชุบเหล็กมักนิยมชุบทองแดงก่อน ตามด้วยนิกเกิล แล้วเคลือบชั้นสุดท้ายด้วยโครเมียม น้ำทิ้งจึงมีทั้งโครเมียมและนิกเกิลในปริมาณถึง 20-30 ppm และโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์เอง ที่มีกระบวนการชุบโลหะจะพบว่าในน้ำทิ้งจะมีโลหะตะกั่ว ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี โรงงานผลิตเยื่อกระดาษส่วนมากเป็นโรงงานทำกระดาษจากกระดาษเก่าใช้แล้ว โรงงานเหล่านี้ปล่อยปรอทและตะกั่วในน้ำทิ้ง ส่วนโรงงานแบตเตอรี่ น้ำทิ้งจะมีปัญหาน้ำกรดและตะกั่ว โรงงานส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและสมุทรปราการ (สุกมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540: 209)

ในกระบวนการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานที่มีโลหะหนักปะปนมาด้วยนั้น อาจทำได้หลายวิธี ซึ่งต้องพิจารณาคุณลักษณะของน้ำทิ้งนั้นๆ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2537: 207) ในการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพหรือทางเคมีของโลหะหนักที่ปนอยู่ในน้ำทิ้ง ให้ปริมาณลดลง หมดความเป็นพิษหรือมีความเป็นพิษน้อยลง หรืออยู่ในลักษณะที่ไม่สามารถแสดงความเป็นพิษออกมาได้ เพื่อสะดวกต่อการกำจัดทำลายในขั้นต่อไป การบำบัดของเสียอันตรายเหล่านี้ทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้เตาเผา การทำให้เป็นก้อน การทำให้เป็นกลาง การใช้สารเคมีเช่นปูนขาว ทำให้ตกตะกอนซึ่งเป็นกระบวนการทางกายภาพและทางเคมี หรือแม้แต่การใช้กระบวนการทางชีววิทยา ในการขจัดโลหะหนักโดยนำเอาจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ มาทำการดูดซับโลหะหนัก จุลินทรีย์ที่ใช้มีถึง 83 สายพันธุ์ แบ่งเป็นแบคทีเรีย 32 สายพันธุ์ ยีสต์ 15 สายพันธุ์ รา 16 สายพันธุ์ และแอคติโนมัยซิส (Actinomycetes) 20 สายพันธุ์ โดยนำจุลินทรีย์เหล่านี้มาดูดซับโลหะในสารละลายที่มีโลหะผสมอยู่ 9 ชนิด ความเข้มข้นเท่ากัน คือ แมงกานีส โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง สังกะสี แคดเมียม เมอร์คิวรี ตะกั่วและยูเรเนียม ผลการศึกษาพบว่า ทุกสายพันธุ์สามารถดูดซับ เมอร์คิวรี ตะกั่วและยูเรเนียม ยกเว้นราและแอคติโนมัยซิสที่จะเลือกดูดซับเมอร์คิวรีและ ยูเรเนียม (Nakajima & Sakaguchi, 1986: 59-64)

เมื่อพิจารณาจากจุลินทรีย์ที่สามารถดูดซับโลหะหนักแล้ว พบว่าในอุตสาหกรรมบางอย่าง ได้มีการนำเอาจุลินทรีย์มาใช้ในกระบวนการผลิต และเกิดเป็นกากตะกอนชีวภาพขึ้น ซึ่งจำเป็นต้องมีการกำจัดกากตะกอน เช่น กากตะกอนจากอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม โดยเฉพาะจากโรงงานผลิตเบียร์นั้น เมื่อพิจารณาถึงสมบัติและองค์ประกอบแล้ว จะมีส่วนของกากยีสต์ (spent brewer's yeast) ซึ่งเป็นของเสียที่ได้จากในกระบวนการหมักเบียร์ โดยบางโรงงานมีกากยีสต์มากถึง 1,300 ตันต่อเดือน (รังสรรค์ ปิ่นทอง, 2536: 5) โดยรวมถึงกากตะกอนเบียร์ น้ำเสียและอื่นๆ ซึ่งจะถูกนำไปใช้ถมที่ และให้ฟีดแก่ผู้มาขอ ถ้านำกากยีสต์ไปอบแห้งก็ใช้เป็นอาหารสัตว์และเป็นปุ๋ยได้ แต่อย่างไรก็ตาม กากยีสต์ส่วนใหญ่ ยังเป็นภาระของโรงงานที่ต้องกำจัด อีกทั้งยังมีกลิ่นของยีสต์ที่ยังเกิดการหมักและผลิตแอลกอฮอล์ กากยีสต์ดังกล่าวยังเป็นเซลล์ที่ยังมีชีวิตอยู่ เนื่องจากกากยีสต์มาจากยีสต์ที่ถูกใช้ในช่วงตอนกระบวนการหมักเบียร์ และถูกนำไปใช้ใหม่ 6-7 รอบการหมัก เมื่อพบว่ามีเซลล์ตายมากกว่าร้อยละ 5 ยีสต์จะถูกนำไปทิ้ง กลายเป็นกากยีสต์ที่ต้องกำจัดนั่นเอง

ดังนั้น จากคุณสมบัติของกากยีสต์ที่เป็นเซลล์ที่ยังมีชีวิตดังกล่าว การนำเอากากยีสต์ซึ่งเป็นกากของเสียจากโรงงานเบียร์ มาใช้ประโยชน์ในการดูดซับโลหะหนัก ซึ่งเป็นของเสียอันตรายอย่างหนึ่ง ที่มีแหล่งกำเนิดจากโรงงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ ปะปนออกมากับน้ำทิ้ง

ของโรงงาน และยังเป็นหน้าที่ของทางโรงงาน ที่จะต้องบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่แม่น้ำนั้น น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่ง ในการลดปริมาณการตกตะกอนของเสียจากอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม และนำกลับมาใช้ประโยชน์ให้มากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดการใช้สารเคมี หรือค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักเจือปน จึงน่าจะเป็นแนวทางที่ดีในการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมและเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่ง ในการช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบัน

1.2 วัตถุประสงค์

ในการวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาถึงความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของ ยีสต์ กากยีสต์ และกากยีสต์ที่นำมาจัดซื้อ โดยทำการศึกษาในประเด็นต่างๆ ดังนี้คือ

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์ของ ยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยง และยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงซึ่งผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ด้วยความร้อน

1.2.2 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์ของ กากยีสต์ที่นำมาจากโรงงานเบียร์ และกากยีสต์ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ด้วยความร้อน

1.2.3 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์ของ กากยีสต์ที่ผ่านการจัดซื้อ และกากยีสต์ที่ผ่านการจัดซื้อและกระบวนการฆ่าเซลล์ด้วยความร้อน

1.2.4 เพื่อศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมของน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตชิ้นส่วน อิเล็กทรอนิกส์ ต่อการดูดซับโลหะหนักของยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยง กากยีสต์และกากยีสต์ที่จัดซื้อ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการวิจัยไว้ดังนี้

1.3.1 ทำการศึกษาวิจัยเฉพาะ โลหะหนักนิกเกิล (Ni) ทองแดง (Cu) และตะกั่ว (Pb)

1.3.2 ทำการศึกษาวิจัยเฉพาะเซลล์ยีสต์ *S. cerevisiae* ที่เป็นกากของเสียจากกระบวนการหมักเบียร์ของโรงงานผลิตเบียร์ตราสิงห์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่ได้จากการวิจัยนี้ คาดว่าจะก่อให้เกิดประโยชน์ดังต่อไปนี้

1.4.1 เป็นการใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้จากโรงงานผลิตเบียร์ให้มีประสิทธิภาพ

1.4.2 เป็นแนวทางในการนำเอากากยีสต์ไปใช้ เพื่อดูดซับโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมอื่นๆที่จำเป็นต้องบำบัดโลหะหนักในน้ำทิ้ง เพื่อลดปริมาณโลหะหนักและลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดโดยวิธีอื่น



บทที่ 2

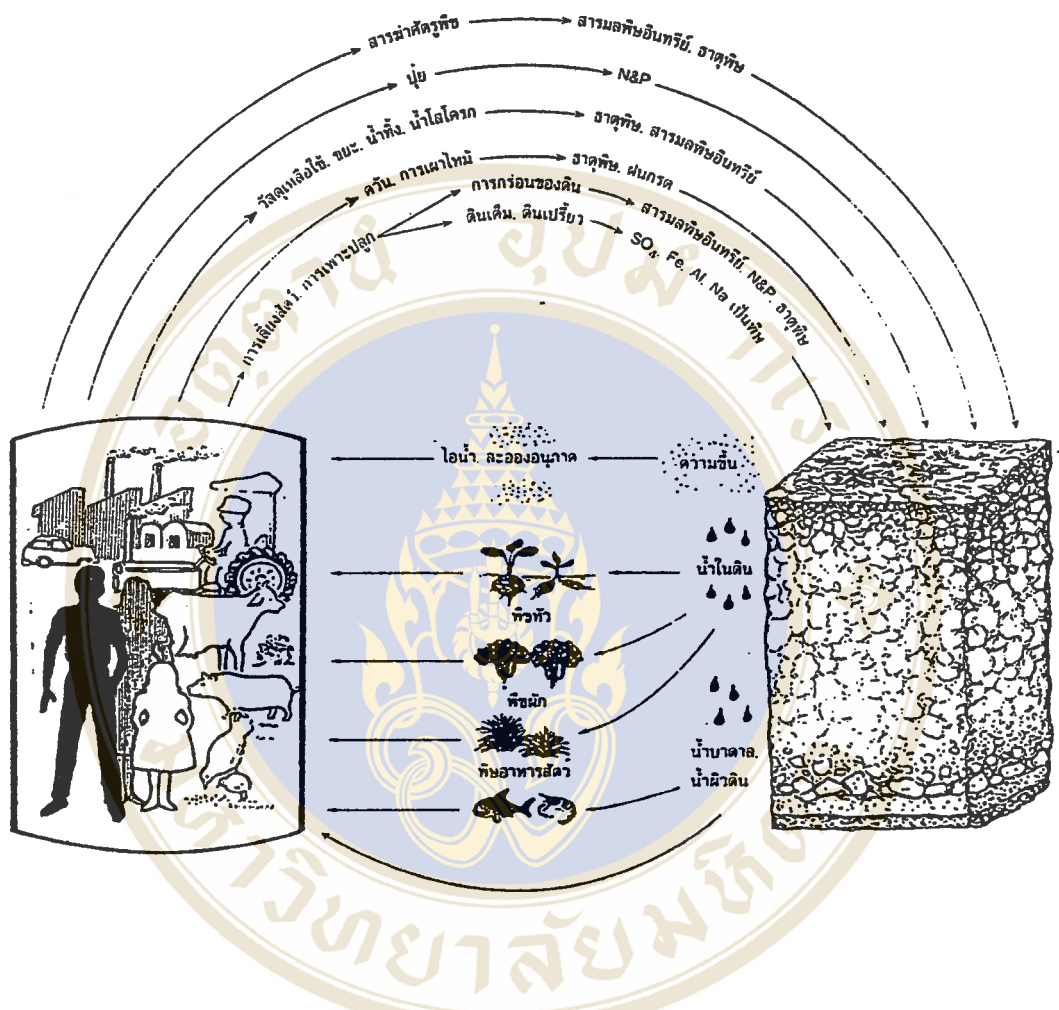
ทบทวนวรรณกรรม

2.1 ผลกระทบของโลหะหนักต่อสิ่งแวดล้อม

โลหะหนักเป็นของเสียอันตราย (hazardous waste) ประเภทหนึ่งที่มีลักษณะเป็นพิษ ซึ่งเป็นอันตรายต่อชีวิตมนุษย์และสัตว์ตลอดจนสิ่งแวดล้อมอื่นๆ อย่างมาก หากทำการเก็บหรือกำจัดทิ้งไปโดยไม่ระมัดระวังให้ถูกหลักวิชาการ โดยมีแหล่งที่มาจากรองานอุตสาหกรรม เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะซึ่งจะมีโลหะหนักเจือปนอยู่ จะมีโลหะหนักพวกโครเมียม แคดเมียม สังกะสี ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว ฯลฯ น้ำทิ้งจากโรงงานผลิตสีหรือโรงงานทอผ้าที่มีการย้อมสีจะมีสารพวกตะกั่วปรอท สารหนู ฯลฯ ของเสียจากโรงกลั่นน้ำมันจะมีโลหะหนักพวกตะกั่วเจือปนอยู่ ของเสียที่มาจากชุมชนบ้านเรือนที่พักอาศัย เช่น ซากถ่านไฟฉายจะมีสารโลหะหนักพวกแมงกานีส หรือแคดเมียมอยู่ภายใน ซากแบตเตอรี่ของรถยนต์จะมีโลหะหนักพวกตะกั่วเจือปนอยู่ หรือแหล่งที่มาของโลหะหนักที่ปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อม จะมาจากโรงงานอุตสาหกรรมและการทำเหมืองแร่

การปนเปื้อนของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้หลายทาง ทั้งโดยการสัมผัสโดยตรง การสะสมอยู่ในห่วงโซ่อาหาร (food chain) การปนเปื้อนต่อแหล่งน้ำที่ใช้ในการอุปโภคและบริโภค การเจือปนอยู่ในอากาศ หรือโดยการระเหิดหรือไฟไหม้ ดังรูปที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า สารโลหะหนักที่มีการกำจัดไม่ถูกต้องเหมาะสม จะก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ ดังจะเห็นได้จากพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ.2512 ได้มีการกำหนดชนิดของโลหะหนักที่ละลายปนออกมากับน้ำทิ้ง ที่ระบายออกนอกบริเวณโรงงาน ได้แก่ สังกะสี โครเมียม สารหนู ทองแดง ปรอท แคดเมียม แบเรียม ซีลีเนียม ตะกั่ว นิกเกิล แมงกานีส ต้องมีคุณสมบัติอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน (ภาคผนวก) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2533)

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ก่อนผ่านการบำบัด ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2539 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2540 พบว่า มีปริมาณ สังกะสีเฉลี่ย 0.450 mg/L นิกเกิลเฉลี่ย 0.385 mg/L ทองแดงเฉลี่ย 2.000 mg/L และตะกั่วเฉลี่ย



รูปที่ 2.1 เส้นทางของสารมลพิษในระบบดิน-น้ำ-มนุษย์

ที่มา : สุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา , 2540: 7

2.475 mg/L เมื่อนำปริมาณโลหะหนักมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (ภาคผนวก ก) พบว่า มีปริมาณสังกะสี ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน แต่ปริมาณนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วเกินเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาความสามารถของยีสต์ต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว ทองแดงและนิกเกิล โดยผู้วิจัยจะบอกกล่าวถึงโลหะหนัก ตะกั่ว ทองแดง และนิกเกิล ตามงานวิจัยพอสังเขป ดังนี้

2.1.1 ตะกั่ว

ตะกั่วจัดเป็นโลหะหลักโลหะหนึ่งที่ใช้ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง พบว่าทั่วโลกใช้ตะกั่วประมาณ 3 ล้านตันต่อปี (ประมาณการใช้ของปี 1970) (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2525: 306) ในประเทศไทยมีความต้องการใช้ตะกั่วประมาณ 20,000 เมตริกตัน โดยมีการนำเข้าจากต่างประเทศ 10,000 เมตริกตันต่อปี ส่วนที่เหลือได้มาจากโรงงานถลุงแร่ตะกั่ว และโรงงานถลุงตะกั่วจากเศษแบตเตอรี่ จากการที่ประเทศไทยมีการใช้ตะกั่วปริมาณมากสะสมมาตลอด ทำให้สิ่งแวดล้อมรอบตัวเรามีตะกั่วปนเปื้อนไม่มากนักน้อย และเข้าสู่ร่างกายของเราโดยปนเปื้อนกับอาหาร เครื่องดื่ม โดยอรพรรณ์ เมธาคิลกกุล(2536: 153) ได้รายงานในสถานการณ์ปัญหาสุขภาพจากพิษตะกั่วในประเทศไทยไว้ว่า ระดับตะกั่วในเลือดและปัสสาวะของกลุ่มคนงานผลิตแบตเตอรี่ คนงานผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คนงานสัมผัสโลหะหนัก จะมีค่ามากกว่า 40 ไมโครกรัมเปอร์เซ็นต์ในเลือด และมากกว่า 160 ไมโครกรัมเปอร์เซ็นต์ในปัสสาวะ ซึ่งมีค่าสูงกว่าคนไทยชนบท คนกรุงเทพฯ และตำรวจจราจร ดังตารางที่ 2.1

อรพรรณ์ เมธาคิลกกุล (2529 : 153) ได้พบว่า มีรายงานการป่วยหมู่ของนักเรียนเขตกรุงเทพมหานคร ซึ่งตั้งอยู่ในพื้นที่ล้อมรอบด้วยโรงงานหลอมโลหะกว่า 20 แห่ง ด้วยอัตรา ร้อยละ 10 และรายงานพบผู้ป่วยที่ได้รับสารพิษจากสารตะกั่ว ในพนักงานโรงงานที่เกี่ยวข้องกับโลหะ ด้วยอัตราร้อยละ 12 และปัจจุบันมีอุตสาหกรรมไอซี อุปกรณ์คอมพิวเตอร์และอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วประเภทต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งมีรายงานผู้ป่วยในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ด้วยอัตรา ร้อยละ 21 ดังตารางที่ 2.2

ตะกั่วที่มนุษย์ได้รับจากสิ่งแวดล้อม ปริมาณร้อยละ 20-50 ผ่านทางอากาศ สำหรับตะกั่วที่มนุษย์ได้รับทางน้ำและอาหารในผู้ใหญ่จะถูกซึมเข้าสู่กระแสเลือดได้เพียง ร้อยละ 10 แต่ในเด็กจะถูกซึมได้สูงถึง ร้อยละ 40-50 สารตะกั่วจึงเป็นพิษในเด็กได้มากกว่าผู้ใหญ่ ตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะกระจายไปอยู่ที่อวัยวะต่าง ๆ เช่น สมอง ปอด ตับ ม้าม และมากที่สุดที่กระดูก โดยจะอยู่ในร่างกายได้ยาวนานถึง 16-27 ปี อาการของโรคพิษตะกั่วต่อระบบต่างๆในร่างกายของมนุษย์มีดังนี้ (สุกมาส พนิชศักดิ์พัฒนา, 2540: 245-6)

ตารางที่ 2.1 ระดับตะกั่วในเลือดและปัสสาวะของคนไทย จำแนกตามกลุ่มต่าง ๆ และปีที่สำรวจ/ศึกษา

กลุ่ม	พ.ศ.	ค่าเฉลี่ย		ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
		ในเลือด (ไมโครกรัม เปอร์เซ็นต์)	ในปัสสาวะ (ไมโครกรัม เปอร์เซ็นต์)	ในเลือด (ไมโครกรัม เปอร์เซ็นต์)	ในปัสสาวะ (ไมโครกรัม เปอร์เซ็นต์)
คนงานผลิตแบตเตอรี่	2525	43.6	181.5	12.8	112.1
คนกรุงเทพฯ	2529	16.2	37.4	7.6	12.3
คนงานผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	2530	33.4	161.5	10.7	121.3
คนงานสัมผัสโลหะหนัก	2530	41.2	167.4	9.8	45.2
คนไทยชนบท	2532	8.6	17.7	5.7	8.4
คนกรุงเทพฯ	2532	18.3	39.4	8.1	16.4
คนงานสัมผัสโลหะหนัก	2532	44.3	173.4	10.6	87.8
คนกรุงเทพฯ	2533	19.6	54.7	7.5	23.5
ตำรวจจราจร	2533	25.7	60.5	8.4	18.6

แหล่งข้อมูล : สำนักงานอาชีวเวชศาสตร์และเวชศาสตร์สิ่งแวดล้อม

ที่มา : อรรถพรณ์ เมธาธิกุลกุล , 2536: 154

ตารางที่ 2.2 อัตราชุกของโรคพิษตะกั่วเรื้อรังในคนไทยจำแนกตามกลุ่มประชากรต่าง ๆ

กลุ่ม / ประชากร	พ.ศ.	อัตราชุกต่อ100คน
นักเรียนย่านบางแค	2529	10
พนักงานผู้สัมผัสกับโลหะหนักทั่วไป	2530	12
พนักงานโรงงานอิเล็กทรอนิกส์	2531	21
พนักงานโรงงานหลอมโลหะ	2532	16
ตำรวจจราจร	2533	8

ที่มา : อรรถพรณ์ เมธาธิกุลกุล , 2536: 153

1) ระบบเลือด ตะกั่วไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในการสร้างเม็ดเลือดที่ไขกระดูก ทำให้ในร่างกายมีเม็ดเลือดน้อย เม็ดเลือดแดงผิดปกติและแตกง่าย เลือดจาง ทำให้ผู้ป่วยมีอาการซีด อ่อนเพลียง่าย เป็นลมหรือมีอาการวูบง่าย

2) ระบบประสาท ตะกั่วเป็นพิษต่อเซลล์ประสาท ทำให้เนื้อสมองบวม ยับยั้งการทำงานของสารเคมีในสมองและทำลายเยื่อหุ้มปลายประสาท ผู้ป่วยมีอาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน อาจมีอาการชัก เดินเซ ควบคุมการทรงตัวไม่ดี นอนไม่ค่อยหลับ ปวดหัวเรื้อรัง ชา อารมณ์แปรปรวน วิปริต งุนงง เชื่องซึม ความจำเสื่อม คิดช้า ในเด็กเล็กอาจพบพัฒนาการทางสมองช้ากว่าปกติ

3) ไต ในรายที่มี อาการรุนแรงเฉียบพลัน ท่อไตส่วนต้นจะถูกทำลาย ในรายที่เป็นเรื้อรังอาจเกิดภาวะไตวายและไตพิการ

4) ระบบสืบพันธุ์ อสุจิของเพศชายและไข่ของเพศหญิงผิดปกติ ทำให้เป็นหมัน มีความผิดปกติของประจำเดือน รวมถึงอาการอื่น ๆ เกี่ยวกับระบบสืบพันธุ์

สำหรับการเป็นพิษจากตะกั่วของมนุษย์ที่พบ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 อาการเป็นพิษจากสารตะกั่ว เรียงลำดับจากอาการที่พบได้น้อยไปหาที่พบได้น้อย

สารอินทรีย์		สารอินทรีย์
ผู้ใหญ่	เด็ก	
ปวดท้อง ท้องผูก อาเจียน หิด อาการทางประสาท ท้องร่วง	ง่วงซึม ระคายเคือง อาเจียน อาการระบบทางเดินอาหาร ง่วงซึม อ่อนเพลีย	รบกวนระบบการนอนหลับ คลื่นเหียน อาเจียน กล้ามเนื้อไม่มีแรง น้ำหนักลด ใจสั่น ท้องร่วง ปวดท้อง ตกใจง่าย คลื่นคลั่ง

2.1.2 ทองแดง

ทองแดงเป็นโลหะที่ใช้มากที่สุดโลหะหนึ่งในรูปของโลหะอิสระ เพราะมีสมบัติดีเยี่ยมหลายประการ เช่น สมบัติการนำไฟฟ้าและความร้อนดีเยี่ยม ทนต่อการผุกร่อน แข็งแรง ดึงเป็นเส้น และตีเป็นแผ่นบาง ๆ ได้ โดย ชัยวัฒน์ เจนวณิชย์ (2525: 149-150) ได้กล่าวถึงการนำทองแดงไปใช้เป็นประโยชน์มากที่สุดรองจากเหล็กว่า ใช้ทำเส้นลวดไฟฟ้า วงจรไฟฟ้าและเครื่องมือไฟฟ้าต่าง ๆ ใช้ในอุตสาหกรรมก่อสร้าง ใช้ในการผลิตหม้อต้ม น้ำ กาน้ำ ถังน้ำ ท่อน้ำและขดลวด กัดมัน้ำร้อน ใช้เคลือบผิวของโลหะ ใช้ทำโลหะเจือทองเหลือง ใช้ทำกะทะและเครื่องครัวต่าง ๆ

ความสำคัญของทองแดงในคนนั้น พบว่า ทองแดงเป็นโลหะที่ร่างกายเราต้องการในปริมาณเล็กน้อย และมีความจำเป็นสำหรับกระบวนการเผาผลาญอาหาร ผู้ใหญ่ต้องการทองแดง 2 มิลลิกรัม/วัน และร่างกายของคนมีทองแดงอยู่ประมาณ 100-150 มิลลิกรัม ซึ่งทองแดงมีความเข้มข้นสูงสุดที่ตับและกระดูก และมีส่วนสำคัญต่อการสร้างฮีโมโกลบิน ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเม็ดเลือดแดง

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าทองแดงในปริมาณเล็กน้อยไม่เพียงแต่เป็นไม่เป็นพิษ แต่ยังเป็นสิ่งที่ร่างกายเราต้องการ แต่ถ้ามีปริมาณสูงก็จะให้โทษและเป็นพิษได้ เช่น CuSO_4 จำนวน 27 กรัมทำคนเราให้ตายได้ ซึ่ง CuSO_4 จะใช้ในอุตสาหกรรมหนังสัตว์และใช้ทำผงซักฟอกที่ทำให้ผ้าขาวขึ้น โดยบุญธรรม จิระจันทร์(2536: 227) ได้กล่าวว่า ทองแดงที่เข้าสู่ร่างกายทางการกินและการหายใจนี้จะก่อให้เกิดโรค Copper nephropathy ซึ่งจะมีทั้งกรณีที่ได้รับทองแดงเข้าสู่ร่างกายในจำนวนมาก ๆ ในระยะสั้น ๆ (Acute poisoning) และร่างกายได้รับเข้าสู่ร่างกายในจำนวนน้อย ๆ แต่ต่อเนื่องในระยะเวลาานาน ๆ (Chronic poisoning) ทำให้ถึงตายได้ และทำให้เกิดโรควิลสัน (Wilson's disease) ซึ่งจะมีการสะสมของทองแดงตามอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น สมอง ผิวหนัง ตับและตับอ่อน และที่หัวใจ (Volesky, 1990: 14)

ถ้ารับประทานทองแดงในปริมาณน้อย จะเกิดอาการอาเจียน เหน็บชา และสำคัญ (ชัยวัฒน์ เจนวณิชย์, 2525: 151) ส่วนสุกมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา (2540: 251-2) ได้กล่าวถึงความ เป็นพิษของทองแดงต่อพืชว่า ทองแดงมีความเป็นพิษต่อพืชได้ง่าย พืชโดยส่วนใหญ่จะมีอาการเป็นพิษเมื่อมีทองแดงในสารละลายดินแม้ในปริมาณไม่มาก พืชที่มีอาการเป็นพิษจากทองแดงจะพบว่า

มีปริมาณทองแดง 25-40 ppm โดยน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้หากมีการปนเปื้อนของทองแดงในน้ำแล้ว จะเป็นอันตรายต่อปลาได้ง่ายเพราะปลาเป็นสัตว์ที่ไวต่อพิษของทองแดงมาก

2.1.3 นิกเกิล

นิกเกิลเป็นโลหะที่ใช้ในอุตสาหกรรมเจือ (alloy) เช่น เหล็กกล้าปลอดสนิม (stainless steel) ใช้ชุบโลหะ ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) ของน้ำมันพืช ใช้ทำแบตเตอรี่สะสมแบบอัลคาไลน์ (alkaline storage battery) อิเล็กโตรเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell electrodes) ใช้ในอุตสาหกรรมเซรามิกส์ เครื่องประดับ เป็นต้น (ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์, 2525: 389-390)

Volesky (1990: 15) ได้กล่าวว่า ถ้าร่างกายได้รับนิกเกิลในปริมาณสูง มีระดับความเป็นพิษสูงมากอาจเป็นสาเหตุเกิดโรคมะเร็งจากนิกเกิลได้ (nickel carcinogenicity) โดยศุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา (2540: 282) กล่าวว่า นิกเกิลจัดเป็นสารก่อมะเร็งในสัตว์ แต่ถือเป็นสารที่เป็นอันตรายไม่รุนแรงมากในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เนื่องจากทางเดินอาหารดูดซึมนิกเกิลได้ต่ำ แต่นิกเกิลค่อนข้างเป็นพิษต่อพืช โดยทั่วไปพืชจะทนพิษของนิกเกิลได้น้อยกว่าตะกั่ว

2.2 แนวทางการจัดการโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ในโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการใช้น้ำที่แตกต่างกัน ตามประเภทหรือชนิดของโรงงาน บางโรงงานอาจต้องการน้ำใช้เพียงสำหรับการอุปโภค บริโภคของคนงานและเจ้าหน้าที่เท่านั้น แต่บางโรงงานอาจต้องการน้ำใช้ช่วยในกระบวนการผลิตสินค้า

น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมก็คือน้ำเสียของโรงงานนั้น ๆ ซึ่งต้องทำการบำบัดให้น้ำทิ้งที่มีคุณภาพได้มาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม โดยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทดังนี้ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2537: 154)

1) น้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการหล่อเย็น (cooling water) จะเป็นน้ำทิ้งที่เกิดจากการระบายความร้อนในเครื่องจักร

2) น้ำทิ้งจากกระบวนการชะล้าง (wash water) จะเป็นน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการล้างวัตถุดิบต่าง ๆ

3) น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต (process wastewater) จะเป็นน้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิต

4) น้ำทิ้งจากกิจกรรมต่าง ๆ จะเป็นน้ำทิ้งที่เกิดจากการอาบน้ำของคนงาน น้ำทิ้งจากห้องน้ำและอื่น ๆ

ลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ กระบวนการ และปัจจัยอื่น ๆ อีกมากมาย เนื่องจากลักษณะของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมชนิดต่าง ๆ มีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นวิธีการบำบัดน้ำเสียจึงมีความแตกต่างกันด้วย เพราะฉะนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากที่จะต้องทราบรายละเอียดเกี่ยวกับน้ำเสียและรายละเอียดของกระบวนการผลิตในโรงงานนั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น โรงงานชุบโลหะ ซึ่งจะมีกระบวนการชุบโลหะทองแดง นิกเกิล และโครเมียม พบว่าในกระบวนการผลิตจะมีส่วนของไอออนบวกของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเสียของโรงงาน เช่น ตะกั่ว นิกเกิล ทองแดง และโครเมียม เป็นต้น ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั่นเอง (Thavune Puttanastiengpong, 1988: 7-9)

สำหรับกระบวนการขจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานมีอยู่หลายวิธี เช่น การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพ หรือทางเคมีของโลหะหนัก โดยอาจทำให้หมดความเป็นพิษ หรือมีความเป็นพิษน้อยลง หรืออยู่ในลักษณะที่ไม่สามารถแสดงความเป็นพิษออกมาได้ เพื่อสะดวกต่อการกำจัดทำลายในขั้นต่อไป ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี (อดิศักดิ์ ทองไข่มุกด์, 2536: 345-6) ได้แก่ การทำให้เป็นก้อน การทำให้แห้ง การทำให้เป็นกลาง การใช้สารเคมีทำลายฤทธิ์หรือทำให้ตกตะกอน การใช้เตาเผา รวมถึงการใช้กระบวนการใช้จุลินทรีย์แยกโลหะหนัก ในโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์นั้น ใช้กระบวนการทางเคมีทำให้ตกตะกอนเป็นกากตะกอนและนำไปกำจัดต่อไป

ในปี ค.ศ. 1981 Stradberg และคณะ (1981: 237-245) ได้ศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้จุลินทรีย์ โดยนำเอา *S. cerevisiae* และ *Pseudomonas aeruginosa* ที่ได้จากการเพาะเชื้อ 24 ชั่วโมง มาดูดซับกับสารละลายยูเรเนียมในเตรท โดยใช้เซลล์ 0.4 มิลลิกรัมของน้ำหนักแห้งต่อ 1 มิลลิลิตรของสารละลายยูเรเนียมในเตรท เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะหนัก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และวัดปริมาณของยูเรเนียมที่เหลือทุกๆ 1 ชั่วโมงเป็นเวลา 22 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่า *Pseudomonas aeruginosa* สามารถดูดซับโลหะหนักได้อย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 10 วินาที) ส่วน *S. cerevisiae* จะสามารถนำเอายูเรเนียมมาอยู่รอบผิวเซลล์ การดูดซับโลหะหนักใน

ช่วงแรกจะเกิดช้ากว่า *Pseudomonas aeruginosa* โดยใช้เวลาถึง 6 ชั่วโมงจึงจะดูดซับยูเรเนียมได้ในปริมาณที่เท่ากัน

ต่อมาในปี 1986 Nakajima&Sakaguchi(1986: 59-64) ได้ทำการศึกษาจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ในการดูดซับโลหะหนัก โดยศึกษาสายพันธุ์ของจุลินทรีย์ถึง 83 สายพันธุ์ แบ่งเป็นแบคทีเรีย 32 สายพันธุ์ ยีสต์ 15 สายพันธุ์ รา 16 สายพันธุ์และแอคติโนมัยซิส (Actinomycetes) 20 สายพันธุ์ตามลำดับ พบว่าทุกสายพันธุ์มีความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมได้ แต่เมื่อนำจุลินทรีย์มาดูดซับสารละลายที่มีโลหะผสม 9 ชนิดในที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ประกอบด้วยแมงกานีส โคบอลต์ นิกเกิล ทองแดง สังกะสี แคลเซียม เมอร์คิวรี ตะกั่วและยูเรเนียม พบว่า ทุกสายพันธุ์สามารถดูดซับ เมอร์คิวรี ตะกั่วและยูเรเนียม ยกเว้น ราและแอคติโนมัยซิสที่จะเลือกดูดซับ เมอร์คิวรีและยูเรเนียมเท่านั้น จากการศึกษาสามารถจะใช้จุลินทรีย์มาทำการดูดซับโลหะหนักได้ และเมื่อนำมาทำการตรึงเซลล์ (immobilized cell) ก็จะสามารถใช้จุลินทรีย์ดูดซับโลหะได้มากกว่าหนึ่งครั้ง

จากการศึกษาวิจัยดังกล่าว จะเห็นได้ว่า จุลินทรีย์ทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ รา และแอคติโนมัยซิส สามารถดูดซับโลหะหนักได้และจุลินทรีย์เหล่านี้ยังเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตต่างๆ เช่น antibiotics, steroids, industrial chemicals, การผลิต enzymes, microbial insecticides, flavors and fragrances (Voleskey, 1990: 144-145) หรือนำจุลินทรีย์มาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การใช้ อะซิโตแบคเตอร์ (Acetobacter) ในการผลิตน้ำส้มสายชู แบคทีเรียโพรปีโอนิก (Propionic) ในการผลิตเนย ส่วนยีสต์ที่มีบทบาท ในการผลิตอุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่างๆ แทบทุกประเภท คือ *S. cerevisiae* และ *S. carlsbergensis* (ปริยา วิบูลย์เศรษฐ์, 2536: 154) ซึ่งผลพลอยได้จากกระบวนการผลิต โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุตสาหกรรมการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์นั้น (รังสรรค์ ปิ่นทอง, 2536: 5) จะมีของเสียเป็นจำนวนมาก ได้แก่ กากยีสต์ (Spent yeast) จากโรงงานผลิตเบียร์ ซึ่งบางโรงงานมีมากถึง 1,300 ตันต่อเดือน กากตะกอนเบียร์ซึ่งมีมากถึง 370 ตันต่อเดือน ซึ่งทางโรงงานจะนำบางส่วนไปอบให้แห้งแล้วใช้เป็นอาหารสัตว์ และเป็นปุ๋ย ในการปลูกข้าวบาร์เลย์ของโรงงาน ให้ฟรีแก่ผู้มาขอหรือนำไปถมที่ แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณของกากยีสต์ (Spent yeast) และกากตะกอนก็ยังคงเหลือเป็นจำนวนมากที่เป็นภาระในการกำจัดต่อไป ดังนั้นอีกแนวทางในการจัดการกากของเสียเหล่านี้ การนำเอากากของเสียกลับไปใช้ใหม่ จึงน่าจะเป็นแนวทางหนึ่งในการลดภาระการกำจัดได้บ้าง เช่น การศึกษากากยีสต์ไปใช้กำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม หรือนำเอากากตะกอนไปเป็นปุ๋ยในการเพาะปลูก เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม การเลือกแนวทางในการขจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งของโรงงาน ซึ่งมีหลายกระบวนการ ดังที่กล่าวมาแล้วนั้น จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงความเป็นไปได้ทั้งทางด้านวิศวกรรม เศรษฐศาสตร์ สังคมและการเมือง (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2537: 167)

2.3 ยีสต์กับอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์

2.3.1 อุตสาหกรรมการผลิตเบียร์

เบียร์เป็นเครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์และสารอาหารอยู่หลายชนิด เช่น โปรตีน วิตามินบี และซี เป็นต้น เบียร์เป็นเครื่องดื่มที่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงทำให้เบียร์มีรสซ่า และได้รับสมจากสารที่ได้จากฮอป (Hop) ในกระบวนการผลิตเบียร์ใช้มอลท์ แป้ง ฮอป น้ำและยีสต์เป็นวัตถุดิบ โดยมีขั้นตอนการผลิตเบียร์คือ การคั่วเมล็ด การหมักเบียร์ การบ่ม การกรองและการบรรจุ ดังรายละเอียดในภาคผนวก กระบวนการของการผลิตเบียร์ที่สำคัญคือ กระบวนการหมักเบียร์ โดยมียีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces* เป็นตัวการสำคัญในกระบวนการหมักเบียร์นั่นเอง ดังนั้นในการผลิตเบียร์จึงจำเป็นต้องเลือกใช้สายพันธุ์ยีสต์ที่บริสุทธิ์ มีคุณภาพ แข็งแรง มี activity ดี (Lewis & Young, 1995: 147-8) โดยปริยา วิบูลย์เศรษฐ์ (2524: 154) กล่าวว่า สายพันธุ์ที่นิยมใช้ทั่วโลกคือ *S. carlsbergensis* และ *S. cerevisiae* โดยบริษัทบุญรอดบริวเวอรี่ จำกัดเอง ใช้สายพันธุ์ *S. cerevisiae* ยีสต์ที่ใช้ในกระบวนการหมักนี้จะถูกนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 6-7 รอบของการหมัก ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของยีสต์ จำนวนยีสต์ที่ตายและอ่อนแอด้วย ยีสต์ที่ผ่านกระบวนการหมักเบียร์จะถูกกรองแยกออกจากน้ำเบียร์ กลายเป็นกากยีสต์ (spent yeast) ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องกำจัดต่อไป

เนื่องจากกากยีสต์อุดมไปด้วยสารอาหารที่จำเป็นต่อมนุษย์ ดังตารางที่ 2.4 จึงได้มีการนำไปใช้ในโรงงานทำขนมปังกรอบ (pretzels) และอุตสาหกรรมอาหารอื่น ๆ บางแห่งอาจนำกากยีสต์ไปผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อ เช่น การใช้ความร้อน, propionic หรือ formic acids เพื่อทำเป็นอาหารสัตว์ (Lewis & Young, 1995: 159) แต่อย่างไรก็ตาม ก่อนจะนำกากยีสต์ไปใช้ในอุตสาหกรรมเหล่านั้น จำเป็นต้องนำเอากากยีสต์ ไปจัดเอาสารที่ดูดซับอยู่ที่ผิวเซลล์ยีสต์ออก เนื่องจากเป็นสารในกลุ่ม hop essential oil ที่ให้ความขม (Dwivedi & Gibson, 1970: 110-2) ซึ่งสามารถวัดค่าความขมได้โดยใช้ Spectrophotometer วัดค่าการดูดกลืนแสง UV ที่ 355, 325 และ 275 นาโนเมตร (A_{355} , A_{325} และ A_{275}) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว เชื่อถือได้ (Lewis & Young, 1995: 131)

สำหรับในประเทศไทย กากยีสต์ที่ได้จากโรงงานเบียร์ บางส่วนจะถูกนำไปอบให้แห้ง แล้วใช้เป็นอาหารสัตว์และเป็นปุ๋ยในการปลูกข้าวบาร์เลย์ของโรงงาน (รังสรรค์ ปิ่นทอง, 2536: 5) และบางส่วนจะให้ฟรีแก่ผู้มาขอ หรือนำไปถมที่ อย่างไรก็ตามกากยีสต์ก็ยังคงเป็นภาระที่ทางโรงงานต้องกำจัดต่อไป

ตารางที่ 2.4 แสดงองค์ประกอบของกากยีสต์แห้ง

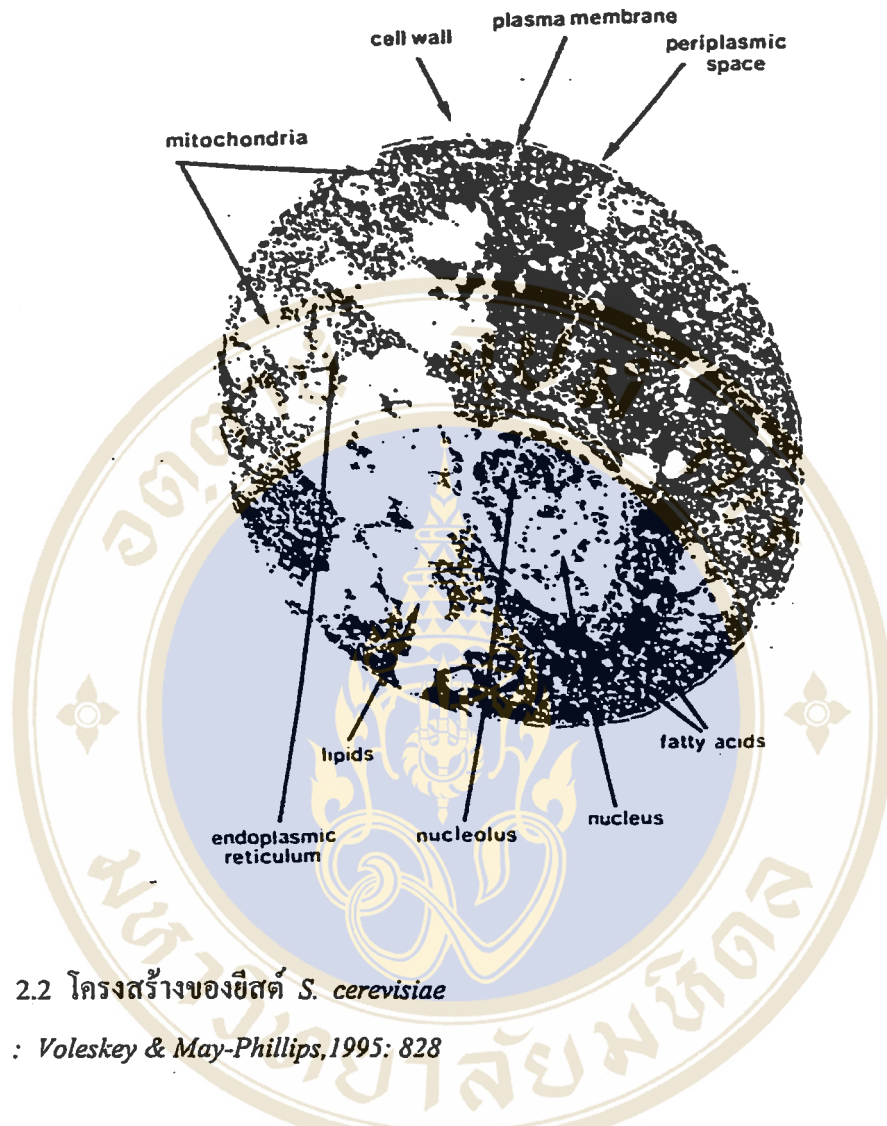
Major component	Concentration (g/100g)	Vitamin	Concentration (mg/100g)
Protein	50	Niacin	50
Carbohydrate	42	Thiamine	15
Ash	7	Pantothenate	10
Fat	6	Riboflavin	7
Moisture	5	Folic acid	4
		Pyridoxine	3
		Biotin	0.2

ที่มา : Michael J.Lewis , 1995: 159

2.3.2 โครงสร้างของยีสต์ และผนังเซลล์ยีสต์

โครงสร้างของเซลล์ยีสต์ประกอบด้วยผนังเซลล์ (cell wall) เยื่อหุ้มไซโตพลาสซึม (cytoplasmic membrane) นิวเคลียส (nucleus) แวกคิวโอล (vacuole) ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) เม็ดไขมัน (lipid globule) วอลูติน (volutin) โพลีฟอสเฟต (polyphosphate) และไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ดังรูปที่ 2.2

ผนังเซลล์เป็นโครงสร้างที่แข็งแรงและยืดหยุ่นได้ มีหน้าที่หุ้มเซลล์ทำให้เซลล์คงรูปร่างอยู่ได้ การแตกหน่อเกิดขึ้นได้ทั่วไปตามผนังเซลล์ของยีสต์ มีรายงานว่า *S. cerevisiae* สามารถแตกหน่อได้ 9-43 ครั้ง โดยเฉลี่ยแล้วยีสต์หนึ่งเซลล์ สามารถแตกหน่อและผลิตลูกหลานได้ 24 ครั้ง หลังจากแตกหน่อให้เซลล์ลูกประมาณ 3-4 เซลล์ รูปร่างของเซลล์มักจะเปลี่ยนไป ผิวค่อนข้างจะไม่เรียบ (ปรียา วิบูลย์เศรษฐ์, 2524: 112)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของยีสต์ *S. cerevisiae*

ที่มา : Voleskey & May-Phillips, 1995: 828

S. cerevisiae เป็นยีสต์ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาส่วนประกอบของผนังเซลล์ ในระยะแรกผนังเซลล์มีลักษณะค่อนข้างบางและหนาขึ้นตามอายุยีสต์ที่เพิ่มขึ้น เคยพบว่ายีสต์มีผนังหนาถึงหนึ่งในเจ็ดส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของเซลล์ ผนังเซลล์มีส่วนประกอบดังนี้

1) กลูแคน (glucan) เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่สำคัญของผนังเซลล์ มีประมาณ 30-35 % ของผนังเซลล์ มีหน้าที่ทำให้เซลล์ยีสต์คงรูปร่างได้และให้ความแข็งแรงแก่เซลล์ด้วย กลูแคนของยีสต์ประกอบด้วยกลูโคสหลายโมเลกุลเรียงตัวต่อกัน กลูโคสแต่ละโมเลกุลต่อกันอยู่ด้วย β 1-3 บอนด์เป็นส่วนใหญ่ และอาจจะต่อโยงด้วย β 1-6 บอนด์บ้าง

2) แมนแนน (mannan) ประกอบด้วยน้ำตาลแมนโนส (mannose) เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ละลายน้ำได้ มีประมาณ 30% สามารถแยกแมนแนนบริสุทธิ์ได้โดยใช้ด่างเจือจางสกัดให้แมนแนนหลุดออกจากผนังเซลล์ และตกตะกอนด้วยสารละลายเฟลิ่งได้เป็นตะกอนของเกลือของทองแดง

จากการวิเคราะห์ทางด้านเคมีพบว่า แมนแนนเป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและแตกกิ่งก้านสาขามากมาย แมนโนสแต่ละโมเลกุลต่อกันอยู่ด้วย α 1-6 บอนด์ และ α 1-2 บอนด์ เป็นส่วนมาก มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่เชื่อมด้วย α 1-3 บอนด์

3) ไคติน(chitin) พบมากที่สุดและเป็นที่เกิดจากการแตกหน่อ มีอยู่ประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ในผนังเซลล์ของ *S. cerevisiae* ไคตินประกอบด้วย โมเลกุลของ N-acetyl-D-glucosamine เชื่อมต่อเนื่องกันด้วย β 1-4 บอนด์

4) โปรตีน (protein) ผนังเซลล์ประกอบด้วยโปรตีนประมาณ 6-13% (Volesky, 1990: 146) โดยปกติโปรตีนจะเชื่อมต่อกับแมนแนน โปรตีนบางส่วนทำหน้าที่เป็นเอนไซม์เพื่อช่วยย่อยสารบางชนิดเพื่อให้สารนั้นสามารถผ่านเข้าสู่ภายในเซลล์ได้ ได้แก่ phosphatase , invertase , melibias , protease และกลุ่มของ hydrolases

5) ไขมัน ผนังเซลล์ของยีสต์ที่ใช้ทำขนมปังมีไขมันประมาณ 8.5-13.5%

6) สารอนินทรีย์ต่างๆส่วนมาก ได้แก่ ฟอสเฟต

องค์ประกอบทางเคมีของผนังเซลล์ยีสต์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งของผนังเซลล์มีค่า ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของผนังเซลล์ยีสต์ *S. cerevisiae*

องค์ประกอบ	<i>S. cerevisiae</i>
Nitrogen	2.1
Phosphate	0.31
Lipid	8.5
Protein	13.0
Chitin	1.0
Chitosan	1.0
Glucan	28.8
Mannan	31.0

หมายเหตุ : คิดเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของผนังเซลล์ , Total ash รวมกับ phosphate

ที่มา : ดัดแปลงจาก Volesky B. , 1990: 146

จากการวิเคราะห์ทางเคมีของเซลล์ยีสต์ และผนังเซลล์ยีสต์ *S. cerevisiae* Simmons P. & Singleton I. (1996: 278-85) ได้กล่าวถึงอัตราส่วนระหว่างโปรตีนกับคาร์โบไฮเดรต (น้ำหนักโดยน้ำหนัก) ของยีสต์ที่มีอายุ 24 ชั่วโมง กับยีสต์ที่มีอายุ 96 ชั่วโมง มีค่า 0.90 และ 0.51 ตามลำดับ

ส่วนผนังเซลล์ยีสต์จะพบว่าเมื่อเซลล์ยีสต์มีอายุมากขึ้น ปริมาณโปรตีนจะลดลง แต่ปริมาณคาร์โบไฮเดรตจะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงปริมาณโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตของยีสต์ *S. cerevisiae*

Preparation	Content (% drymass , w/w)	
	24 hours old	96 hours old
Cell walls		
Protein	15.7 ± 1.7	10.9 ± 2.1
Total CHO	82.6 ± 4.5	90.9 ± 1.8
Mannan	38.6 ± 2.1	39.8 ± 0.8
Glucose	43.0 ± 2.3	43.9 ± 1.1
Chitin	1.0 ± 0.1	1.3 ± 0.1
Protein : Total CHO	0.19	0.12
Whole cell		
Protein	36.6 ± 2.0	28.7 ± 1.3
Total CHO	40.7 ± 3.6	56.3 ± 1.9
Protein : Total CHO	0.90	0.51

ที่มา : Simmons P. & Singleton I. , 1996

2.4 การดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพ (Biosorption of Heavy Metal)

2.4.1 ความหมายของการดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption definition)

การดูดซับทางชีวภาพ หรือ Biosorption เป็นคำที่เริ่มใช้ โดย Volesky B.(1990: 20) ได้กล่าวถึงการศึกษาวิจัยของ Rothstein และคนอื่นๆ ในปี 1948 พบว่า ยูเรเนียมทำปฏิกิริยากับผิวเซลล์ยีสต์เกิดเป็นคอมเพล็กซ์ (complex) กับหมู่ใด ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาโบลิซึมของกลูโคส และเกิดกลุ่มคอมเพล็กซ์ตามมาที่หลังที่ไม่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาโบลิซึมของกลูโคส ต่อมาในปี 1949 Ruchhott ได้นำเอาหลักการดังกล่าวไปใช้ในการดึงพอลิเนียมจากน้ำโดยใช้ activated sludge ซึ่งเขาพบว่าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของแร่กัมมันตภาพรังสีถูกดูดเกาะกับผิว

เซลล์ได้ ซึ่งจากการศึกษาต่อ ๆ มา พบว่าไม่เฉพาะเซลล์ที่มีชีวิตเท่านั้นที่จะดูดซับสารกัมมันตภาพรังสี แต่เซลล์ที่ตายแล้ว (dead cell) ก็ยังสามารถดูดเกาะสารกัมมันตภาพรังสี คล้ายกับเป็นตัวยึดเกาะชีวภาพ (Biosorbent) และจากการศึกษาของ Teznka (1968) พบว่าบนผิวเซลล์ที่ดูดเกาะน่าจะมีประจุลบซึ่งดึงดูดประจุบวกของ Cu^{2+} และ Mg^{2+} มาเกาะติดไว้

ส่วน Aksu Z. และคณะ (1992: 33-40) ได้กล่าวถึงการใช้อินทรีย์เป็นตัวยึดเกาะทางชีวภาพในการดึงเอาโลหะหนักที่อยู่ในน้ำทิ้งโรงงาน หรือนำเอาสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ ในทะเล เช่น แบคทีเรีย หรือสาหร่าย มาช่วยในการดูดซับโลหะหนักที่ละลายในน้ำรวมทั้งสารกัมมันตภาพรังสี และจากการดูดกลืน Cu^{2+} โดยการเกาะติดผิวทางกายภาพหรือโดยกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) ที่เกิดที่ผิวเซลล์อย่างรวดเร็ว และเซลล์ตายที่สามารถเกาะกลุ่มรวมกับโลหะหนักได้เหมือน ๆ กับกลุ่มเซลล์ที่ยังมีชีวิต ในหลาย ๆ งานวิจัยที่ยกมาน่าจะเรียกวิธีนี้ว่า การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption)

Biosorption ในความหมายของ Gadd G.M. & White C. (1993: 353-9) ได้กล่าวว่า Biosorption หมายถึงการดูดซับโดยชีวมวลทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต โดยกระบวนการทางกายภาพและเคมี เช่น การดูดซับหรือกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน

ในปี 1995 Kapoor A. & Viraraghavan T. (1995: 195-206) ได้กล่าวถึงความหมายของ Biosorption ไว้ว่าหมายถึง ความสามารถในการดูดกลืนโลหะหนักหรือสารกัมมันตภาพรังสี ออกจากสารละลายได้ในความสามารถต่าง ๆ กันของแบคทีเรีย รา ยีสต์ และสาหร่าย ซึ่งเกิดจากสิ่งมีชีวิตเล็ก ๆ รวมทั้งคุณสมบัติเฉพาะของโลหะนั้น ๆ หรือเกิดการเกาะกลุ่มรวมกันกับชีวมวลนั้น ๆ ในลักษณะ bioaccumulation ที่ Shumate & Standberg (1995: 237-50) กล่าวว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะหนักหรือสารกัมมันตภาพรังสี กับ องค์ประกอบของผิวเซลล์ของสิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด น่าจะเป็นปฏิกิริยาทางกายภาพ-เคมี ที่ไม่จำเพาะเจาะจง

ดังนั้นในความหมายของ การดูดซับทางชีวภาพ (Biosorption) หมายถึง การดูดกลืนโลหะหนักหรือสารกัมมันตภาพรังสี โดย ชีวมวลของจุลินทรีย์ (microbial biomass) ซึ่งจะรวมทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต โดยกระบวนการดูดซับโลหะหนักอาจเกิดได้จากกระบวนการ Complexation, Coordination, Chelation of metals, Ion-exchange, Adsorption และ Inorganic microprecipitation (Volesky B., 1990: 20)

2.4.2 กลไกการดูดซับโลหะหนักโดยยีสต์

Kapoor A. & Viraraghavan T. (1995: 195-206) ได้กล่าวถึง งานวิจัยของ Gadd ในปี 1986 เกี่ยวกับการดูดซับโลหะหนักโดยรา (fungi) ว่ามี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการแรกเกิดขึ้นโดยราที่ยังมีชีวิต (living biomass) ซึ่งยังมีเมตาโบลิซึมอยู่ และกระบวนการที่สอง เป็นกระบวนการที่เกิดจากราที่มีและไม่มีชีวิต (dead and living cells) โดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาเคมีของ หมู่ฟังก์ชันของเซลล์ร่วมกับกระบวนการเมตาโบลิซึมของเซลล์ด้วย ต่อมาในปี 1990 Gadd ได้ศึกษาเพิ่มเติมว่า ผนังเซลล์ของราเป็นจุดแรกที่จะทำปฏิกิริยากับไอออนของโลหะ (metal ions) ที่ละลายน้ำ ซึ่งจะพบโลหะเกาะอยู่โดยรอบของผิวผนังเซลล์ หรือภายในโครงสร้างของผนังเซลล์ ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาสู่โครงสร้างอื่น ๆ ภายในเซลล์ ซึ่งจากการศึกษาดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า กลไกการดูดซับโลหะหนักโดยผนังเซลล์เกิดขึ้นโดย 2 กลไก โดยกลไกแรกมีการดูดซับกับหมู่ฟังก์ชันของผนังเซลล์โดยตรง เช่น หมู่ phosphate, carboxyl, amine และ phosphate diester กลไกที่สองเกิดจากผลของปฏิกิริยาทางกายภาพ-เคมี ซึ่งพบว่าในการดูดซับสารกัมมันตภาพรังสีของยีสต์นั้น เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาทั้ง 2 กลไก ส่วนโลหะหนักเกิดปฏิกิริยาแรกเป็นส่วนมาก

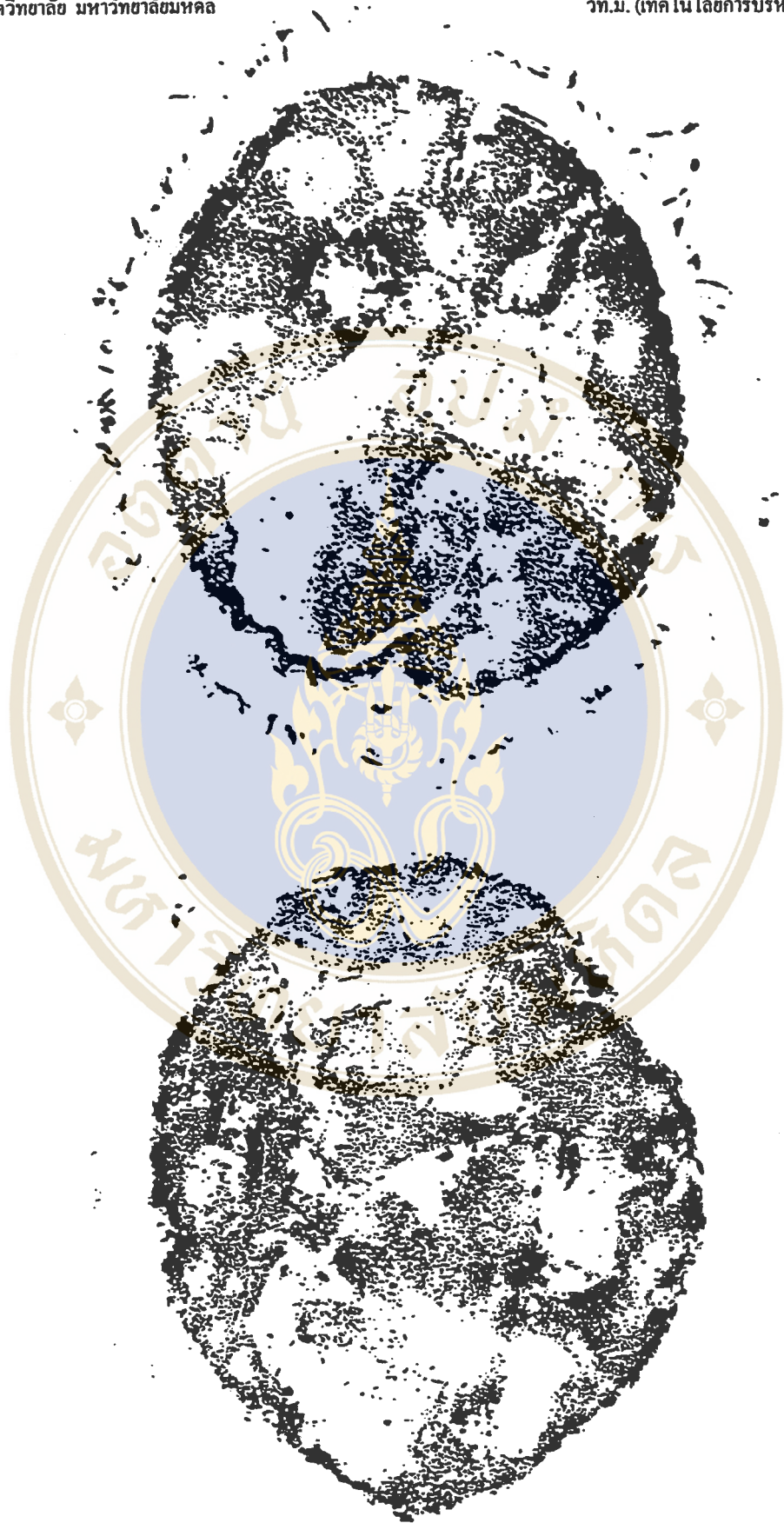
ในการศึกษาของ Standberg และคณะที่ทำการศึกษาการดูดซับยูเรเนียมโดยยีสต์พบว่า บนผิวเซลล์ยีสต์สามารถเกิดกระบวนการดูดซับทางเคมี (chemisorption process) เหมือนกับการเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบนเรซิน โดยสันนิษฐานว่าหมู่โพลีฟอสเฟต เช่น หมู่คาร์บอกซิลบนผิวเซลล์ของ *S. cerevisiae* เป็นตัวทำปฏิกิริยากับหมู่โลหะ ซึ่งสามารถอธิบายถึงการขยายของเซลล์ต่อการดูดกลืนโลหะ (Volesky B., 1990: 162)

ไอออนบวกของหมู่อะมิโน (amino groups) เป็นปัจจัยจำกัดต่อปริมาณของหมู่คาร์บอกซิล ซึ่งจะทำให้เกิดการรวมกลุ่มกันเป็นคอมเพล็กซ์ (complexation) แต่อย่างไรก็ตาม บางครั้งหมู่โลหะก็จะเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเซลล์ มากกว่าที่จะเกิดขึ้นบนผิวเซลล์ โดยอาจจะอธิบายได้ว่าเป็นการเกิด ทำปฏิกิริยาแบบไม่จำเพาะเจาะจง (nonspecific adsorption) กับประจุลบ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนผิวเซลล์ และสามารถมีส่วนร่วมในการทำปฏิกิริยาที่เฉพาะเจาะจงกับสารประกอบบนผิวเซลล์ หรือตกตะกอนกลุ่มโลหะที่ไม่ละลายน้ำ ได้มีการใช้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscopy) เพื่อดูเซลล์ยีสต์กับการดูดซับยูเรเนียม ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงการเคลื่อนที่ของยูเรเนียมที่มีรูปร่างคล้ายเข็มคริสตัลไลต์ (needle-like crystals) บนผิวเซลล์ของ *S. cerevisiae* โดยรอบ หลังจากนำเซลล์ยีสต์ทำปฏิกิริยากับสารละลายยูเรเนียมอย่างน้อย 5 ชั่วโมง และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง จะพบว่าสิ่งที่มีลักษณะคล้ายเข็มผลึกใส ดังกล่าวเข้าไปอยู่

ในตัวเซลล์ยีสต์แต่จะไม่ทำปฏิกิริยากับโครงสร้าง (organelles) ภายในเซลล์เลย *S. cerevisiae* ทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตถูกแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับกับยูเรเนียมทั้งนอกและในเซลล์ กระบวนการดูดซับของยีสต์โดยใช้พลังงานนั้นเกิดขึ้นได้จากการขนส่งอออนของโลหะผ่านทางผนังเซลล์

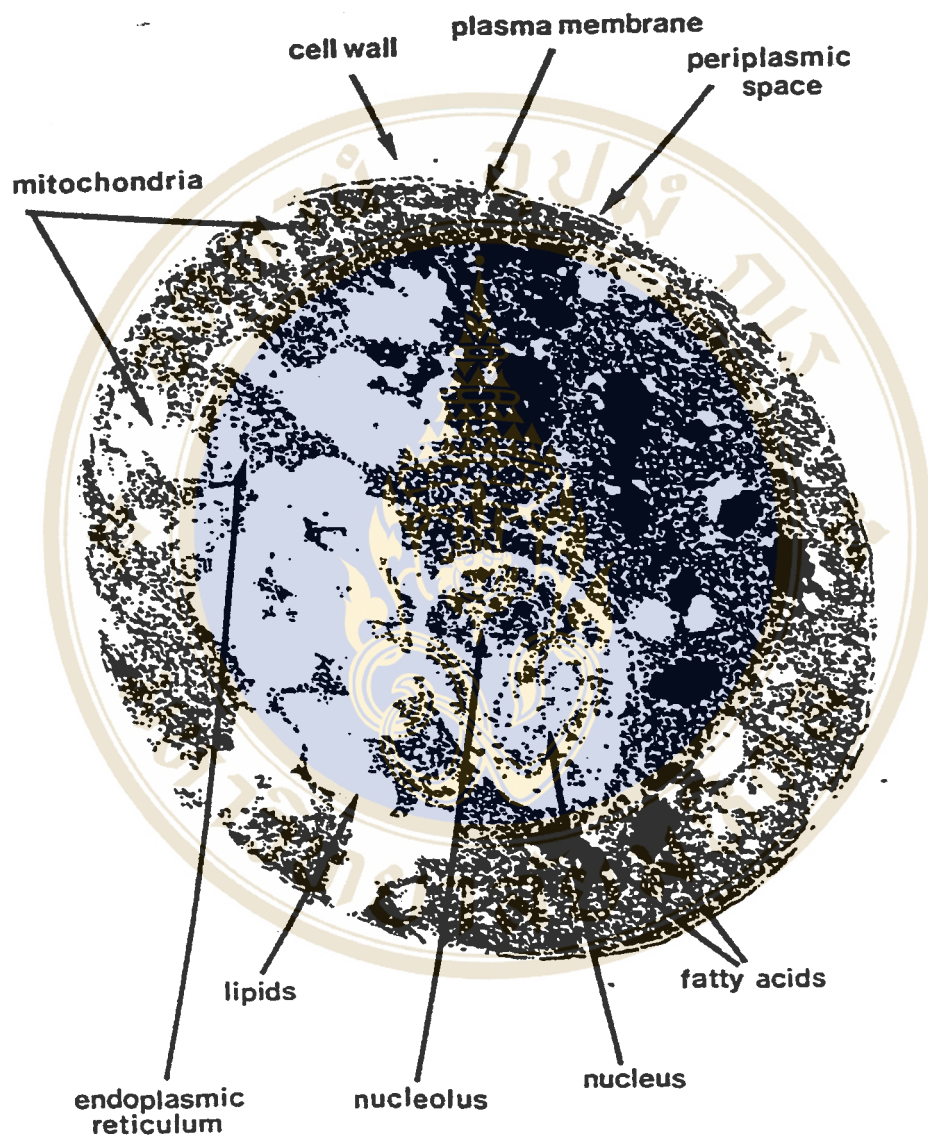
จากการศึกษาของ Volesky B. และคณะ (1993: 826-9) พบว่าในการใช้ *S. cerevisiae* ดูดซับแคดเมียม (cadmium, Cd) นั้นจะเกิดการสะสมของโลหะอยู่ภายในแวคคิวโอล (vacuole) ขนาดใหญ่และเมื่อเวลาในการดูดซับแคดเมียมผ่านไป จาก 5 นาทีเป็น 5 ชั่วโมงและ 15 ชั่วโมงตามลำดับ จะพบว่าขนาดของเซลล์ก็มีการขยายตัวตามไปด้วย เมื่อสังเกตดูความเปลี่ยนแปลงของผนังเซลล์ ก็ไม่พบความแตกต่างจากเดิมแต่อย่างใด เว้นแต่ถ้ามีการปรับสภาพเซลล์ (ทรินาเมนต์) จึงจะเห็นความแตกต่าง เมื่อพิจารณาโครงสร้างภายใน จะพบความแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงกับเซลล์ยีสต์ ที่ผ่านการดูดซับยูเรเนียม โดยดูจากแวคคิวโอลที่ว่างเปล่ากับโครงสร้างอื่นๆยังคงสภาพเดิม แต่ยีสต์ที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมจะมีแวคคิวโอล ดังแสดงในรูปที่ 2.5

Kapoor A. & Viraraghavan T. (1995: 195-206) ได้กล่าวว่า จากงานวิจัยต่างๆ น่าจะชี้ให้เห็นว่า กลไกการดูดกลืนโลหะที่สำคัญคือ การแลกเปลี่ยนประจุ ซึ่งเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ผนังเซลล์ของรามีส่วนประกอบของไคตินและไคโตซานซึ่งสามารถจับกับอออนของโลหะได้ (Muzzarelli, 1972; Tsezos; 1983) โดยไคตินและไคโตซานของผนังเซลล์ของรา เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากไมซีเลีย (mycelia) (Blumenthal & Roseman, 1957; Aronson & Machlis, 1959; Bartuicki-Garcia & Mickerson, 1962; Farkas, 1982) ส่วน McHALE A.P. & McHALE M.S กล่าวว่า ปัจจัยของอายุของเซลล์เอง น่าจะมีผลต่อความสามารถดูดกลืนโลหะหนักได้ โดยในการศึกษาของ Tsezos และ Volesky ในปี 1982 พบว่ากลไกการดูดซับยูเรเนียมโดย *R. arrhizus* มีความแตกต่างจากการดูดซับทอเรียม แต่อย่างไรก็ตามมีความเกี่ยวข้องกับไคติน แต่จากการศึกษาของ Muraleedhran และ Venkobachar ในปี 1990 แสดงให้เห็นว่า ไคตินไม่ได้มีบทบาทในการดูดซับทองแดงโดย *Ganoderma lucidum* ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของกลไกการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิดโดยรา



รูปที่ 2.3 อีสต์ *S. cerevisiae* ที่ 5 ชั่วโมงของการดูดซับยูเรเนียม ($\times 27,500$ เท่า)

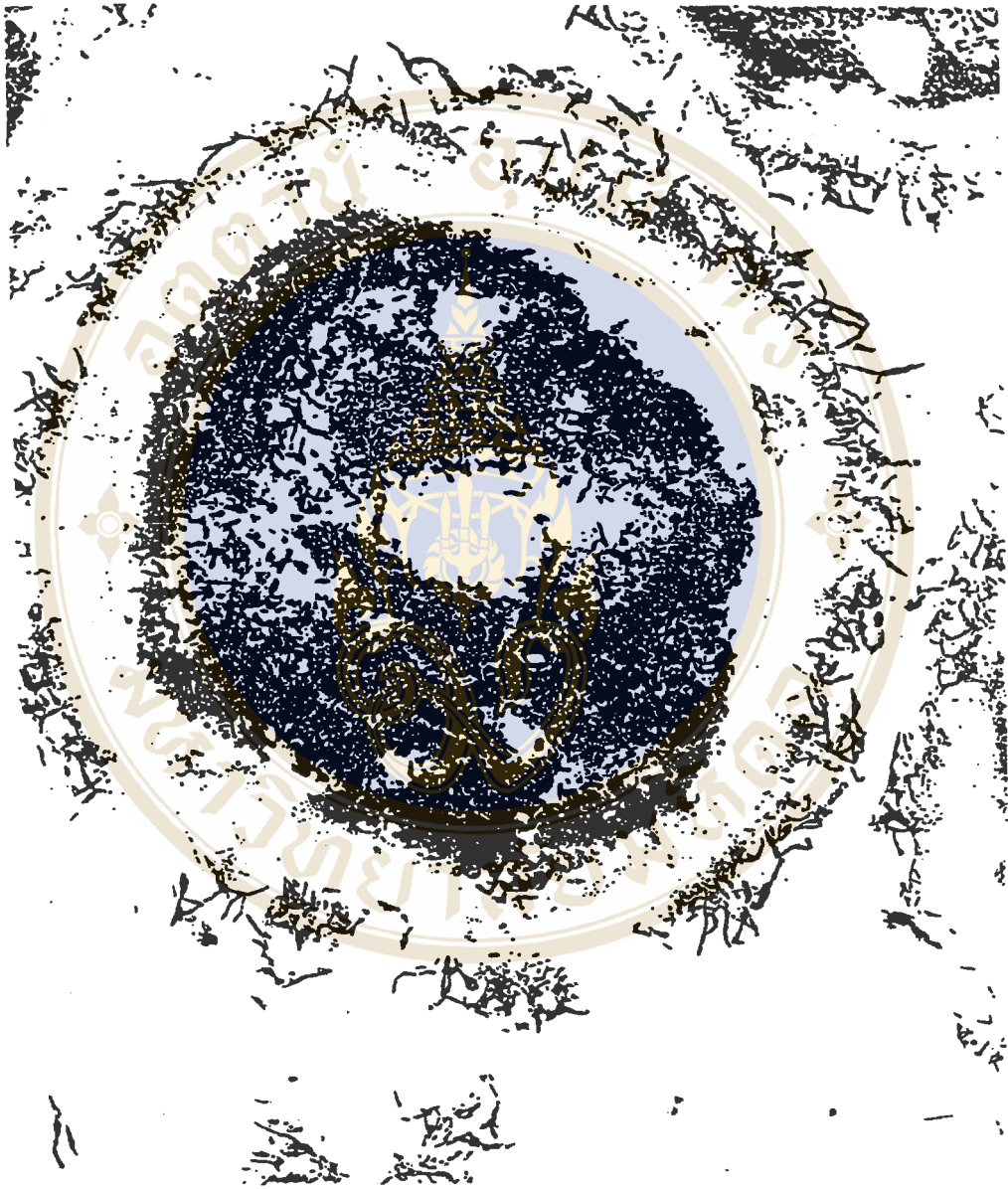
ที่มา : Volesky B., 1990: 164-5



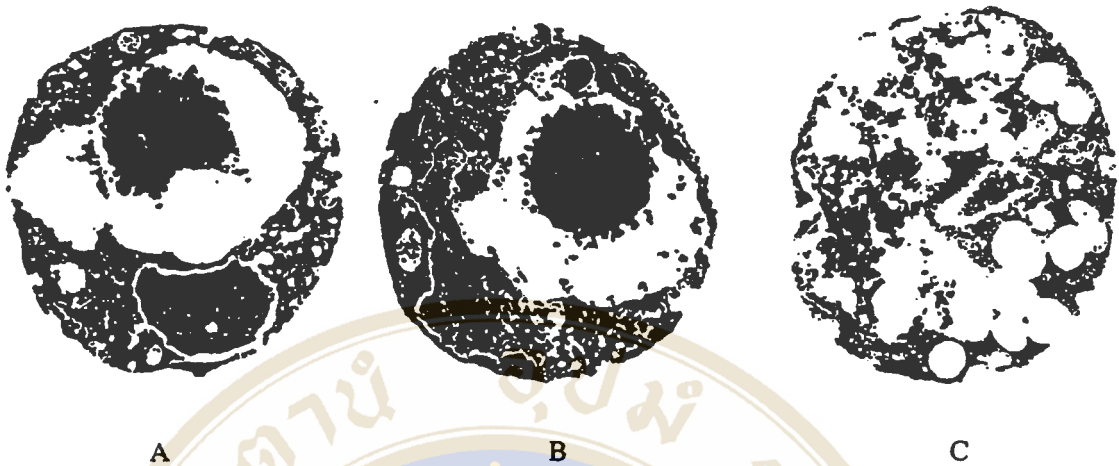
รูปที่ 2.4 ยีสต์ *S. cerevisiae* ที่ 24 ชั่วโมงของการดูดซับยูเรเนียม

(A : กำลังขยาย 36,000 เท่า , B : กำลังขยาย 47,500 เท่า)

ที่มา : Volesky B., 1990: 166-7



รูปที่ 2.4 (ต่อ)



รูปที่ 2.5 เซลล์ยีสต์ *S. cerevisiae* ที่ผ่านการดูดซับแคดเมียมที่ A : 5 นาที, B : 5 ชั่วโมงและ C : 15 ชั่วโมง

ที่มา : Volesky B. & et al., 1993: 828

○ Kapoor A. & Viraraghavan T. (1995: 195-206) กล่าวถึงงานวิจัยในปี 1990 ของ Siegel ว่าได้ทำการดูดซับยูเรเนียมโดยใช้โพลิเมอร์ของผนังเซลล์ที่บริสุทธิ์ พบว่าการดูดซับยูเรเนียม ของไคตินมากกว่า cellulose phosphate มากกว่า carboxyl methyl cellulose มากกว่า เซลลูโลส และค่าสูงสุดที่ดูดซับแตกต่างจากค่าต่ำสุด 20% ซึ่งแสดงให้เห็นถึงว่าประจุของโลหะหนักไม่ได้มีบทบาทสำคัญ ในกลไกการดูดซับโลหะหนักเหมือนอย่างที่ได้เคยศึกษากันในอดีต

Chen P. & Ting Y.P. (1995 , 107-12) ได้ศึกษาถึงผลกระทบของอออนบวกของโลหะ (อออนบวกของทองแดงและนิกเกิล) ต่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของ *S. cerevisiae* โดยใช้ Microelectrophoresis พบว่า ความเป็นประจุบนผิวเซลล์ยีสต์จะลดลง เมื่อ ปริมาณของอออนบวกของโลหะที่ถูกดูดติดผิวเซลล์เพิ่มมากขึ้น การเพิ่มของพีเอชมีผลต่อประจุบนผิวเซลล์ การดูดซับโลหะของเซลล์อาจจะขึ้นอยู่กับกระบวนการต่างๆ เช่น ปฏิกิริยาการนำไฟฟ้า การแลกเปลี่ยนอออน และเกิดปฏิกิริยาทางเคมีฟิสิกัล (physico-chemical interaction) ซึ่งจากผลการศึกษา การดูดซับโลหะนั้นอย่างน้อยที่สุดจะต้องมีส่วนเกี่ยวข้องกับความเป็นประจุบนผิวเซลล์อย่างแน่นอน

ปัจจุบัน กลไกการดูดซับโลหะหนักโดยรานั้นจะเกี่ยวข้องกับ ไคติน ไคโดซาน และ เซลลูโลส ซึ่งผนังเซลล์ของรามิองค์ประกอบของไกลแคน (glycan) โปรตีน ไลปิด polyseronides และเมลานิน (melanin) บทบาทของผนังเซลล์และโครงสร้างของโพลีแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) ยังคงไม่เข้าใจอย่างแจ่มชัดนัก ซึ่งยังคงต้องมีการศึกษาต่อไป

2.4.3 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนักทางชีวภาพ

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักโดยชีวมวล (biomass) โดยจะขอเน้นเกี่ยวกับรา (fungia) ซึ่งหมายรวมถึงยีสต์ด้วยนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

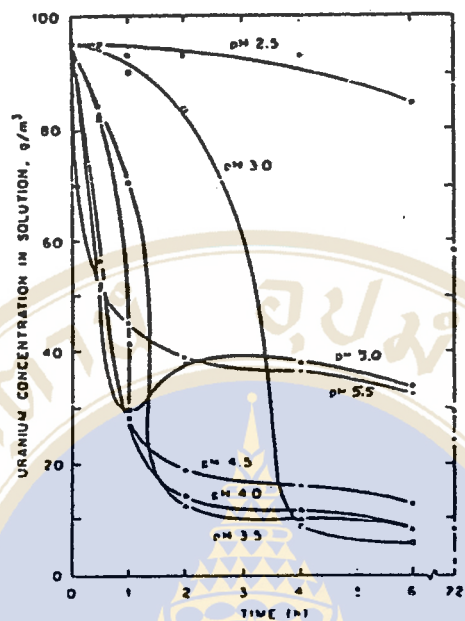
2.4.3.1 สภาวะของพีเอช (pH)

ปัจจัยที่สำคัญที่สุดปัจจัยหนึ่งคือ พีเอช (pH) (Volesky B. , 1999) จากการศึกษาของ Galun และคณะ ในปี 1987พบว่า ณ ที่สภาวะพีเอชสูงจะทำให้ความสามารถของ *Penicillium digitalum* ดูดซับโลหะนิกเกิล สังกะสี แคดเมียมและตะกั่วดีขึ้น แต่จะถูกยับยั้งเมื่อพีเอชต่ำกว่า 3 (Kapoor A. & Viraraghavan T., 1995: 195-206)

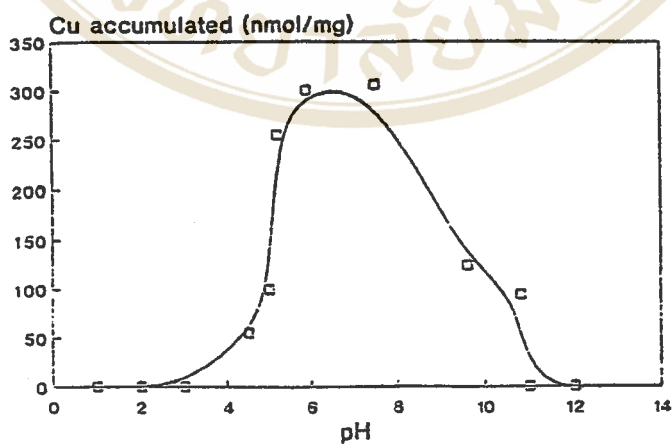
Huang & et al. (1990: 433-9) ได้ศึกษาความสามารถในการดูดซับแคดเมียมโดยราหลายสายพันธุ์ พบว่าขึ้นอยู่กับพีเอชโดย *Aspergillus oxyzae* , *Fusarium solani* และ *Candida utilis* ดูดซับแคดเมียมได้ดีขึ้น ณ สภาวะพีเอชช่วงที่เป็นกรด โดย Huang อธิบายว่าเกิดจากการแข่งขันการจับกันของประจุบวก (proton-competitive adsorption)

สำหรับอิทธิพลของพีเอชต่อการดูดซับยูเรเนียมนั้น จากการศึกษาของ Stardberg G.W. & et al.(1981: 237-45) พบว่าปัจจัยของพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับยูเรเนียมของ *S. cerevisiae* คือ 3.0-4.0 ส่วนการดูดซับยูเรเนียมของ *Pseudomonas aeruginosa* นั้นไม่ขึ้นกับปัจจัย pH ดังแสดงในรูปที่ 2.6

ในปี 1990 Huang & et al. (1990: 433-9) ศึกษาถึงความสามารถของ *S. cerevisiae* ในการดูดซับโลหะทองแดงพบว่าช่วงพีเอช 5-7 เป็นช่วงที่มีการดูดซับโลหะทองแดง ได้ดีที่สุด แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อ พีเอชมากกว่า 7 ซึ่งการเพิ่มของ pH จะมีผลต่อความเป็นประจุลบบนผิวเซลล์ยีสต์ ในขณะที่ Duncan JR.& et al (1993: 149-154) พบว่าความสามารถในการดูดซับทองแดงของ *S. cerevisiae* ณ สภาวะพีเอช 5 จะดูดซับทองแดงได้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว และที่พีเอช 7-9 ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 2.7 การศึกษาในเรื่องของปัจจัยพีเอชที่มีต่อการดูดซับโลหะหนักทองแดง ได้รับการยืนยันผลต่อมาโดย Chen P. & Ting Y.P. (1995: 107-12) ได้กล่าวว่า ณ พีเอชมากกว่า 7 ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงได้นั้น น่าจะเป็น



รูปที่ 2.6 ผลของพีเอชต่อการดูดซับยูเรเนียมโดย *S. cerevisiae*
ที่มา : Stardberg G.W. & et al. , 1981: 241



รูปที่ 2.7 ผลของพีเอชต่อการดูดซับทองแดงโดย *S. cerevisiae*
ที่มา : Duncan JR.& et al, 1993 : 152

ผลมาจากที่พีเอชมากกว่า 7 จะมีผลต่อการตกตะกอนของโลหะกับหมู่ไฮดรอกซี (hydroxy group) ทำให้การดูดซับลดลง

Machale A.P. & Machale S. (1994: 647-52) ได้กล่าวถึงการศึกษาของการดูดซับเรเดียมโดย *Penicillium chrysogenum* เกิดขึ้นมากที่สุดที่สภาวะพีเอช 7 และดูดซับได้น้อยหรือไม่ได้เลยที่สภาวะพีเอช 2 และจากการศึกษาของ Larsson และคณะ ในปี 1992 พบว่า Brewer's yeast สามารถดูดซับไอออนบวกโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ได้มากถึง 63-97 เปอร์เซ็นต์ ณ สภาวะ pH 5-6 แต่จะลดลงเหลือเพียง 30 เปอร์เซ็นต์ ณ สภาวะ pH 1-2

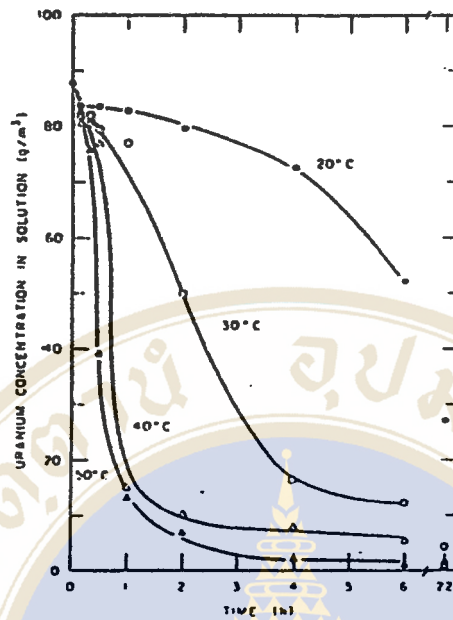
จากการศึกษาในปี 1996 ของ Lu และ Wilkins (1996: 165-79) พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะขึ้นอยู่กับสภาวะพีเอชของสารละลาย โดยจะมีผลต่อความสามารถในการแข่งขันการจับกันของประจุบวกซึ่งเป็นผลมาจากไฮโดรเนียมไอออน

โดยสรุปจะเห็นได้ว่า ปัจจัยของพีเอชจะมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของยีสต์ ซึ่งในช่วงของพีเอชที่ 3-7 เป็นช่วงที่ยีสต์มีความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงได้ดี อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของยีสต์ ณ สภาวะพีเอชใดๆ ยังขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะ สายพันธุ์ของยีสต์ที่ใช้ รวมถึงปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ประกอบด้วย

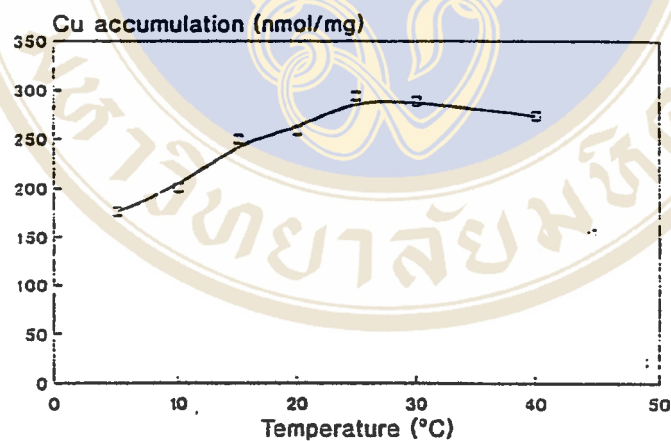
2.4.3.2 อุณหภูมิ (Temperature)

Stradberg & et al. (1981: 237-45) พบว่าการดูดซับยูเรเนียมโดย *S. cerevisiae* ที่อุณหภูมิต่างๆ มีผลต่อการดูดซับ แต่ไม่มีผลต่อการดูดซับยูเรเนียมโดย *Pseudomonas aeruginosa* ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ในปี 1993 Brady D. & Duncan JR. (1993: 149-52) ได้ทำการศึกษาความสามารถของยีสต์ *S. cerevisiae* ในการดูดซับไอออนบวกของโลหะทองแดง (Cu^{2+}) โคบอลต์ (Co^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) พบว่ายีสต์สามารถดูดซับโลหะได้ดีในช่วงอุณหภูมิกว้าง ๆ คือ 5-40 องศาเซลเซียสและดูดซับได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิระหว่าง 25-30 องศาเซลเซียส แต่โดยภาพรวมจะพบว่าอุณหภูมิมีผลน้อยมากต่อการดูดซับทองแดงดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับยูเรเนียม โดย *S. cerevisiae*
ที่มา : Stardberg G.W. & et al. , 1981: 241



รูปที่ 2.9 ผลของอุณหภูมิต่อการดูดซับทองแดงโดย *S. cerevisiae*
ที่มา : Brady D. & Duncan JR. , 1993: 152

ในการศึกษาของ Marques และคณะ ในปี 1991 ว่า ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของจุลินทรีย์หลาย ๆ สายพันธุ์ ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และจากการศึกษาของ Mchale A.P. & Mchale S. (1994: 647-52) พบว่า ความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมโดย *Talaromyces emersonii*

จะไม่เปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิ 15-60 องศาเซลเซียส จากปรากฏการณ์นี้ก็นับว่าเป็นข้อปัจจัยที่ได้เปรียบ ในการนำไปใช้ในการพัฒนาเทคโนโลยีการจัดโลหะในน้ำที่นั่นเอง

โดยสรุปจะเห็นได้ว่า ปัจจัยของอุณหภูมิในช่วงกว้างจึงจะมีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของยีสต์ พบว่าความสามารถในการดูดซับโลหะในช่วงอุณหภูมิ 5-60 องศาเซลเซียสให้ผลไม่แตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส

2.4.3.3 สภาพของการเพาะเชื้อ (Culture condition)

สภาพของการเพาะเชื้อจะหมายถึง อาหารในการเลี้ยงเชื้อรวมถึงระยะเวลาที่ใช้ในการเพาะเชื้อ นั่นก็คืออายุของเซลล์นั่นเอง ซึ่งได้มีการศึกษาพบว่า อายุของเซลล์มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก

Stardberg G.W. & et al. (1981: 237-45) ได้กล่าวว่า ในการเพาะเลี้ยง *Saccharomyces cerevisiae* โดยวิธี aerobic จะสามารถทำให้ *S. cerevisiae* ดูดซับยูเรเนียมได้ดีกว่าวิธีเลี้ยงแบบ anaerobic และ Trcen-Sears และคณะ (1984) พบว่าการเจริญเติบโตของเซลล์ ความสามารถในการดูดซับของเซลล์ และประสิทธิภาพในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นโดยการเติมแร่ธาตุในอาหารเลี้ยงเชื้อ ซึ่งจะเป็นตัวควบคุมโดยตรงต่อโครงสร้างทางเคมีของผนังเซลล์ ซึ่งสามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้

Volesky B. & May-Phillips HA. (1995: 797-806) พบว่า ผลของอายุของเซลล์ยีสต์ โดยการศึกษาความสามารถในการดูดซับยูเรเนียมของ baker's yeast และ brewer's yeast พบว่า เซลล์ยีสต์ที่มีอายุน้อยกว่าจะสามารถดูดซับยูเรเนียมได้ดีกว่าเซลล์ยีสต์ที่มีอายุมากกว่า

2.4.3.4 ความเข้มข้นของเซลล์ (Biomass concentration)

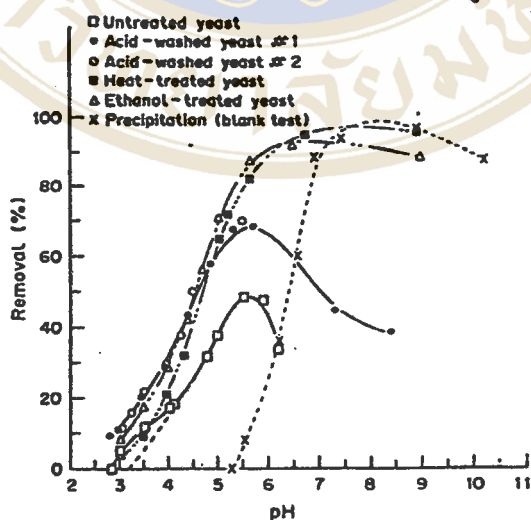
Kapoor A. & Viraraghavant T (1995: 195-206) ได้กล่าวถึงการศึกษาของ Kiff และ Little (1986) , Kurek และคณะในปี 1982 ว่า การดูดซับโลหะแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้น ณ ความเข้มข้นของเซลล์ต่ำ ซึ่งหมายถึง *Aspergillus Oryzae*, *Aspergillus niger*, *Mucor racemosus*, *Penicilliumchrysogenum* และ *Trichoderma viride* และจะมีความสามารถในการดูดซับแคดเมียม

ลดลง เมื่อความเข้มข้นของเซลล์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งน่าจะมีผลจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้าสถิตย์ระหว่างเยื่อหุ้มเซลล์กับผนังเซลล์เอง เมื่อเซลล์มีปริมาณมากก็ทำให้เซลล์มีการเกาะกลุ่มสัมผัสกันเองก็เป็นได้

2.4.3.5 ทรีทเมนต์ของเซลล์

การปรับสภาพเซลล์ (ทรีทเมนต์) แบ่งเป็นทรีทเมนต์ทางกายภาพและทางเคมี เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของเซลล์ได้ โดยวิธีทางกายภาพได้แก่ การใช้ความร้อน, ความร้อนใต้ความดัน (autoclaving), ระเหิดด้วยการแช่แข็ง (freeze drying) และ การต้ม ส่วนวิธีทางเคมีได้แก่ การล้างเซลล์ด้วยกรด ค่าง หรือสารเคมี (Kapoor A. & Virraraghavant T. , 1995: 195-206)

ในปี 1988 จากการศึกษาของ HUANG และคนอื่นๆ(1990: 433-9) เกี่ยวกับการใช้ *S. cerevisiae* ดูดซับ สารละลายทองแดง ในการศึกษาครั้งนี้ ได้นำเอายีสต์ไปผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ (ทรีทเมนต์) โดยแบ่งเป็น 2 วิธี คือวิธีทางกายภาพโดยใช้ความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส ความดัน 2 atm 15 นาที และทางเคมีโดยแช่ใน 70 เปอร์เซ็นต์ปริมาตรโดยปริมาตรของเอทานอล เป็นเวลา 20 นาที หลังจากนั้นจึงนำไปปั่นแยก เพื่อจะนำเซลล์ไปใช้ในการทำ Batch uptake experiments ในสารละลายทองแดงที่ความเข้มข้น 5×10^{-3} M ที่พีเอช 2-9 ตามลำดับ โดยใช้เซลล์ยีสต์ 2 กรัมของน้ำหนักแห้งต่อสารละลายทองแดง 1 ลิตร เขย่าช้าๆ เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นนำสารละลายกับยีสต์ไปกรองผ่าน กระดาษกรอง มีรูขนาด 0.45 ไมโครเมตร และนำสารละลายที่กรองได้ไปวัดความเข้มข้นของทองแดงที่เหลือ โดยเครื่อง Atomic adsorption spectrophotometer (AAS) ผลการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การดูดซับทองแดงโดย *S. cerevisiae* ที่มี ทรีทเมนต์ ต่างๆ ณ ความเข้มข้นของทองแดงที่ 5×10^{-3} M ที่พีเอช 2-9

ที่มา : HUANG & et al., 1990: 434

จากการศึกษา ทั้งวิธีทางกายภาพและเคมีของเซลล์ยีสต์นั้น สามารถดูดซับทองแดงได้ในปริมาณไม่แตกต่างกัน และ ณ พีเอช 3-6 พบว่า การใช้กรดช่วยในการล้างเซลล์ สามารถดูดซับทองแดงได้มากกว่าเซลล์ยีสต์ที่ไม่ล้างด้วยกรด ซึ่ง HUANG และคณะ(1990: 433-9) อธิบายว่า กรดน่าจะล้างอออนบวบนผิวเซลล์ยีสต์ออกไปและแสดงความเป็นประจุลบชัดเจนขึ้น ทำให้เซลล์ยีสต์สามารถดูดซับอออนบวของโลหะทองแดงในสารละลายได้มากขึ้น ณ พีเอช 5-7 เป็นช่วงที่มีการดูดซับโลหะได้ดีที่สุด แต่เมื่อพีเอชมากกว่า 7 แล้วความสามารถในการดูดซับจะลดลง

Ting Y.P. & Teo W.K. (1994: 113-7) ได้ทำการศึกษาผลของทรีทเมนต์ทั้งทางการกายภาพและทางเคมีกับอออนของโลหะต่อความสามารถของการดูดซับแคดเมียมและสังกะสี โดยยีสต์ *S. cerevisiae* โดยศึกษาทั้งแบบสารละลายโลหะเดี่ยว (single solution) และแบบผสม (combine) พบว่าการละลายของแคดเมียมและสังกะสีในสารละลายเดียวกัน ไม่มีผลต่อการดูดซับของยีสต์ ซึ่งเขาอธิบายว่า น่าจะเกิดจากตำแหน่งของการจับของโลหะแคดเมียมและสังกะสี เป็นคนละตำแหน่งกันบนผิวเซลล์ยีสต์ ส่วนทรีทเมนต์เซลล์ยีสต์โดยความร้อน ต่าง และฟอร์มาลดีไฮด์ทำให้ความสามารถในการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีของยีสต์ดีขึ้น พบว่าการใช้ฟอร์มาลดีไฮด์ให้ผลดีที่สุด

การศึกษาผลทรีทเมนต์ของ *Aspergillus niger* ในการดูดซับโลหะตะกั่ว แคดเมียม ทองแดงและนิกเกิลของ Kapoor A. & Viraraghavan T. (1998: 109-13) ในปี 1998 ทรีทเมนต์ที่ใช้คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ฟอร์มาลดีไฮด์ dimethyl sulphoxide และ detergent ผลการศึกษาพบว่า ทรีทเมนต์ทำให้การดูดซับโลหะตะกั่ว แคดเมียมและทองแดงดีขึ้นกว่าไม่ทรีท แต่จะทำให้การดูดซับโลหะนิกเกิลลดลง โดยการใช้ด่างจะมีผลต่อไคตินบนผนังเซลล์ ทำให้ความสามารถของไคโตซาน-กลูแคน (chitosan-glucan) เกาะจับกับโลหะหนักได้ดีขึ้น

จากการศึกษาปัจจัยของทรีทเมนต์ของเซลล์นั้น เป็นผลดีต่อการนำไปใช้ในเทคโนโลยีการขจัดโลหะในน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม เพราะการปรับสภาพชีวมวลจะช่วยลดความเป็นพิษของโลหะได้ (Kapoor A. & Viraraghavan T. , 1995: 113-7 ; Volesky B. & Holan , 1995: 826-9) โดยต้องศึกษาถึงความเหมาะสมของทรีทเมนต์ต่อการดูดซับโลหะแต่ละชนิดว่า ทรีทเมนต์ไหนจะเหมาะสมต่อโลหะหนักชนิดนั้น ๆ และเหมาะสมต่อ ชีวมวลนั้น รวมถึงปัจจัยแวดล้อมอื่น ๆ ด้วย

2.4.4 การประยุกต์ใช้กระบวนการทางชีวภาพในการดูดซับโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ในการประยุกต์ใช้เซลล์ของชีวมวลในการขจัดโลหะหนักในน้ำทิ้ง จะใช้เซลล์ที่ไม่มีชีวิต ซึ่งจะดีกว่าการใช้เซลล์ที่มีชีวิต อีกทั้งการใช้ ชีวมวลของจุลินทรีย์ยังเป็นเทคโนโลยีที่ให้ผลมากกว่าการใช้ วิธีการแลกเปลี่ยนประจุซึ่งใช้ เรซิน (Mchale A.P. & Machale S. , 1994: 647-52) การนำชีวมวลของจุลินทรีย์มาใช้ จำเป็นต้องทำการตรึงเซลล์ (immobilized cell) ซึ่งสามารถดูดซับโลหะหนักได้มากกว่าหนึ่งครั้ง (recycle) และอาจจะมีการนำโลหะที่ดูดซับได้กลับมาใช้ (recovery) ในอุตสาหกรรมนั้น ๆ ได้อีก

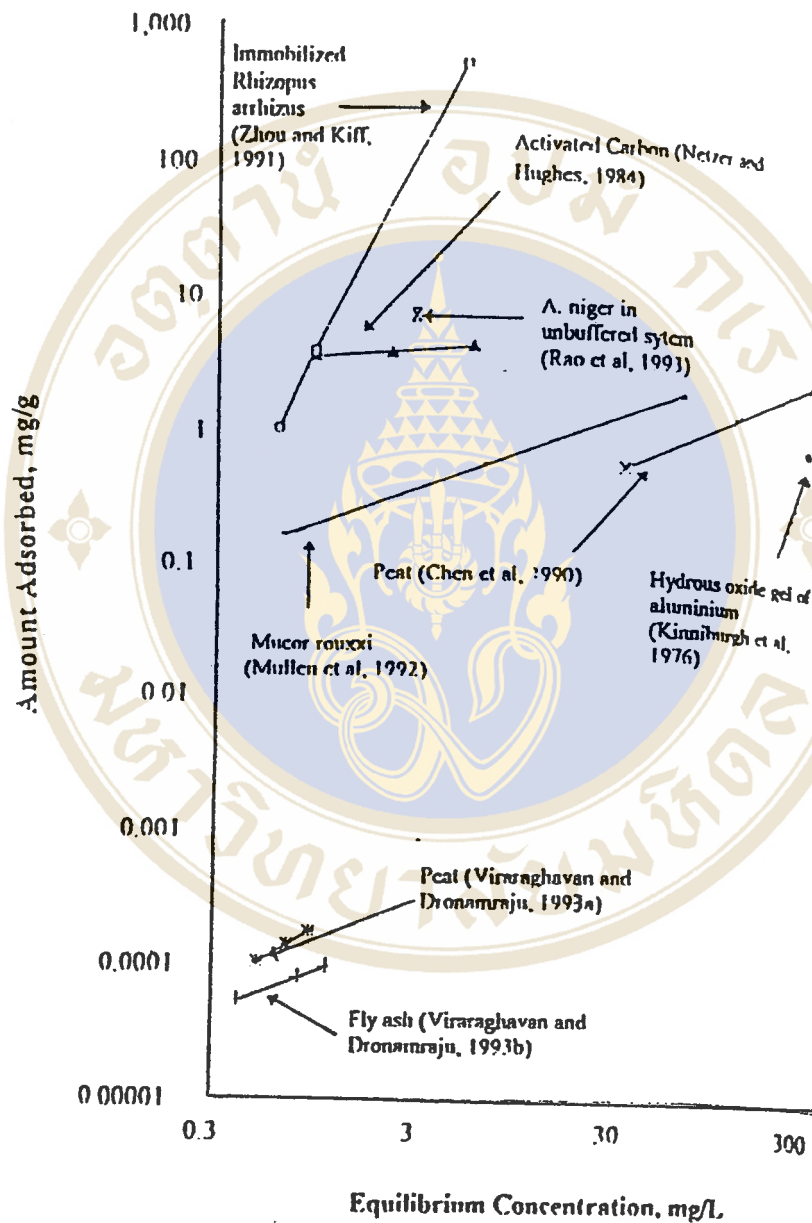
ในปี 1995 Dancan JR และคณะ(1995: 237-45) ได้ทำการวิจัยโดยการนำยีสต์และสาหร่าย มาผ่านการตรึงเซลล์ แล้วใช้ดูดซับโลหะหนักจากน้ำทิ้งของโรงงาน ซึ่ง *S. cerevisiae* สามารถดูดซับโครเมียมออกจากน้ำทิ้งของโรงงานได้ 45-60 เปอร์เซ็นต์ และพบว่า *Spirulina* ชนิดขาวกับ *S. cerevisiae* สามารถดูดซับสังกะสีจากน้ำทิ้งของโรงงานถลุงแร่ได้ 43-65 เปอร์เซ็นต์

ในการประยุกต์ใช้ ชีวมวลเป็นตัวดูดซับ (adsorbent) นั้นมีสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงคือ

- 1) ความสามารถของตัวดูดซับในการดั่งสารมลพิษ
- 2) ความสะดวกในการจัดหา
- 3) ราคา
- 4) การนำกลับมาใช้ใหม่
- 5) ความสะดวกในการใช้

จากการศึกษาของ Kapoor A. & Viraraghavan (1995: 195-206) ได้กล่าวถึงข้อมูลของการดูดซับโลหะทองแดงโดย immobilized *R. arrhizus* เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ (biosorbent) เปรียบเทียบกับตัวดูดซับ (adsorbent) ต่าง ๆ พบว่า immobilized *R. arrhizus* สามารถดูดซับโลหะทองแดงได้ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับตัวดูดซับอื่น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.11

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบราคาของตัวดูดซับอื่น ๆ แล้วพบว่า การเพาะเลี้ยงเซลล์มีราคาถูกกว่า activated carbon และ ion-exchange resin ดังแสดงในตารางที่ 2.7



รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงโดยตัวดูดซับต่างๆ

ที่มา : Kapoor A. และ Viraraghavan, 1995

ตารางที่ 2.7 เปรียบเทียบราคาของตัวดูดซับกับตัวดูดซับทางชีวภาพ (Biosorbent)

Source	Price of adsorbent
As a byproduct from industrial fermentation process	Includes transportation and drying costs.
Biomass cultured for biosorption purpose only ^a	₹ 1-5 per day
Activated carbon ^a	₹ 2.0-5.5 per day
Ion-exchange resins ^{a, b}	₹ 13-30 per day

a After Kuyucak (1990).

b Nalco Canada Inc.

ที่มา : Kapoor A. & Viraraghavan, 1995 : 202

ในส่วนของการนำเอาวิธีการดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) ศึกษาเปรียบเทียบใช้กับเทคโนโลยีการจัดโลหะหนักโดยวิธีต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า การดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่มีข้อได้เปรียบกว่าวิธีอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม การที่จะนำเอาวิธีนี้ไปใช้ในการจัดโลหะหนักยังคงจำเป็นต้องศึกษาอีกต่อไป

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการจัดโลหะหนักกับวิธี biosorption

Technology	Properties of Technology					
	Concentration Dependence	pH	Suspended Solid	Effluent Conc.	Regeneration	Sludge Generation
Biosorption	Yes	Yes	Yes	< 1	Yes	No
Hydroxide precipitation	No	No	Yes	2-5	No	Yes
SulfideNo precipitation	No	Yes	1-5	No	Yes	
Evaporation	Yes	Yes	Yes	1-5	-	No
Reverse osmosis	No	Some	No	< 1	No	No
Ion exchange	Yes	Some	No	< 1	Yes	Yes
Activated carbon	Yes	Some	Yes	1-5	Yes	No

ที่มา : Kapoor A & Viraraghavan T., 1992: 203

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้วางแผนการดำเนินการวิจัยไว้ดังนี้คือ

3.1 การวางแผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการดักจับโลหะหนักของยีสต์ที่เป็นกากของเสียจากกระบวนการผลิตเบียร์ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับโลหะหนักของยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยง กากยีสต์จากโรงงานเบียร์และกากยีสต์จากโรงงานเบียร์ที่นำมาจัดหอพอก เนื่องจากหอพอกเป็นสารที่ให้ความขมในกระบวนการผลิตเบียร์และถูกดักจับที่ผิวเซลล์ยีสต์ โดยยีสต์ทั้ง 3 กลุ่มจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มละ 2 ชุดย่อย โดยชุดแรกนำมาผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ด้วยความร้อนโดยวิธี autoclave ส่วนอีกชุดที่เหลือสามารถใช้ได้ทันที จึงได้ตัวอย่างยีสต์เป็น 6 กลุ่ม ดังตารางที่ 3.1

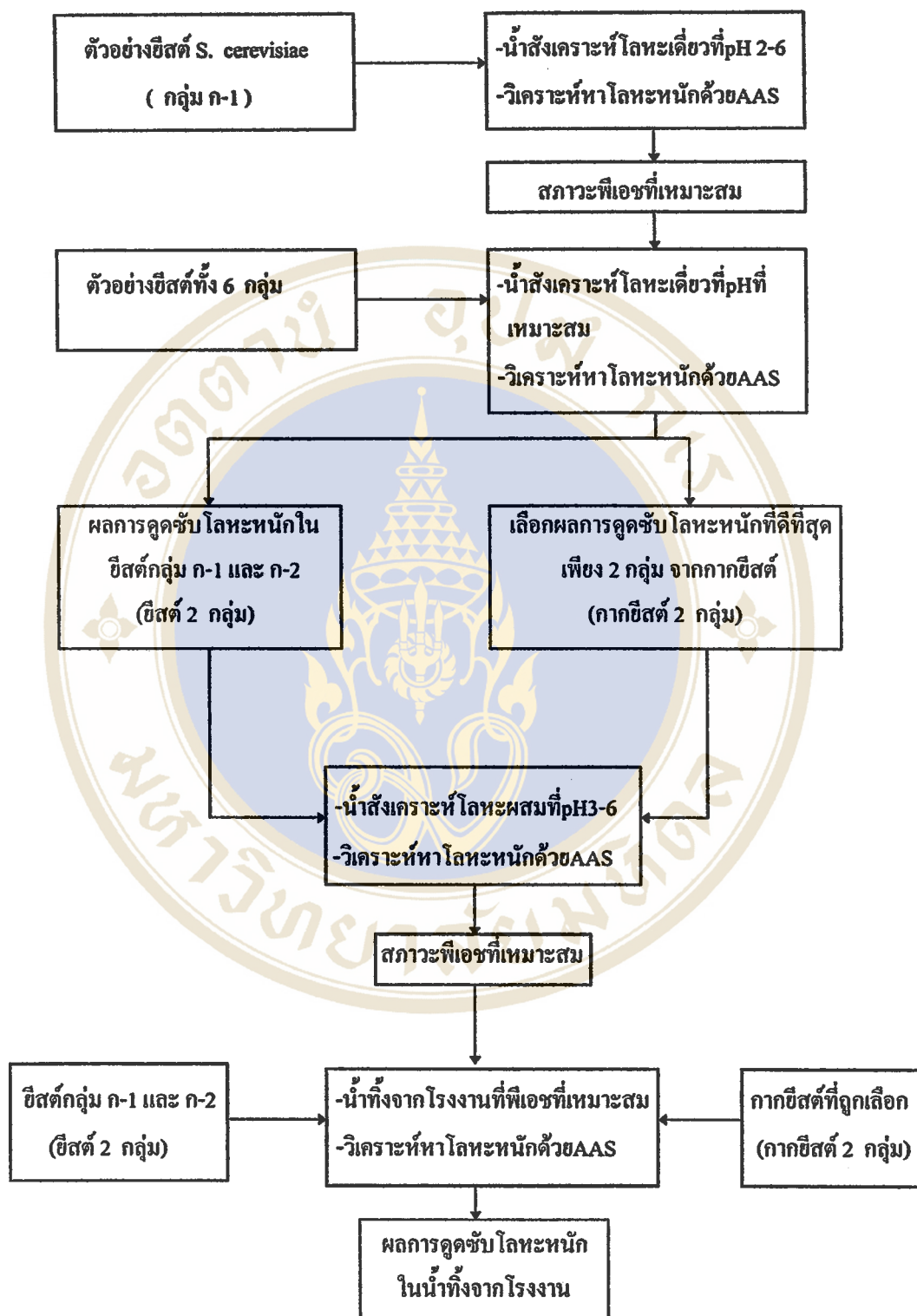
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างยีสต์ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวอย่างยีสต์	ลักษณะของตัวอย่างยีสต์
กลุ่มก-1	ยีสต์ <i>S. cerevisiae</i> จากการเพาะเลี้ยง
กลุ่มก-2	ยีสต์ <i>S. cerevisiae</i> ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์
กลุ่มข-1	กากยีสต์จากโรงงานเบียร์
กลุ่มข-2	กากยีสต์จากโรงงานเบียร์ ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์
กลุ่มค-1	กากยีสต์จากโรงงานเบียร์ที่จัดหอพอก
กลุ่มค-2	กากยีสต์จากโรงงานเบียร์ที่จัดหอพอกและผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์

ส่วนการศึกษานิกของโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยยีสต์นั้น พบว่าจากการศึกษาข้อมูลน้ำทิ้งจากโรงงานก่อนผ่านการบำบัด ในช่วงเดือนมกราคม พ.ศ. 2539 ถึงเดือนมกราคม พ.ศ. 2540 พบว่า มีปริมาณสังกะสีเฉลี่ย 0.450 mg/L นิกเกิลเฉลี่ย 0.385 mg/L ทองแดงเฉลี่ย 2.000 mg/L และตะกั่วเฉลี่ย 2.475 mg/L เมื่อนำปริมาณโลหะหนักมาเปรียบเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (ในภาคผนวก) พบว่า มีปริมาณสังกะสี ต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน แต่ปริมาณนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วเกินเกณฑ์มาตรฐาน ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิจัยการดูดซับโลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว

การทดลองส่วนที่หนึ่ง ทำการเก็บตัวอย่างกากยีสต์จากโรงงานเบียร์ (บริษัทบุญรอด - บริวเวอรี่ จำกัด) นำมาเพาะเลี้ยงเพื่อแยกเอาโคไลนีเดียของยีสต์ *S. cerevisiae* นำไปศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก โดยนำตัวอย่างยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงและไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ (กลุ่ม ก-1) มาทำการดูดซับโลหะหนักนิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว แต่ละชนิดในน้ำสังเคราะห์แต่ละตัวอย่างน้ำ โดยจะทำการศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมในช่วงพีเอช 2-6 และเลือกสภาวะพีเอชที่เหมาะสมจากการทดลอง มาทำการดูดซับโลหะหนักทองแดง นิกเกิล และตะกั่วแต่ละชนิดในน้ำสังเคราะห์แต่ละตัวอย่างน้ำ โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ทั้ง 6 กลุ่ม โดยจะทำการศึกษาด้วยยีสต์ 2 กลุ่มแรกคือ ยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ (กลุ่ม ก-2 และกลุ่ม ก-1) และอีกกลุ่มโดยเลือกตัวอย่างจากกากยีสต์ที่ดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด 2 อันดับแรก จากตัวอย่างกากยีสต์จากโรงงานเบียร์และกากยีสต์จากโรงงานเบียร์ที่นำมาขจัดขอยออกทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ (กลุ่ม ข-1 กลุ่ม ข-2 กลุ่ม ค-1 และกลุ่ม ค-2)

การทดลองส่วนที่สอง นำตัวอย่างยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ (กลุ่ม ก-2 และกลุ่ม ก-1) และตัวอย่างกากยีสต์ที่ดูดซับโลหะหนักได้ดีที่สุด 2 อันดับแรกจากการทดลองในส่วนที่หนึ่ง รวมตัวอย่างยีสต์เป็น 4 กลุ่ม มาทำการดูดซับโลหะหนัก Cu, Ni และ Pb ที่ละลายผสมอยู่ด้วยกันในน้ำสังเคราะห์ โดยจะทำการศึกษาสภาวะพีเอชที่เหมาะสม และส่วนที่สาม เลือกสภาวะพีเอชที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในส่วนที่สอง มาทำการดูดซับโลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ทั้ง 4 กลุ่ม ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนการดำเนินการทดลอง

3.2 การเก็บตัวอย่าง

3.2.1 การเก็บตัวอย่างกากยีสต์

การเก็บตัวอย่างกากยีสต์จากโรงงานเบียร์ที่ได้ผ่านกระบวนการหมักเบียร์ โดยยีสต์จะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ทั้งหมดในแต่ละรอบการหมัก เมื่อเกิดเซลล์ตายมากกว่าร้อยละ 5 ของเซลล์ทั้งหมด ซึ่งจะผ่านการใช้ประมาณ 6-7 รอบการหมักแล้วจึงจะเป็นกากยีสต์ปนกับน้ำเบียร์ประมาณร้อยละ 15 โดยใช้ภาชนะสะอาดปราศจากเชื้อเก็บตัวอย่างกากยีสต์ เก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส

3.2.2 การเก็บตัวอย่างน้ำ

การเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีไอออนบวกของโลหะหนักปนอยู่ เก็บน้ำตัวอย่าง ณ จุดหลังผ่านกระบวนการผลิตโดยตรง ก่อนที่จะรวมกับน้ำทิ้งจากส่วนอื่นแล้วเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียต่อไป ในการเก็บตัวอย่างน้ำ ขณะเก็บตัวอย่างจะต้องทำให้น้ำตัวอย่างเป็นกรด ณ พีเอชต่ำกว่า 2 โดยใช้กรดในกรดเข้มข้น 5 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1,000 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน เก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส สามารถเก็บไว้วิเคราะห์ชนิดและปริมาณโลหะหนักได้นานถึง 3 เดือน (สมาคมวิศวกรแห่งประเทศไทย, 2535: 119-157)

3.3 การเตรียมตัวอย่าง

3.3.1 การเตรียมตัวอย่างยีสต์

ยีสต์ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ เป็นยีสต์ *S. cerevisiae* ที่เพาะเลี้ยงในห้องปฏิบัติการ และที่ได้ผ่านกระบวนการหมักเบียร์ ตัวอย่างยีสต์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ แบ่งเป็น 3 กลุ่มตัวอย่างใหญ่ๆ คือ

1) ตัวอย่างยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยง (กลุ่ม ก)

นำกากยีสต์มาเพาะเลี้ยงบน YPD Medium ใส่ตู้อบเพาะเลี้ยงที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำเอาโคโลนีเดี่ยวๆของยีสต์มาเลี้ยงในอาหารเหลว (YPD broth) ใส่ตู้อบเพาะเลี้ยงที่ 30 องศาเซลเซียส เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บเอาเซลล์ยีสต์มาใช้ในการทดลองโดยทำการปั่นเหวี่ยง

2) ตัวอย่างกากยีสต์จากโรงงานเบียร์ที่สามารถใช้ได้ทันที (กลุ่ม ข)

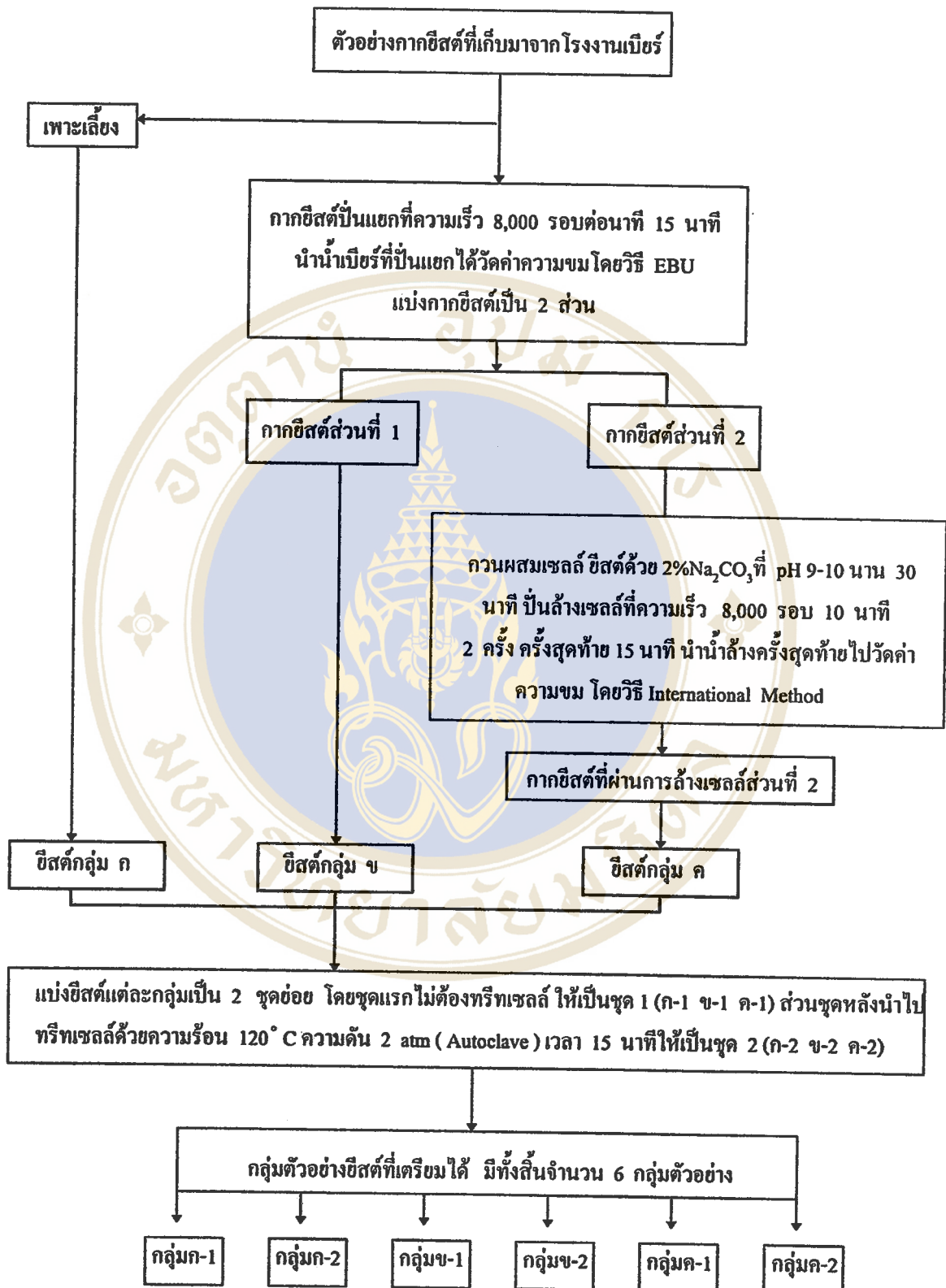
นำกากยีสต์จากโรงงานเบียร์ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที นำน้ำเบียร์ส่วนบนที่ได้ ไปวิเคราะห์หาค่าความขม เพื่อใช้เปรียบเทียบค่าความขมหลังจัดสอพอกด้วยค่าง แบ่งกากยีสต์ออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งเป็นตัวอย่างกากยีสต์กลุ่ม ข อีกส่วนที่เหลือนำไปเตรียมตัวอย่างกากยีสต์ จากโรงงานเบียร์ที่นำมาจัดสอพอก (กลุ่ม ค)

3) ตัวอย่างกากยีสต์จากโรงงานเบียร์ที่นำมาจัดสอพอก (กลุ่ม ค)

นำกากยีสต์มาทวนในสารละลาย 2% โซเดียมไบคาร์บอเนต ($2\% \text{NaHCO}_3$) โดยปรับให้ได้ค่า pH ที่ 9-10 ทวนด้วยเครื่องทวนผสม ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นนำไปปั่นล้าง 3 ครั้งด้วยน้ำกลั่น ที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 10 นาที ปั่นล้างครั้งสุดท้ายนาน 15 นาทีและนำน้ำล้างครั้งสุดท้ายไปวิเคราะห์ค่าความขม และแยกเอากากยีสต์ไปใช้ต่อไป

แบ่งตัวอย่างยีสต์ที่เตรียมได้ในหัวข้อ 1-3 ออกเป็น ตัวอย่างละ 2 กลุ่ม นำกลุ่มแรกมาผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ (ทริทเมนต์) โดยนำตัวอย่างยีสต์ที่ต้องการทริทในปริมาณที่ต้องการใส่ในขวดรูปชมพู่ ใช้ความร้อนที่ 120 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 2 atm เป็นเวลา 15 นาที (Autoclave)

ดังนั้น จะได้ตัวอย่างยีสต์ เป็น 6 ชุดย่อย ดังแสดงในตารางที่ 3.1 นำกลุ่มตัวอย่างยีสต์ทั้งหมด ยกเว้นกากยีสต์ที่นำมาจัดสอพอกแต่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ (กลุ่ม ค-1) ไปปั่นล้างด้วยน้ำกลั่นที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที จำนวน 2 ครั้งและครั้งสุดท้ายปั่นเหวี่ยงใช้เวลา 15 นาที นำกลุ่มตัวอย่างยีสต์ทั้งหมดที่ได้มาหาค่าความขม โดยน้ำหนัkyีสต์ที่ใช้คือ 2 กรัม น้ำหนักแห้งค่อน้ำที่ต้องการวิเคราะห์ 1,000 มิลลิลิตร หรือ 0.2 กรัม น้ำหนักแห้งค่อน้ำที่ต้องการวิเคราะห์ 100 มิลลิลิตร สามารถแสดงการเตรียมตัวอย่างยีสต์จากกากยีสต์ที่ได้จากโรงงานเบียร์ ได้แสดงไว้ในแผนผังที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเตรียมตัวอย่างยีสต์ที่เก็บจากโรงงานเบียร์

3.3.2 การเตรียมน้ำตัวอย่างน้ำ

ตัวอย่างน้ำที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ แบ่งเป็น 3 กลุ่มตัวอย่าง คือ

1) การเตรียมน้ำตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ชนิดเดี่ยว

ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ชนิดเดี่ยว คือตัวอย่างน้ำที่ได้จากการนำสารละลายโลหะหนักมาตรฐาน Cu , Ni และ Pb ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาละลายให้ได้ค่าความเข้มข้นที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในแต่ละตัวอย่างน้ำ โดยเตรียมน้ำตัวอย่างน้ำที่สภาวะพีเอช 2-6 โดยใช้ 0.1 M, 1 M กรดไนตริก กรดไนตริก เข้มข้น (conc HNO₃) 0.1 M, 1 M แอมโมเนีย และแอมโมเนียเข้มข้น (conc NH₄OH) เป็นสารละลายใช้ปรับสภาพความเป็นกรดต่าง

2) การเตรียมน้ำตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ชนิดผสม

ตัวอย่างน้ำสังเคราะห์ชนิดผสม คือตัวอย่างน้ำที่ได้จากการนำสารละลายโลหะหนักมาตรฐานตามชนิดของโลหะหนักที่ได้จากการวิเคราะห์ น้ำทิ้งของโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ มาละลายผสมให้ได้ค่าความเข้มข้นในอัตราส่วน 1:1 โดยเตรียมความเข้มข้นของโลหะชนิดนั้นๆ ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และเตรียมน้ำตัวอย่างน้ำที่สภาวะพีเอช 2-6 โดยใช้ 0.1 M, 1 M กรดไนตริก กรดไนตริก เข้มข้น (conc HNO₃) 0.1 M, 1 M แอมโมเนีย และแอมโมเนียเข้มข้น (conc NH₄OH) เป็นสารละลายใช้ปรับสภาพความเป็นกรดต่าง

3) การเตรียมน้ำตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

การเตรียมน้ำตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ โดยนำตัวอย่างน้ำทิ้งจากโรงงานที่เก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส มาทำให้เย็น ณ อุณหภูมิห้อง แล้วนำมากรองผ่านกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน และเตรียมน้ำตัวอย่างน้ำที่สภาวะพีเอชที่เหมาะสมตามข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

3.4 การตรวจวิเคราะห์หาค่าความขม

การตรวจวิเคราะห์หาค่าความขม (Bitterness) โดยใช้วิธี International Method (Manfred Moll 1987, E155) การหาค่าความขมโดยวิธีนี้ ใช้หลักการตรวจวัดสารที่มีความขมในน้ำเบียร์ ซึ่งมี ไอโซ-แอลฟาแอซิก (Iso-alpha acid) เป็นตัวหลัก โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าความขม มีดังนี้

3.4.1 คัดสารตัวอย่างมา 10 มิลลิลิตร ใส่ใน centrifuge tube ขนาด 35 มิลลิลิตร

3.4.2 เติม 0.5 มิลลิลิตรของ 6M HCl (1.0 มิลลิลิตร ของ 3M HCl) เขย่าให้เข้ากัน

3.4.3 เติม Iso-octane 20 มล. และเขย่าให้เข้ากันอย่างดีโดยใช้ลูกแก้ว (glass ball)

2-3 ลูก ปิดฝาให้แน่น เป็นเวลาประมาณ 15 นาที ที่อุณหภูมิประมาณ 20 องศาเซลเซียส

3.4.4 ปั่นแยกชั้นที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที นาน 3 นาที

3.4.5 นำน้ำส่วนบน (supernatant) ซึ่งเป็น Iso-octane layer มาวัดค่าความสามารถในการดูดกลืนแสง (absorbance) ที่ ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร (A_{275}) โดยใช้ Iso-octane เป็น blank

3.4.6 นำค่าที่ได้ A_{275} มาคำนวณค่าความขม ตามสมการ

$$\text{Bitterness Unit} = 50 \cdot A_{275}$$

โดยที่ A_{275} = ค่าความสามารถในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร

3.5 การดูดซับโลหะหนักโดยยีสต์ด้วยวิธี Batch experiment

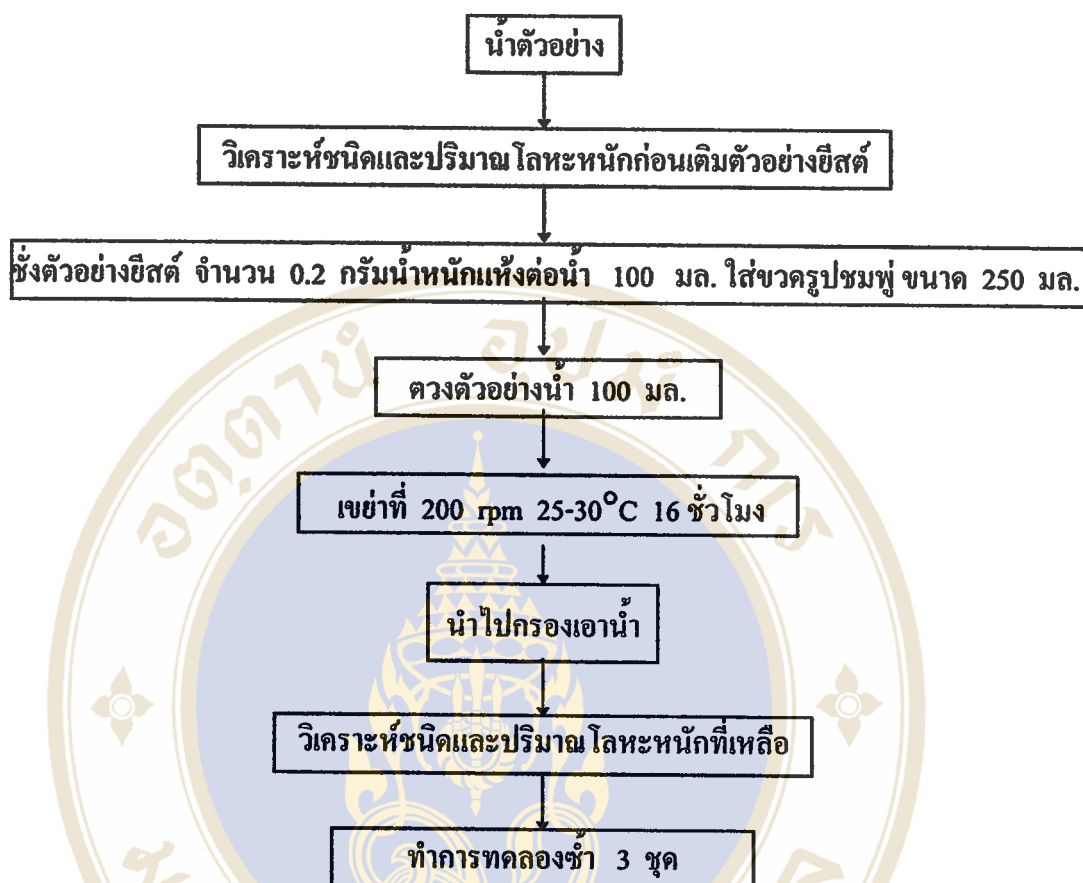
การดูดซับโลหะหนักด้วยยีสต์โดยวิธี Batch มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.5.1 ชั่งน้ำหนักกลุ่มตัวอย่างยีสต์ที่ต้องการเป็นตัวดูดซับมา 0.2 กรัม นำหนักแห้ง ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.5.2 ตวงตัวอย่างน้ำที่ต้องการศึกษาปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมนลงในขวดรูปชมพู่
ข้อ 3.5.1 และเก็บตัวอย่างน้ำไว้วิเคราะห์หาชนิดและปริมาณโลหะหนักก่อนถูกดูดซับโดยตัวอย่างยีสต์

3.5.3 นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 16 ชั่วโมง

3.5.4 เมื่อครบเวลา นำสารละลายดังกล่าว ไปกรองผ่านกระดาษกรอง 0.45 ไมครอน เก็บตัวอย่างน้ำที่กรองได้ เติมกรดไนตริกเข้มข้นเพื่อปรับให้พีเอชต่ำกว่า 2 เก็บไว้ที่ 4 องศาเซลเซียสเพื่อวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณโลหะหนักหลังถูกดูดซับโดยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ใช้ AAS รุ่น Perkin-Elmer, model 3300 ดังรูปที่



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการทดลองการดูดซับโลหะหนักโดยวิธี Batch

3.6 ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

3.6.1 การศึกษาสภาวะพืเอชในน้ำสังเคราะห์ชนิดเดียว

3.6.1.1 เตรียมน้ำสังเคราะห์โลหะที่ต้องการศึกษา ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาปรับพืเอชที่ 2-6

3.6.1.2 ชั่งตัวอย่างยีสต์กลุ่ม ก-1 ทำการดูดซับโลหะหนักโดยวิธี Batch experiment ตามข้อ 3.5.1-3.5.4

3.6.2 การศึกษาตัวอย่างยีสต์ในน้ำสังเคราะห์โลหะ

3.6.2.1 เตรียมน้ำสังเคราะห์โลหะที่ต้องการศึกษา ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาปรับพีเอชที่เหมาะสม ที่ได้จากการศึกษา ในข้อ 3.6.1

3.6.2.2 ชั่งตัวอย่างยีสต์ทั้ง 6 กลุ่ม ในแต่ละขวดรูปชมพู่ ทำการดูดซับโลหะหนักโดยวิธี Batch experiment ตามข้อ 3.5.1-3.5.4

3.6.3 การศึกษาสภาวะพีเอชในน้ำสังเคราะห์โลหะผสมและตัวอย่างยีสต์

3.6.3.1 เตรียมน้ำสังเคราะห์โลหะผสม ชนิดที่วิเคราะห์ได้จากน้ำทิ้งของโรงงานที่ความเข้มข้นของโลหะหนักอย่างละ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร นำมาปรับพีเอชที่ 2-6

3.6.3.2 ชั่งตัวอย่างยีสต์กลุ่ม ก-1 ก-2 และตัวอย่างกากยีสต์ที่ดูดซับโลหะได้ดีที่สุด 2 กลุ่มแรก ซึ่งได้จากการศึกษาในข้อ 3.6.2 ในแต่ละขวดรูปชมพู่ ทำการดูดซับโลหะหนักโดยวิธี Batch experiment ตามข้อ 3.5.1-3.5.4

3.6.4 การศึกษาตัวอย่างยีสต์ในน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์

3.6.4.1 ปรับสภาวะพีเอชของน้ำทิ้งจากโรงงานที่ได้จากการศึกษาในข้อ 3.6.3

3.6.4.2 ชั่งตัวอย่างยีสต์โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ ตามข้อ 3.6.3.2 ในแต่ละขวดรูปชมพู่ ทำการดูดซับโลหะหนักโดยวิธี Batch experiment ตามข้อ 3.5.1-3.5.4

3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผล

การวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้การวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้

1. ค่าเฉลี่ยของปริมาณโลหะหนักที่วิเคราะห์ได้
2. วิเคราะห์หาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (% Metal removal efficiency) หรือ % E โดยใช้สูตร

$$\% E = \left\{ C_i - C_f / C_i \right\} \times 100$$

โดยที่ %E = ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (เปอร์เซ็นต์)

C_i = ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของโลหะหนักหลังผ่านการดูดซับ โดยยีสต์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

3) วิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ ANOVA (Analysis of Variance) และเมื่อพบว่าข้อมูลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างแต่ละตัวอย่างแล้ว จะทำการทดสอบโดยวิธี Duncan's multiple range test ซึ่งจะทดสอบให้ทราบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก Cu Ni และ Pb ของตัวอย่างยีสต์ทั้ง 6 กลุ่มนั้น มีกลุ่มใดที่มีความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันหรือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิจารณ์ผล

ในการวิจัยการดูดซับโลหะหนักโดยใช้กากยีสต์จากโรงงานเบียร์นั้น ผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างกากยีสต์จากโรงงานเบียร์บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด และทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ก่อนผ่านการบำบัด โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของยีสต์ *S. cerevisiae* และกากยีสต์ ซึ่งผลการศึกษาที่ได้ประกอบด้วย คุณสมบัติของยีสต์และกากยีสต์ที่นำมาใช้ในการทดลอง ปริมาณโลหะหนักนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ผลของพีเอชในน้ำสังเคราะห์ต่อการดูดซับโลหะหนักโดยยีสต์ *S. cerevisiae* ผลของการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์โดยยีสต์และกากยีสต์ ผลของพีเอชกับการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์โลหะผสมโดยยีสต์และกากยีสต์ และประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์โดยยีสต์และกากยีสต์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

4.1 คุณสมบัติของยีสต์และกากยีสต์ที่นำมาใช้ในการทดลอง

กากยีสต์ (spent yeast) ที่นำมาจากโรงงานเบียร์ นำมาเช็ค viability พบว่ามีเซลล์ที่ยังมีชีวิตมากกว่าร้อยละ 95 และเมื่อนำมาขจัดความขมออก และวิเคราะห์หาค่าความขม (Bitterness) โดยใช้วิธี International method ซึ่งจากการทดลองนำกากยีสต์มาขจัดสารที่มีความขมออกจากเซลล์ยีสต์ โดยทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง ผลปรากฏว่าสามารถขจัดความขมโดยเฉลี่ยคิดเป็น 71.56 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 4-1)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความขม (Bitterness) และการขจัดความขม (เปอร์เซ็นต์)

การทดลองซ้ำครั้งที่	Bitterness		เปอร์เซ็นต์การขจัดความขม	
	ก่อนขจัดความขม	หลังขจัดความขม		เฉลี่ย
1	13.155	4.120	68.68	71.56
2	13.845	3.540	74.43	

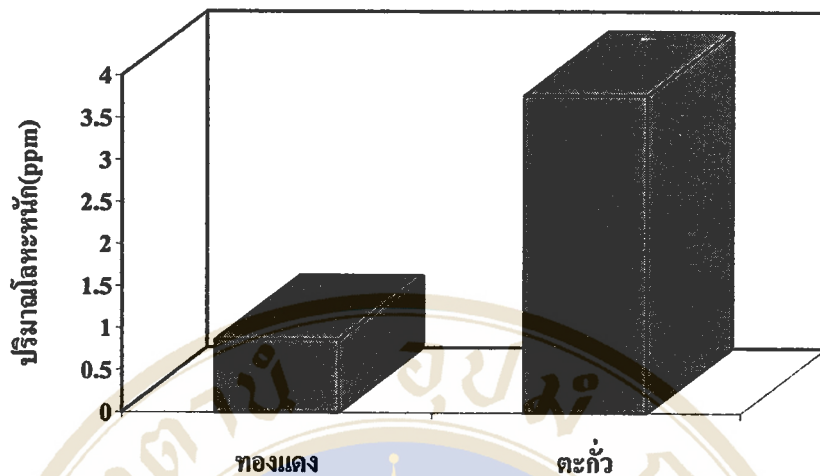
เมื่อนำยีสต์และกากยีสต์ที่ได้มาเตรียมตัวอย่างยีสต์ โดยใช้น้ำหนักยีสต์ในแต่ละตัวอย่าง 0.2 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตรแล้ว แล้วจึงนำตัวอย่างยีสต์ที่เตรียมได้หาเปอร์เซ็นต์ความชื้นของแต่ละชุดตัวอย่าง เพื่อดำเนินหาน้ำหนักของตัวอย่างยีสต์ที่ใช้จริง พบว่าตัวอย่างยีสต์คือ ยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยง ยีสต์ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ กากยีสต์ กากยีสต์ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ กากยีสต์ขจัดซอพ และกากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ มีค่าความชื้นคิดเป็น 76.55 70.94 78.80 63.90 78.78 และ 63.38 และน้ำหนักตัวอย่างยีสต์ที่ต้องใช้จริงเท่ากับ 0.8529 0.6883 0.9436 0.5544 0.9422 และ 0.5461 กรัมตามลำดับ (ตารางที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 แสดงผลเปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ยของตัวอย่างยีสต์(เปอร์เซ็นต์ moisture)และน้ำหนักยีสต์ที่ใช้ในการทดลอง (0.2 g dry weight / 100 mL)

ตัวอย่างยีสต์	เปอร์เซ็นต์ความชื้นเฉลี่ย	น้ำหนักยีสต์ที่ใช้จริง (กรัม)
<i>S. cerevisiae</i>	76.55	0.8529
<i>S. cerevisiae</i> ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์	70.94	0.6883
กากยีสต์	78.80	0.9436
กากยีสต์ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์	63.90	0.5544
กากยีสต์ขจัดซอพ	78.78	0.9422
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์	63.38	0.5461

4.2 การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

จากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ นำมาวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก นิกเกิล ทองแดง และตะกั่ว พบว่า ปริมาณนิกเกิลมีน้อยมากไม่สามารถหาค่าได้ ส่วนปริมาณโลหะทองแดง และตะกั่ว มีค่า 0.859 และ 3.764 mg/L ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณโลหะทองแดงและตะกั่วในตัวอย่างน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

4.3 ผลของพีเอชในน้ำสังเคราะห์โลหะหนักต่อการดูดซับโลหะหนักของยีสต์ *S. cerevisiae*

ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของยีสต์ *S. cerevisiae* ซึ่งมีการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักนิกเกิล ทองแดง และตะกั่ว ปรากฏผลการทดลองดังนี้

4.3.1 นิกเกิล (Ni)

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะนิกเกิลในน้ำสังเคราะห์ ณ พีเอช 2-6 ก่อนและหลังการดูดซับนิกเกิลโดย *S. cerevisiae* (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.2) พบว่า ณ พีเอช 4 ยีสต์สามารถดูดซับโลหะนิกเกิลได้มากที่สุด คิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ยเท่ากับ 60.43 โดย ณ พีเอช 2 ยีสต์จะดูดซับนิกเกิลได้เพียง 15.14 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 58.23 เปอร์เซ็นต์ ณ พีเอช 3 และสูงสุดที่พีเอช 4 หลังจากนั้นความสามารถในการดูดซับนิกเกิลของยีสต์ก็จะลดลง ณ พีเอช 5 และ 6 เป็น 42.17 และ 40.14 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

4.3.2 ทองแดง (Cu)

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ ณ พีเอช 2-6 ทั้งก่อนและหลังการดูดซับทองแดงโดย *S. cerevisiae* (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.3) พบว่า ณ พีเอช 2-6 นั้นประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงของยีสต์ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 19.28 67.89 69.50 65.55 และ

45.26 ตามลำดับ ณ พีเอช 2 ยีสต์จะดูดซับทองแดงได้เพียง 19.28 เปอร์เซ็นต์ และสูงถึงมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง pH 3-5 โดยพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงของยีสต์สูงสุดที่พีเอช 4 เท่ากับ 69.50 เปอร์เซ็นต์ แต่ ณ พีเอช 3 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงของยีสต์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับพีเอช 4 (ตาราง ก-2 ในภาคผนวก) เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 5 ประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงเริ่มลดลงเล็กน้อย (3.95%) และลดลงมากถึงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพีเอชเป็น 6

4.3.3 ตะกั่ว (Pb)

จากการวิเคราะห์ปริมาณโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ ณ พีเอช 2-6 ทั้งก่อนและหลังการดูดซับตะกั่วโดย *S. cerevisiae* (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4) พบว่า ณ พีเอช 2-6 ประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของยีสต์คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 11.63 65.16 72.94 74.81 และ 70.87 ตามลำดับ โดย ณ พีเอช 2 ยีสต์สามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้เพียง 11.63 เปอร์เซ็นต์ แต่ ณ พีเอช 3 มากถึง 65.16 เปอร์เซ็นต์ และมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 4-6 โดย ณ พีเอช 5 ยีสต์สามารถดูดซับโลหะตะกั่วได้สูงสุดถึง 74.81 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ดี ณ พีเอช 4 ยีสต์สามารถดูดซับโลหะได้สูงมากใกล้เคียงกับ ณ พีเอช 5 คือ 72.94 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันเมื่อทดสอบทางสถิติแล้ว (ตาราง ก-3 ในภาคผนวก ก)

4.3.4 สรุปผลของพีเอชต่อการดูดซับโลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วโดย *S. cerevisiae*

จากผลการศึกษาสภาวะของพีเอชในน้ำสังเคราะห์โลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว ก่อนการดูดซับโลหะหนัก โดย *S. cerevisiae* (ตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.5) พบว่า ที่พีเอช 4 ยีสต์มีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักได้มากที่สุดคือ มีประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลเป็น 60.43 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ทองแดงพบว่ามีประสิทธิภาพสูงสุด (69.50 %) ณ พีเอช 4 ซึ่งไม่ได้แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับประสิทธิภาพ ณ พีเอช 3 ส่วนน้ำสังเคราะห์ตะกั่วพบว่าในช่วงพีเอช 4-6 นั้น ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วโดยยีสต์สูงมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ และสูงถึง 74.81 เปอร์เซ็นต์ที่พีเอช 5 แต่ ณ พีเอช 4 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของยีสต์ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับพีเอช 5 เท่ากับ 72.94 เปอร์เซ็นต์

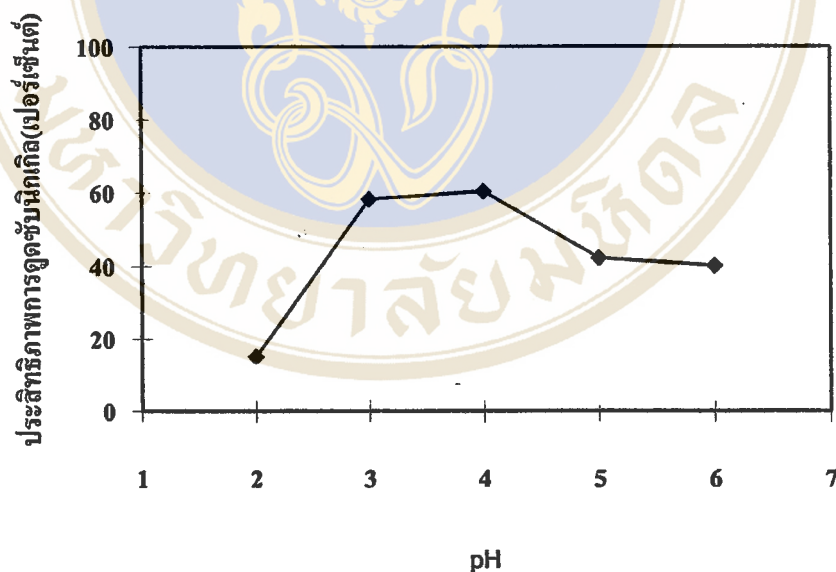
เมื่อพิจารณาความสามารถของยีสต์ในการดูดซับโลหะพบว่ายีสต์จะดูดซับตะกั่วได้มากกว่าทองแดงและนิกเกิล ($Pb > Cu > Ni$) คือ 75 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ($75 > 70 > 60$) ตามลำดับ โดยช่วงพีเอชที่ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วได้สูงสุดคือ พีเอช 4 3-4 และ 4-5 ตามลำดับ และเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นถึง 6 ความสามารถในการดูดซับโลหะจะลดลง ซึ่งจาก

การศึกษา โดย Huang & et al.(1990: 433-9) ถึงความสามารถของ *S. cerevisiae* ในการดูดซับโลหะทองแดงพบว่าช่วงพีเอช 5-7 เป็นช่วงที่มีการดูดซับโลหะทองแดงได้ดีที่สุด แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลงเมื่อพีเอชมากกว่า 7 ในขณะที่ Duncan JR.& et al(1993: 149-154) พบว่าความสามารถในการดูดซับทองแดงของ *S. cerevisiae* ณ พีเอช 5 จะดูดซับทองแดงได้มากขึ้นอย่างรวดเร็ว และที่พีเอช 7-9 ก็จะลดลงอย่างรวดเร็ว และจากการศึกษา การศึกษาในเรื่องของปัจจัยพีเอชที่มีต่อการดูดซับโลหะหนักทองแดงโดย Chen P. & Ting Y.P. (1995: 107-12) ได้กล่าวว่า ณ พีเอชมากกว่า 7 ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงได้นั้น น่าจะเป็นผลมาจากการที่พีเอชมากกว่า 7 จะมีผลต่อการแตกตัวของโลหะกับหมู่ไฮดรอกซี (hydroxy group) ทำให้การดูดซับลดลง โดยสรุปแล้วในงานวิจัยต่างๆพบว่า โดยส่วนใหญ่ยีสต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงที่พีเอช 5-7 หลังจากนั้นความสามารถในการดูดซับก็จะลดลงอย่างมาก ซึ่งต่างจากผลการศึกษาที่ยีสต์จะมีความสามารถในการดูดซับโลหะที่ช่วงพีเอช 3-5 ซึ่งน่าจะเกิดจากคุณสมบัติเฉพาะของตัวยีสต์ที่ใช้ศึกษา ซึ่งมาจากการแยกตัวยีสต์จากกากยีสต์ที่ผ่านกระบวนการหมักเบียร์แล้ว แต่อย่างไรก็ตามแนวโน้มของพีเอชในการดูดซับโลหะจะลดลงเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้นเข้าใกล้ 7 และที่พีเอช 2 พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วจะลดลงอย่างมากซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Machale A.P.& Machale S. (1994: 647-52)เกี่ยวกับการดูดซับเรเดียมโดย *Penicillium chrysogenum* ว่า ความสามารถในการดูดซับเรเดียมโดย *P. chrysogenum* จะดูดซับได้น้อยหรือไม่ได้เลยที่พีเอช 2 แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น โดยความสามารถในการดูดซับจะมากที่สุด ณ พีเอช 7 และจากการศึกษาของ Larsson และคณะในปี 1992 พบว่า brewery yeast สามารถดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆได้มากถึง 63-97 เปอร์เซ็นต์ ณ พีเอช 5-6 แต่จะลดลงอย่างมาก ณ พีเอช 1-2 และเช่นเดียวกับการศึกษาของ Galun และคณะที่พบว่า พีเอชสูงจะทำให้ความสามารถของ *P. digitalum* ในการดูดซับโลหะนิกเกิล สังกะสี แคดเมียมและตะกั่วเพิ่มขึ้น แต่จะถูกยับยั้งเมื่อพีเอชต่ำกว่า 3 (Kapoor A.&Viraraghavan T. , 1995: 195-206) และจากการศึกษาในปี 1996 ของ Lu และWilkins (1996: 165-79) ซึ่งกล่าวว่าความสามารถในการดูดซับโลหะขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย โดยจะมีผลต่อความสามารถในการแข่งขันการจับกันของประจุบวกซึ่งเป็นผลมาจากไฮโดรเนียมไอออน

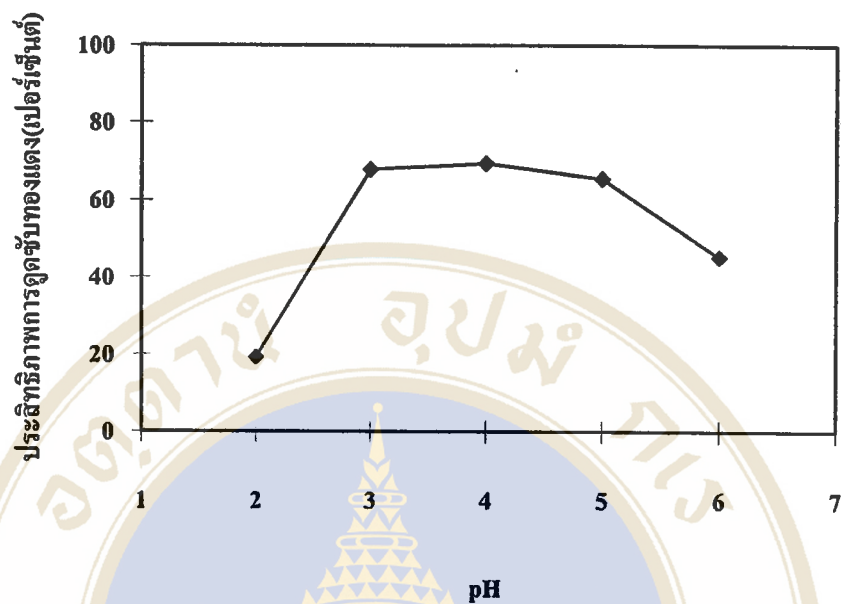
จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับโลหะหนักโดยยีสต์ *S. cerevisiae* ซึ่งขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย โดยยีสต์จะดูดซับโลหะตะกั่วได้มากกว่าทองแดงและนิกเกิล ($Pb > Cu > Ni$) คือ $75 > 70 > 60$ เปอร์เซ็นต์ ณ พีเอช 4 3-4 และ 4-5 ตามลำดับ ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของยีสต์ ซึ่งสามารถดูดซับโลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วได้สูงสุดร่วมกันคือ ณ พีเอช 4

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักเกิด ทองแดงและตะกั่ว (เปอร์เซ็นต์) ในน้ำสังเคราะห์ ที่มีความเข้มข้นของโลหะ 10 mg/L ในแต่ละตัวอย่างน้ำโดยตัวอย่างยีสต์ *S. cerevisiae* 0.2 กรัมน้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร

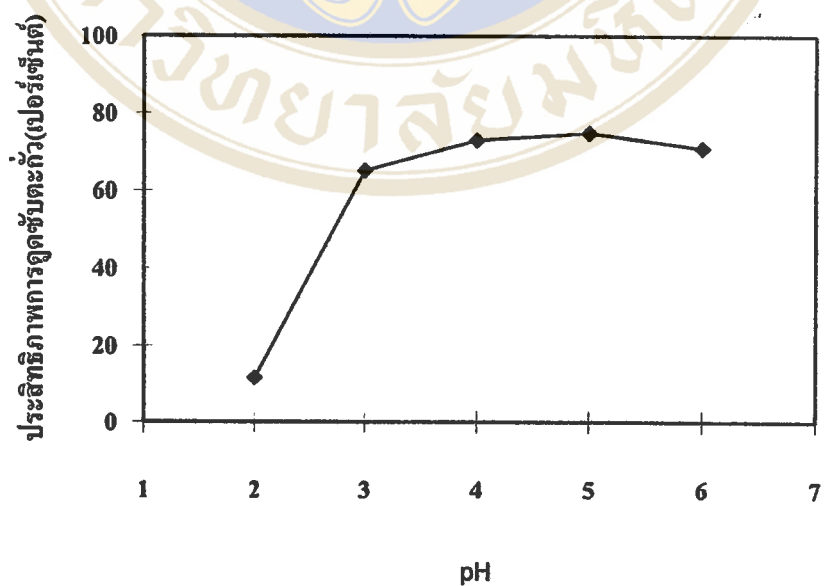
pH	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ โดย <i>S. cerevisiae</i> (เปอร์เซ็นต์)		
	Ni	Cu	Pb
2	15.15	19.28	11.63
3	58.23	67.89	65.16
4	60.43	69.50	72.94
5	42.17	65.55	74.81
6	40.14	45.26	70.87



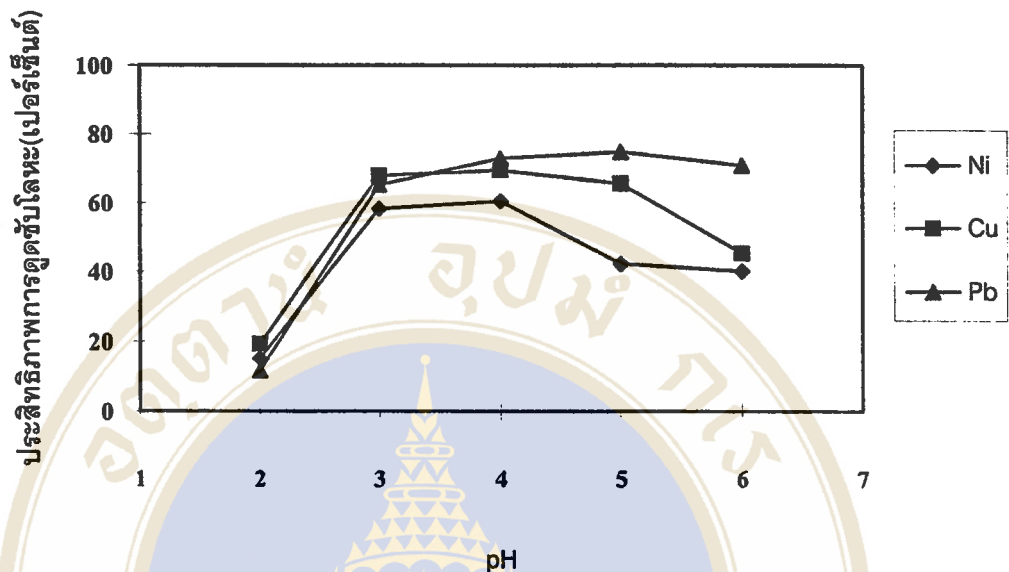
รูปที่ 4.2 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับหนักเกิดของ *S. cerevisiae*
ที่มา : จากตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงของ *S. cerevisiae*
ที่มา : จากตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.4 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วของ *S. cerevisiae*
ที่มา : จากตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.5 แสดงประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วโดย *S. cerevisiae*
ที่มา : จากตารางที่ 4.3

4.4 ผลของการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์โดยยีสต์และกากยีสต์

จากผลการศึกษาในข้อ 4.3 โดยศึกษาปัจจัยของพีเอชกับประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ นิกเกิล ทองแดงและตะกั่วโดยยีสต์ *S. cerevisiae* พบว่า ณ พีเอช 4 เป็นสถานะที่ได้ ประสิทธิภาพสูงสุดของการดูดซับโลหะนิกเกิลและทองแดง ส่วนโลหะตะกั่วพบในช่วงพีเอช 4-5 ให้ประสิทธิภาพการดูดซับเป็น 72.94 และ 74.81 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้พีเอช 4 ในการเตรียมน้ำสังเคราะห์โลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว โดยแต่ละตัวอย่างน้ำสังเคราะห์มีความเข้มข้นของโลหะ 10 mg/L โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ทั้ง 6 ทริทเมนต์ ทำการดูดซับ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักนิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว โดยตัวอย่างยีสต์ในแต่ละทริทเมนต์โดยปรากฏผลการทดลอง ดังนี้

4.4.1 ผลการดูดซับโลหะนิกเกิลกับตัวอย่างยีสต์

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะนิกเกิล ณ ความเข้มข้น 10 mg/L พีเอช 4 โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 6 ทริทเมนต์ รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างยีสต์

ทรีทเมนต์	ลักษณะของตัวอย่างยีสต์	สัญลักษณ์
1	ยีสต์ <i>S. cerevisiae</i>	Y
2	<i>S. cerevisiae</i> และผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์	TY
3	กากยีสต์ (spent brewer's yeast)	SPY
4	กากยีสต์และผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์	TSPY
5	กากยีสต์ขจัดซอพออก	H
6	กากยีสต์ขจัดซอพอและผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์	TH

ให้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 พบว่า ณ พีเอช 4 ยีสต์ *S. cerevisiae* สามารถดูดซับนิกเกิลได้ดีที่สุด คือ มีประสิทธิภาพการดูดซับ 60.43 เปอร์เซ็นต์ เมื่อยีสต์ผ่านการทรีท (กระบวนการปรับสภาพเซลล์) มีประสิทธิภาพการดูดซับ 50.50 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลต่างกันระหว่างยีสต์ที่ทรีทและไม่ทรีท โดยยีสต์ที่ไม่ทรีทให้ผลประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าถึงประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์

ส่วนกากยีสต์โดยทั่วไปให้ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลต่ำกว่ายีสต์ โดยกากยีสต์ประสิทธิภาพของการดูดซับนิกเกิลเท่ากับ 34.55 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำกากยีสต์ผ่านการทรีทจะมีประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล (36.67 %) เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย คือ 2.12 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำกากยีสต์มาขจัดซอพอออกประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล (37.37 %) เพิ่มขึ้น 2.82 เปอร์เซ็นต์ และกากยีสต์ขจัดซอพอออกผ่านการทรีทให้ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล (38.78 %) เพิ่มขึ้นเพียง 1.41 เปอร์เซ็นต์ โดยกากยีสต์ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ (36.67 %) และขจัดซอพอออกแล้ว (37.37 %) จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ค-4 ในภาคผนวก ค) แต่จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าเล็กน้อยจากกากยีสต์ (34.55%) และเมื่อนำกากยีสต์ที่ขจัดซอพอแล้วไปผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์จะพบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับไม่เพิ่มขึ้น (38.78%) แต่จะสูงกว่ากากยีสต์

จะเห็นว่า กากยีสต์โดยทั่วไปให้ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลต่ำกว่ายีสต์ ส่วนกระบวนการปรับสภาพเซลล์ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพของกากยีสต์เพียงเล็กน้อย แต่ไม่ช่วยส่งเสริมการดูดซับนิกเกิลโดยยีสต์ สำหรับการขจัดซอพอออกจากกากยีสต์ไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล

4.4.2 ผลการดูดซับโลหะทองแดงกับตัวอย่างยีสต์

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง ณ ความเข้มข้น 10 mg/L ที่พีเอช 4 โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 6 ทริทเมนต์ ให้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 จากตัวอย่างยีสต์ทั้ง 6 ทริทเมนต์ พบว่า ยีสต์ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์มีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงดีที่สุด คือ 80.15 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงของยีสต์ กากยีสต์ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ กากยีสต์ขจัดซอพและกากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ เท่ากับ 69.50 53.48 60.17 53.63 และ 60.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

กากยีสต์และกากยีสต์ขจัดซอพ มีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงเท่ากับ 53.48 และ 53.63 เปอร์เซ็นต์ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตาราง ค-5 ในภาคผนวก ค) แต่เมื่อนำกากยีสต์และกากยีสต์ขจัดซอพมาผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงของกากยีสต์ที่ทริท (53.48 %) และที่ขจัดซอพออกแล้วนำไปทริท (53.68 %) ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือเพิ่มขึ้น 6.69 และ 6.76 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ สำหรับยีสต์เมื่อนำมาผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ก็ให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 10.65 เปอร์เซ็นต์

แสดงให้เห็นว่า การดูดซับทองแดงนั้น ยีสต์จะมีประสิทธิภาพดีกว่ากากยีสต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งยีสต์ที่ผ่านการปรับสภาพเซลล์ด้วยความร้อน ในขณะที่กากยีสต์เองนั้นไม่ว่าจะมีการขจัดซอพหรือไม่ก็ตาม ก็จะทำให้ผลไม่แตกต่างกัน แต่จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำไปผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์

4.4.3 ผลการดูดซับโลหะตะกั่วกับตัวอย่างยีสต์

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว ณ ความเข้มข้น 10 mg/L ที่พีเอช 4 โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 6 ทริทเมนต์ ให้ผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.8 ดังนี้คือ จากตัวอย่างยีสต์ทั้ง 6 ทริทเมนต์ พบว่า ยีสต์มีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วดีที่สุด ถึง 72.94 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของยีสต์ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ กากยีสต์ กากยีสต์ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ กากยีสต์ขจัดซอพและกากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ เท่ากับ 69.20 , 63.61 , 59.51 และ 65.09 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

เมื่อพิจารณากากยีสต์และกากยีสต์ขจัดซอพ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่ว เท่ากับ 60.01 และ 59.51 เปอร์เซ็นต์ซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตาราง ค-6 ในภาคผนวก ค) แต่เมื่อนำกากยีสต์และกากยีสต์ขจัดซอพออกมาผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์พบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพ เป็น 63.61 และ 65.09 เปอร์เซ็นต์ คือเพิ่มขึ้น 3.60 และ 6.00 เปอร์เซ็นต์ ตาม

ลำดับ แต่ยีสต์ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์มีประสิทธิภาพการดูดซับ (69.20%) ลดลงเล็กน้อยคือ 3.74 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองโดยทั่วไป พบเช่นเดียวกับทองแดงที่ยีสต์จะมีประสิทธิภาพดีกว่ากากยีสต์ แต่ยีสต์ที่ผ่านการทรีทแล้ว (69.20 %) กลับให้ผลของประสิทธิภาพลดลง ส่วนกากยีสต์ไม่ว่าจะขจัดซอพออกหรือไม่ จะมีความสามารถในการดูดซับตะกั่วไม่แตกต่างกัน (60.01, 59.51) ทางสถิติ (ตาราง ค-6 ในภาคผนวก ค) และเมื่อกากยีสต์ดังกล่าวถูกนำไปผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์พบว่าประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (63.61 %, 65.09 %) ทั้งสองกรณี แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ค-6 ในภาคผนวก ค)

4.4.5 สรุปประสิทธิภาพการดูดซับโลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วโดยตัวอย่างยีสต์

จากผลการศึกษาความสามารถของตัวอย่างยีสต์ทั้ง 6 ทรีทเมนต์ ต่อการดูดซับโลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว ดังแสดงในและตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.9 พบว่า ยีสต์มีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว เท่ากับ 60.43 , 69.50 และ 72.94 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับโดยยีสต์สามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด รองลงมาคือทองแดงและนิกเกิล ($Pb > Cu > Ni$) แต่เมื่อนำยีสต์มาผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ พบว่า กระบวนการปรับสภาพเซลล์ส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดง (80.15%) เพิ่มขึ้น 10.65 เปอร์เซ็นต์ แต่ลดประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะนิกเกิลและตะกั่ว (50.50%, 69.20%) ลดลง 9.93 และ 3.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

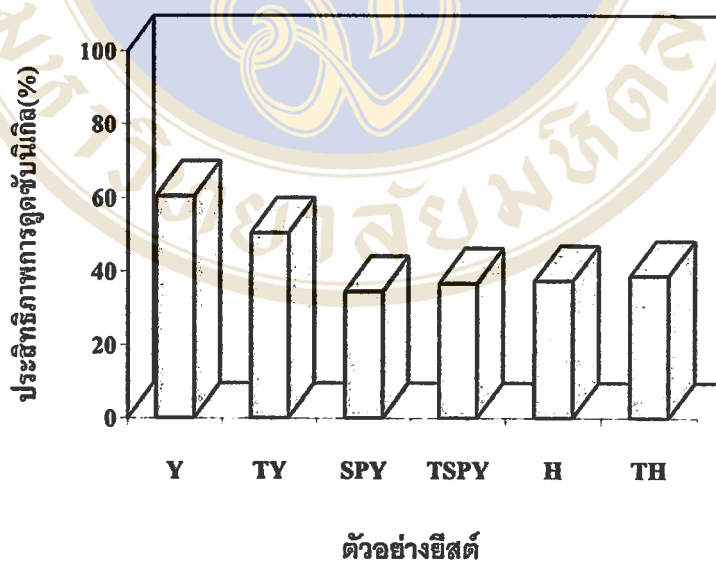
กากยีสต์พบว่ามีประสิทธิภาพโดยทั่วไปต่ำกว่ายีสต์ กากยีสต์สามารถดูดซับโลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว เป็น 34.55 , 53.48 และ 60.01 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยกากยีสต์สามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด รองลงมาคือ ทองแดงและนิกเกิล ตามลำดับ ($Pb > Cu > Ni$) เช่นเดียวกับยีสต์ กากยีสต์ที่เมื่อผ่านการทรีทด้วยความร้อน (36.67 %) และขจัดซอพออกแล้ว (37.37 %) จะให้ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลของกากยีสต์และที่ขจัดซอพออกไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตารางที่ ค-4 ในภาคผนวก ค) แต่จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าเล็กน้อยจากกากยีสต์ (34.55 %) และกากยีสต์ที่ขจัดซอพแล้วนำไปทรีท จะพบว่าประสิทธิภาพไม่เพิ่มขึ้น (38.78 %) สำหรับทองแดงและตะกั่วก็เช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่า การดูดซับทองแดงและตะกั่วโดยกากยีสต์เองนั้นไม่ว่าจะมีการขจัดซอพหรือไม่ก็ตาม จะให้ผลไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ ค-5 และ ค-6 ในภาคผนวก ค) แต่จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย เมื่อนำไปผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ กล่าวได้ว่า การขจัดซอพออกจากกากยีสต์ซึ่งสามารถขจัดซอพออกจากกากยีสต์ได้เฉลี่ย 71.56% (ตารางที่ 4.1) พบว่าไม่เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่ว

โดยสรุปจากผลการศึกษากลุ่มตัวอย่างยีสต์และกากยีสต์ทั้งหมดพบว่า การใช้กระบวนการปรับสภาพเซลล์ในยีสต์และกากยีสต์ทั้งที่จัดหยาและไม่จัดหยา จะช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับนิกเกิล ทองแดงและตะกั่ว ยกเว้นในยีสต์ที่ผ่านการทรีทจะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลและตะกั่วลดลง ซึ่งจากการศึกษาโดยรวมพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะโดยเซลล์ตาย (dead cell) ขึ้นอยู่กับการเลือกใช้วิธีทรีทเมนต์และโครงสร้างของผนังเซลล์ในชีวมวลนั้นๆ (Gadd GM., 1990: 249-75) โดยการศึกษาส่วนใหญ่แล้วพบว่าการใช้ทรีทเมนต์ทั้งทางกายภาพและทางเคมีจะช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก (Kapoor A. & Virraraghavant T., 1995: 195-206) เช่นการศึกษาของ HUANG และคนอื่นๆ (1990: 433-9) เกี่ยวกับการดูดซับทองแดงยีสต์ *S. cerevisiae* ไปผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ โดยแบ่งเป็น 2 วิธี คือวิธีทางกายภาพโดยใช้ความร้อนและทางเคมี จากการศึกษาพบว่า ทั้งวิธีทางกายภาพและเคมีนั้นสามารถดูดซับทองแดงได้ในปริมาณไม่แตกต่างกัน สำหรับยีสต์ที่ผ่านการทรีทแล้วมีประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิล (กว่า 10%) และตะกั่ว (กว่า 3%) ลดลง สำหรับตะกั่วถือว่าแตกต่างไม่ชัดเจน แต่สำหรับนิกเกิลแล้วน่าจะเกิดจากลักษณะเฉพาะของโลหะนิกเกิลเองก็เป็นได้ เพราะนอกจากทรีทเมนต์จะช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักแล้วพบว่า ในโลหะหนักต่างชนิดที่ใช้ศึกษาก็ให้ผลไม่เหมือนกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาผลของทรีทเมนต์ในการดูดซับโลหะตะกั่ว แคลเมียม ทองแดงและนิกเกิลโดย *Aspergillus niger* ของ Kapoor A. & Virraraghavan T. (1998: 109-13) ในปี 1998 พบว่า *Aspergillus niger* ที่ผ่านการทรีททำให้การดูดซับโลหะตะกั่ว แคลเมียมและทองแดง ($Pb > Cd > Cu$) ได้ดีกว่าที่ไม่ทรีท แต่จะทำให้การดูดซับโลหะนิกเกิลลดลง โดยการใช้ด่างจะมีผลต่อไคติน บนผนังเซลล์ ทำให้ความสามารถของไคโตแซน-กลูแคน (chitosan-glucan) เกาะจับกับโลหะหนักได้ดีขึ้น

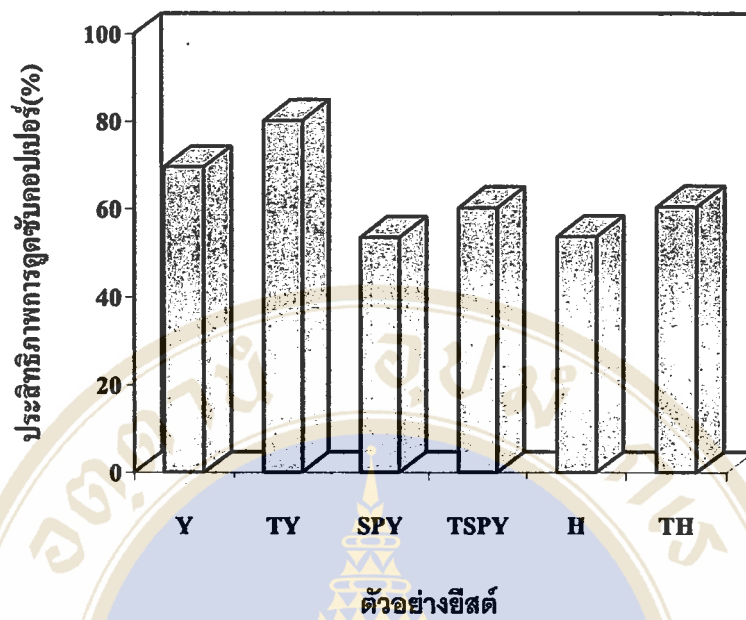
ส่วนการจัดหยาออกจากกากยีสต์พบว่า ไม่ทำให้ความสามารถในการดูดซับทองแดงและตะกั่วเพิ่มขึ้น ยกเว้นนิกเกิล โดยวิธีการจัดหยาออกจากกากยีสต์โดยใช้ด่าง สามารถจัดหยาออกจากกากยีสต์ได้เฉลี่ย 71.56% (ตารางที่ 4.1) นั้น น่าจะมีผลต่อผนังเซลล์ของกากยีสต์ซึ่งมีผลต่อตำแหน่งการจับกับไอออนบวกของโลหะ ทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะเปลี่ยนแปลงไป โดยอาจเพิ่มหรือลดหรือไม่ช่วยส่งเสริมกลไกการดูดซับเลย ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆอีก เช่น ชนิดของโลหะหนัก วิธีการปรับสภาพเซลล์ คุณสมบัติของกากยีสต์ในกระบวนการผลิตเบียร์ รวมถึงวิธีการเพาะเลี้ยงยีสต์ ยีสต์ในกระบวนการหมัก กากยีสต์หลังกระบวนการผลิตซึ่งอาจจะมีผลต่อผนังเซลล์ยีสต์ ทำให้องค์ประกอบของผนังเซลล์เปลี่ยนแปลง ดังนั้นความสามารถในการดูดซับจึงเปลี่ยนแปลงไป

ตารางที่ 4.5 ผลของทริทเมนต์ของตัวอย่างยีสต์ต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะนิกเกิล ทองแดง และตะกั่ว ในน้ำสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นโลหะ 10 mg/L ณ พีเอช 4 ในแต่ละตัวอย่างน้ำ โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร

ตัวอย่างยีสต์	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ โดย <i>S. cerevisiae</i> (เปอร์เซ็นต์)		
	Ni	Cu	Pb
Y	60.43	69.50	72.94
TY	50.50	80.15	69.20
SPY	34.55	53.48	60.01
TSPY	36.67	60.17	63.61
H	37.37	53.63	59.51
TH	38.78	60.39	65.09

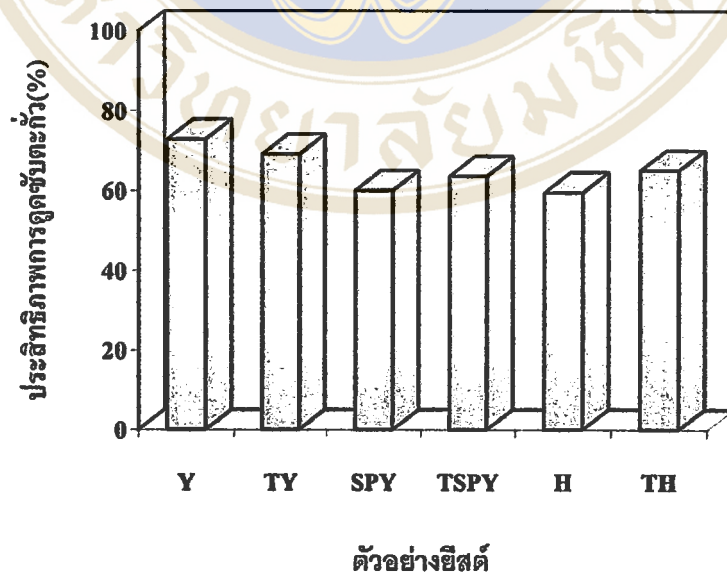


รูปที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิลที่ความเข้มข้น 10 mg/L ณ พีเอช 4 โดยตัวอย่างยีสต์
ที่มา : จากตารางที่ 4.5



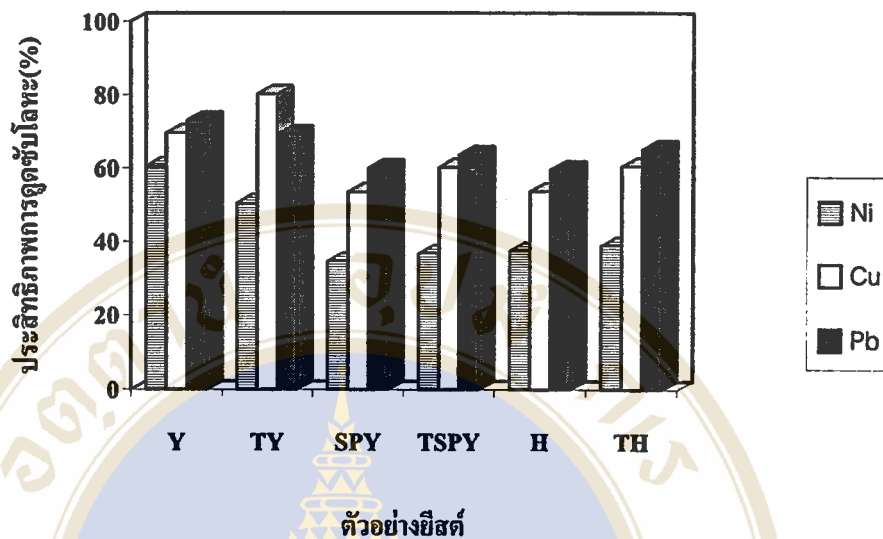
รูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงที่ความเข้มข้น 10 mg/L ณ พีเอช 4 กับตัวอย่างยีสต์

ที่มา : จากตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 mg/L ณ พีเอช 4 กับตัวอย่างยีสต์

ที่มา : จากตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วที่ความเข้มข้นโลหะ 10 mg/L ณ พีเอช 4 กับตัวอย่างยีสต์ที่มา : จากตารางที่ 4.5

4.5 ผลของพีเอชกับการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์โลหะผสม โดยยีสต์และกากยีสต์

การศึกษาปัจจัยของพีเอช ต่อการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์โลหะผสม โดยตัวอย่างยีสต์และกากยีสต์ โดยน้ำสังเคราะห์โลหะผสมจะประกอบด้วย โลหะทองแดงและตะกั่วอยู่ในสารละลายที่ความเข้มข้น 10 mg/L ซึ่งไม่มีโลหะนิกเกิลละลายอยู่ด้วย เนื่องจากการเตรียมน้ำสังเคราะห์โลหะผสมนั้น ต้องการเตรียมชนิดของโลหะหนักตามโลหะที่มีอยู่ในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ และจากการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วในน้ำทิ้งก่อนการบำบัดของโรงงาน แสดงในข้อ 4.2 พบว่า มีปริมาณของนิกเกิลน้อยมากจนไม่สามารถวัดค่าได้โดยวิธี AAS ดังนั้นในการเตรียมน้ำสังเคราะห์จึงเตรียมเฉพาะโลหะทองแดงกับตะกั่ว

ส่วนตัวอย่างยีสต์และกากยีสต์ที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนักนั้น จะใช้ตัวอย่างยีสต์ *S. cerevisiae* ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ และตัวอย่างกากยีสต์ที่ใช้นั้นเมื่อพิจารณาจากผลการทดลองในหัวข้อ 4.4 ซึ่งพบว่า ตัวอย่างกากยีสต์ทั้ง 4 ทริทเมนต์ นั้น สามารถดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วได้ดี โดยตัวอย่าง กากยีสต์, กากยีสต์ขัดซอพที่ผ่านการปรับสภาพเซลล์ สามารถดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วได้ดีกว่าที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ แต่

อย่างไรก็ตาม เพื่อศึกษาถึงข้อมูลเบื้องต้นของกากยีสต์ในการดูดซับโลหะหนัก ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ตัวอย่างกากยีสต์ทั้ง 4 ชุด คือ กากยีสต์ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ และกากยีสต์จัดหอยออกทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ รวมกับตัวอย่างยีสต์ *S. cerevisiae* อีก 2 ทริทเมนต์ รวมเป็นตัวอย่างยีสต์ที่ใช้ศึกษา 6 ชุด ทริทเมนต์

จากผลการศึกษาปัจจัยของพีเอชต่อการดูดซับนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วโดยยีสต์ในน้ำสังเคราะห์เดี่ยวในหัวข้อ 4.3 พบว่า ประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับโลหะหนักโดยยีสต์จะดูดซับโลหะตะกั่วได้มากกว่าทองแดงและนิกเกิล ($Pb > Cu > Ni$) คือ $75 > 70 > 60$ เปอร์เซ็นต์ ณ พีเอช 3-4 และ 4-5 ตามลำดับ แต่ที่พีเอช 2 ประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล ทองแดง และตะกั่วจะลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในการศึกษาปัจจัยของพีเอชในน้ำสังเคราะห์ผสม จึงเลือกศึกษาปัจจัยของพีเอชในช่วง 3-6 โดยผลการศึกษาปัจจัยของพีเอชต่อการดูดซับโลหะหนัก ในน้ำสังเคราะห์โลหะผสมทองแดงและตะกั่วที่ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ทั้ง 6 ทริทเมนต์ ผู้วิจัยขอแยกพิจารณาผลตามชนิดของโลหะ ปรากฏดังต่อไปนี้

4.5.1 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโดยตัวอย่างยีสต์

ผลของพีเอชที่ 3-6 ต่อความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงที่ความเข้มข้น 10 mg/L ในน้ำสังเคราะห์ที่มีโลหะตะกั่วละลายผสมอยู่ที่ความเข้มข้น 10 mg/L เท่ากัน โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 6 ทริทเมนต์ (ตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.10) พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว โดยยีสต์ *S. cerevisiae* ณ พีเอช 3-6 เท่ากับ 64.04 69.22 64.17 และ 44.75 ตามลำดับ และ ณ ช่วงพีเอช 3-5 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงมากกว่า 64 เปอร์เซ็นต์และสูงสุดที่พีเอช 4 (69.22 %) เมื่อนำยีสต์ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในช่วงพีเอช 3-6 เท่ากับ 44.62 80.29 84.35 และ 85.38 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งให้ค่าสูงสุดในช่วงพีเอช 6 (85.38 %) แต่อย่างไรก็ดี ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในช่วงพีเอช 4-6 ให้ค่าเพิ่มขึ้นเกิน 80 เปอร์เซ็นต์ โดยยีสต์ที่เมื่อผ่านการทริท จะให้ประสิทธิภาพ การดูดซับสูงขึ้น ยกเว้น ณ พีเอช 3 ยีสต์ที่ผ่านการทริทมี ประสิทธิภาพการดูดซับลดลง

กากยีสต์เมื่อนำมาจัดหอยออกพบว่า ณ พีเอช 3-4 ประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ค-7 และ ค-8 ในภาคผนวก ค) แต่เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น (ณ พีเอช 5-6) กากยีสต์ที่จัดหอยออกมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลง ($>2\%$) เพียงเล็กน้อย ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า การจัดหอยไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสม

สำหรับกากยีสต์และกากยีสต์ที่ผ่านการทรีทพบว่า ณ พีเอช 3 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงโดยกากยีสต์ (51.38%) ให้ผลดีกว่ากากยีสต์ที่ผ่านการทรีท (31.03%) ถึงกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น กากยีสต์ที่ผ่านการทรีทจะมีประสิทธิภาพสูงกว่ากากยีสต์และสูงสุดที่พีเอช 6 (78.04 %) ส่วนกากยีสต์ที่ขจัดของก็เช่นเดียวกันคือ ณ พีเอชมากกว่า 4 กากยีสต์ที่ขจัดของออกและผ่านการทรีท (61.37%) จะมีประสิทธิภาพดีกว่าที่ไม่ทรีท (53.10%) และมีประสิทธิภาพสูงสุดที่พีเอช 6 (69.68%, 61.61%) ดังนั้น กากยีสต์และกากยีสต์ที่ขจัดของทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น

แสดงให้เห็นว่า กากยีสต์โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพต่ำกว่ายีสต์ โดยยีสต์และกากยีสต์จะมีความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงเพิ่มขึ้น เมื่อพีเอชสูงขึ้น โดยพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของยีสต์และกากยีสต์สูงสุด ณ พีเอช 6 ยกเว้นยีสต์ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงในช่วงพีเอช 3-5 และสูงสุดที่พีเอช 4

4.5.2 ผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโดยตัวอย่างยีสต์

ผลของพีเอชที่ 3-6 ต่อความสามารถในการดูดซับโลหะตะกั่วที่ความเข้มข้น 10 mg/L ในน้ำสังเคราะห์ที่มีโลหะทองแดงละลายผสมอยู่ที่ความเข้มข้น 10 mg/L เท่ากัน โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 6 ทรีทเมนต์ (ตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.11) พบว่า

ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโดยยีสต์ ณ พีเอช 3-6 เท่ากับ 59.80 70.21 71.80 และ 67.95 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับโดยที่พีเอช 4 (70.21 %) มีประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างทางสถิติ (ตาราง ค-16 ในภาคผนวก ค) กับพีเอช 5 และ 6 (71.80 % และ 67.95 %) ดังนั้นยีสต์จะดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุดในช่วงพีเอช 4-6 เมื่อใช้ยีสต์ที่ผ่านการทรีทพบว่า ที่พีเอช 4-5 ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว (68.63%, 69.91%) ให้ผลไม่แตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับยีสต์ (ตาราง ค-12 และ 13 ในภาคผนวก ค) ยกเว้นที่พีเอช 3 (29.04 %) ที่ประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก แต่ที่พีเอช 6 ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นสูงสุด (73.55 %)

กากยีสต์โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพต่ำกว่ายีสต์ กากยีสต์เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์จะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ยกเว้นที่พีเอช 4 ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ค-12) เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น กากยีสต์จะมีประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและดูดซับได้มากที่สุดที่พีเอช 6 ส่วนกากยีสต์เมื่อขจัดของออกพบว่า ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ค-11,12,13 และ 14 ในภาคผนวก ค)เมื่อเทียบกับกากยีสต์

โดยสรุปแล้วยีสต์และกากยีสต์จะมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วได้ดี ในช่วงพีเอช 4-6

4.5.3 สรุปผลของพีเอชต่อความสามารถในการดูดซับโลหะผสมตะกั่วและทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสม ณ ความเข้มข้นของโลหะชนิดละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์

เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษา พีเอช 3-6 กับความสามารถในการดูดซับโลหะผสมทองแดงและตะกั่วโดยยีสต์ *S. cerevisiae* พบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วจะเพิ่มสูงในช่วงพีเอช 3-5 และ 4-6 ตามลำดับและสูงสุดที่พีเอช 4 ในทองแดงและพีเอช 4-6 ในตะกั่ว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของยีสต์ในน้ำสังเคราะห์เดี่ยว แต่เมื่อนำยีสต์มาผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ พบว่า จะมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงได้เพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ไม่เพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว

ส่วนพีเอช 3-6 กับความสามารถในการดูดซับโลหะผสมทองแดงและตะกั่วโดยกากยีสต์ทั้ง 4 ทริทเมนต์ พบว่า ณ พีเอช 3 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงของกากยีสต์ และกากยีสต์ที่ขจัดซอฟที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์จะลดลง แต่เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วให้ผลไม่แตกต่างกันในกากยีสต์ทั้ง 4 ทริทเมนต์ จึงกล่าวได้ว่า การขจัดซอฟไม่ช่วยส่งเสริมความสามารถของกากยีสต์ ในการดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำผสม ซึ่งอาจเกิดจากการใช้ด่างล้างเซลล์ยีสต์ในกากยีสต์ ไม่มีผลต่อโครงสร้างเซลล์หรืออาจจะมีผลต่อเซลล์ แต่ไม่ใช่ตำแหน่งที่จะเสริมกลไกการดูดซับทองแดงและตะกั่วก็เป็นได้

โดยสรุปแล้ว กระบวนการปรับสภาพเซลล์มีผลต่อความสามารถของยีสต์ ในการดูดซับทองแดงและตะกั่วได้แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Kapoor A. & Viraraghavan T. (1998: 109-13) พบว่า ทริทเมนต์ของเซลล์มีผลต่อความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก โดยโลหะหนักต่างชนิดกัน ประสิทธิภาพการดูดซับให้ผลไม่เหมือนกัน โดยการศึกษาผลทริทเมนต์เซลล์ *Aspergillus niger* ในการดูดซับโลหะตะกั่ว แคดเมียม ทองแดงและนิกเกิล โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ฟอรัมาลดีไฮด์ dimethyl sulphoxide และ detergent เป็นตัวทริท ผลการศึกษาพบว่า การทริททำให้การดูดซับโลหะตะกั่ว แคดเมียม และทองแดงดีขึ้นกว่าไม่ทริท แต่จะทำให้การดูดซับโลหะนิกเกิลลดลง ทริทเมนต์ทำให้การดูดซับโลหะตะกั่ว แคดเมียมและทองแดงได้ดีขึ้นกว่าไม่ทำทริทเมนต์ แต่จะทำให้การดูดซับโลหะนิกเกิลลดลง

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่ว ในน้ำสังเคราะห์โลหะเดี่ยวกับน้ำสังเคราะห์โลหะผสม ณ พีเอช 4 โดยยีสต์ *S. cerevisiae* พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับไม่แตกต่างกัน คือ ในน้ำสังเคราะห์โลหะทองแดงเดี่ยว กับน้ำสังเคราะห์โลหะทองแดงผสม วิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงเท่ากับ 69.50 และ 69.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนในน้ำสังเคราะห์โลหะตะกั่วเดี่ยวกับน้ำสังเคราะห์โลหะตะกั่วผสม วิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับ

ตะกั่วได้เท่ากับ 72.94 และ 70.21 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงกล่าวได้ว่า ความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วของยีสต์ในน้ำสังเคราะห์โลหะเดี่ยวและผสมไม่แตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Ting Y.P. & Teo W.K. (1994: 113-7) ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของทรีทเมนต์ทั้งทางการกายภาพและทางเคมี ต่อความสามารถในการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีของยีสต์ *S. cerevisiae* โดยศึกษาทั้งแบบสารละลายโลหะเดี่ยว (single solution) และแบบผสม (combine) พบว่าการละลายของแคดเมียมและสังกะสีในสารละลายเดียวกัน ไม่มีผลต่อการดูดซับของยีสต์ ซึ่งเขาอธิบายว่า น่าจะเกิดจากตำแหน่งของการจับของโลหะแคดเมียมและสังกะสี เป็นคนละตำแหน่งกันบนผิวเซลล์ยีสต์

ดังนั้น จากการศึกษาสถานะของฟิเอช ต่อความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสม ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ฟิเอชที่ 4 ในการทำการศึกษา น้ำเสียจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

4.6 ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่ว ในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์โดยตัวอย่างยีสต์

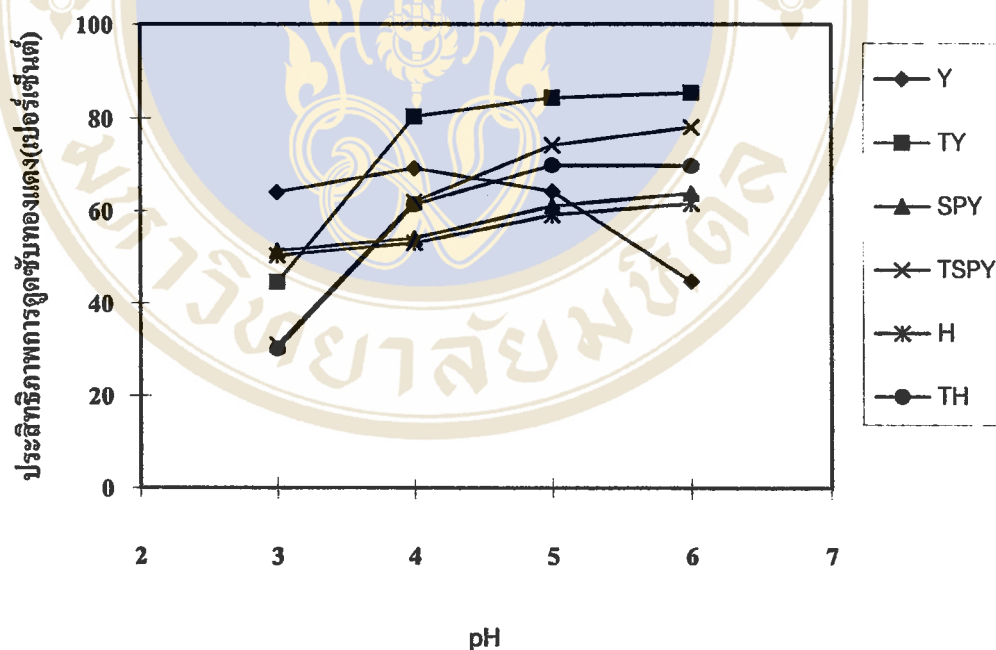
เนื่องจากน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์มีค่าฟิเอชโดยเฉลี่ย 2.78 ซึ่งอยู่ในสถานะที่เป็นกรดค่อนข้างมาก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงศึกษาสถานะฟิเอชที่ 3 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วโดยตัวอย่างยีสต์ ในสถานะที่เป็นกรดซึ่งใกล้เคียงกับสถานะฟิเอชในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์จริง และศึกษาสถานะฟิเอชที่ 4 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วโดยตัวอย่างยีสต์ ในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาในหัวข้อ 4.5 ซึ่งพบว่า ณ สถานะฟิเอช 4 ให้ประสิทธิภาพ การดูดซับทองแดงและตะกั่วดีที่สุด และเพื่อศึกษาแนวโน้มความสามารถของตัวอย่างยีสต์ ในการดูดซับทองแดงและตะกั่ว ณ สถานะฟิเอชที่เพิ่มขึ้น จึงทำการศึกษา ณ สถานะฟิเอช 5 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาประสิทธิภาพ การดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์โดยตัวอย่างยีสต์ 6 ทรีทเมนต์ ในสถานะฟิเอช 3-5 โดยปรากฏผลการทดลองดังนี้

4.6.1 ผลการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์กับตัวอย่างยีสต์

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดง ในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ณ สถานะฟิเอช 3-5 โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 6 ทรีทเมนต์ ให้ผลการทดลองดังแสดง

ตารางที่ 4.6 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับของแ่งในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร ณ พีเอช 3-6

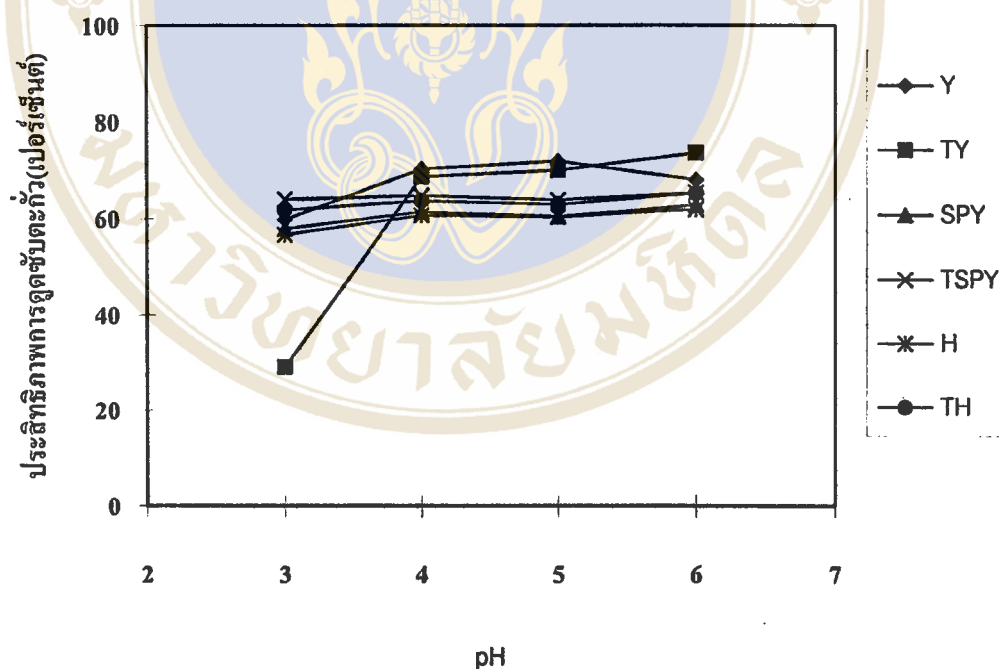
pH	ประสิทธิภาพการดูดซับของแ่ง (%)					
	Y	TY	SPY	TSPY	H	TH
3	64.04	44.62	51.38	31.03	50.41	30.21
4	69.22	80.29	54.12	61.99	53.10	61.37
5	64.17	84.35	61.03	74.16	59.10	69.79
6	44.75	85.38	63.78	78.04	61.61	69.68



รูปที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว ณ ความเข้มข้นของโลหะชนิดละ 10 mg/L
ที่มา : จากตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะทองแดง ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร ณ พีเอช 3-6

pH	ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว (%)					
	Y	TY	SPY	TSPY	H	TH
3	59.80	29.04	57.92	63.96	56.66	61.76
4	70.21	68.63	61.34	64.68	60.72	63.70
5	71.80	69.91	60.43	63.84	60.32	62.90
6	67.95	73.55	62.82	65.41	61.98	65.23



รูปที่ 4.11 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะทองแดง ณ ความเข้มข้นของโลหะชนิดละ 10 mg/L
ที่มา : จากตารางที่ 4.7

ในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.12 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้งโดยยีสต์ *S. cerevisiae* ณ สภาวะพีเอช 3-5 เท่ากับ 45.92 49.80 และ 49.17 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่ง ณ สภาวะพีเอช 4 จะให้ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงสูงสุดคือ 49.80 เปอร์เซ็นต์ แต่อย่างไรก็ตาม ณ สภาวะพีเอช 5 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงให้ผล 49.17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่มีความแตกต่างกับ ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง ณ สภาวะพีเอช 4 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ค-23 ในภาคผนวก ค) เมื่อนำยีสต์มาผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ และนำมาทำการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้งโรงงาน ณ สภาวะพีเอช 3-5 พบว่ามีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงเท่ากับ 28.99 52.02 และ 55.39 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ยีสต์ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์จะดูดซับทองแดงได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ณ สภาวะพีเอช 4 ขึ้นไป แต่ ณ สภาวะพีเอช 3 กระบวนการปรับสภาพเซลล์ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงโดยยีสต์ ลดลงถึง 23.03 เปอร์เซ็นต์

ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้งโรงงานโดยตัวอย่างกากยีสต์ทั้ง 4 ทริทเมนต์ ณ สภาวะพีเอช 3-5 พบว่า กากยีสต์ กากยีสต์ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ กากยีสต์ขจัดซอพและกากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ จะมีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงได้ดีที่สุด ณ สภาวะพีเอช 5 คือเท่ากับ 22.84 24.95 23.53 และ 24.57 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงของกากยีสต์ทั้งหมด ยกเว้นกากยีสต์ที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ค-17 ค-18 และค-19 ในภาคผนวก ค) อย่างไรก็ตาม กากยีสต์ทั้ง 4 ทริทเมนต์ จะดูดซับทองแดงในน้ำทิ้งได้น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ณ สภาวะพีเอช 3 แต่จะมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ณ สภาวะพีเอช 4 ขึ้นไป ดังนั้น การขจัดซอพไม่ช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง

ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงของกากยีสต์และกากยีสต์ขจัดซอพ เปรียบเทียบกับการนำกากยีสต์ทั้ง สองไปผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ พบว่า ณ สภาวะพีเอช 3 กระบวนการปรับสภาพเซลล์ไม่ช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับทองแดงในน้ำทิ้ง เมื่อปรับสภาวะพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 4 และ 5 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยซึ่งถือว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นกระบวนการปรับสภาพเซลล์ไม่ช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับทองแดงเช่นเดียวกับการขจัดซอพ

4.6.2 ผลการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์กับตัวอย่างยีสต์

จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่ว ในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ณ สภาวะพีเอช 3-5 โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 6 ทริทเมนต์ ให้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9

และ รูปที่ 4.13 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำทิ้งโดยยีสต์ *S. cerevisiae* ณ สภาวะพีเอช 3-5 เท่ากับ 22.51 40.18 และ 44.57 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ยีสต์มีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วสูงสุด ณ สภาวะพีเอช 5 จะให้แต่อย่างไรรู้ก็ตาม ณ สภาวะพีเอช 4 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วให้ผลมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับ พีเอช 3 (22.51%) ยีสต์ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ไม่สามารถดูดซับตะกั่วได้ที่พีเอช 3 แต่เมื่อสภาวะพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 4 และ 5 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วเท่ากับ 33.32 และ 42.57 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ยีสต์ที่ผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์จะดูดซับตะกั่วได้เพิ่มขึ้น แต่ ณ สภาวะพีเอชเดียวกันพบว่า กระบวนการฆ่าเซลล์ไม่ช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับตะกั่ว

ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงาน โดยตัวอย่างกากยีสต์ทั้ง 4 ทรีทเมนต์ ณ สภาวะพีเอช 3-5 พบว่า กากยีสต์และกากยีสต์จัดซอพทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ จะมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด ณ สภาวะพีเอช 5 ซึ่งพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของกากยีสต์ทั้งหมดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ก-24 ในภาคผนวก ก) อย่างไรก็ตาม กากยีสต์ทั้ง 4 ทรีทเมนต์จะดูดซับตะกั่วในน้ำทิ้งได้น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ณ สภาวะพีเอช 3 แต่จะมากกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ ณ สภาวะพีเอช 4 ขึ้นไป

ส่วนประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วของกากยีสต์และกากยีสต์จัดซอพ เปรียบเทียบกับการนำกากยีสต์ทั้งสองไปผ่านกระบวนการฆ่าเซลล์ พบว่า ณ สภาวะพีเอช 3-5 กระบวนการฆ่าเซลล์จะช่วยส่งเสริมความสามารถในการดูดซับตะกั่วโดยกากยีสต์เพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 3 %) ส่วนกากยีสต์เมื่อนำไปจัดซอพออก เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วก่อนการจัดซอพ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ก-20 ก-21 และ ก-22) ดังนั้น การการจัดซอพในกากยีสต์จึงไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่ว เช่นเดียวกับกระบวนการฆ่าเซลล์

4.6.3 สรุปผลของสภาวะพีเอชต่อประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์โดยตัวอย่างยีสต์

จากผลการศึกษาสภาวะพีเอชในน้ำสังเคราะห์ของโลหะผสมทองแดงและตะกั่ว โดยยีสต์ *S. cerevisiae* ในหัวข้อ 4.5 พบว่า ณ สภาวะพีเอช 4 ให้ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วดีที่สุด และเมื่อพิจารณาจากประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.6.1-4.6.2 แล้ว พบว่ายีสต์มีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงดีที่สุดที่พีเอช 4-5 แต่ยีสต์สามารถดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุดที่พีเอช 5 ส่วนกากยีสต์มี

ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วลดลงอย่างมาก (มากกว่า 2 เท่าเมื่อเทียบกับยีสต์ ณ พีเอชเดียวกัน) กากยีสต์มีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงได้ดีที่สุดที่พีเอช 5 และตะกั่วก็เช่นเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม ณ พีเอช 4 ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วก็ไม่แตกต่างจากพีเอช 5 อีกทั้งในทางปฏิบัติแล้ว ปริมาณการใช้สารเคมีในการปรับพีเอชที่ 4 น้อยกว่าที่พีเอช 5 ดังนั้นในการเลือกใช้พีเอชที่เหมาะสมในการดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำทิ้งโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดยตัวอย่างยีสต์ผู้วิจัยจึงเลือก ณ สภาวะพีเอช 4 มาใช้ในการปรับพีเอชของน้ำทิ้ง ให้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.10 พบว่า

ยีสต์โดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ได้สูงกว่าในน้ำเสียโรงงาน โดยยีสต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดง (49.80%) มากกว่าตะกั่ว (40.18%) ในน้ำเสีย เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสม พบว่า ณ พีเอชเดียวกัน ยีสต์มีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดง (69.22%) น้อยกว่าตะกั่ว (70.21%) และลดลงถึงกว่า 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อใช้ยีสต์ที่ผ่านการทรีท พบว่า มีประสิทธิภาพดูดซับทองแดง (52.02%) เพิ่มขึ้นเพียง 2.22 เปอร์เซ็นต์ และตะกั่ว (33.32%) ลดลงถึง 6.86 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับยีสต์

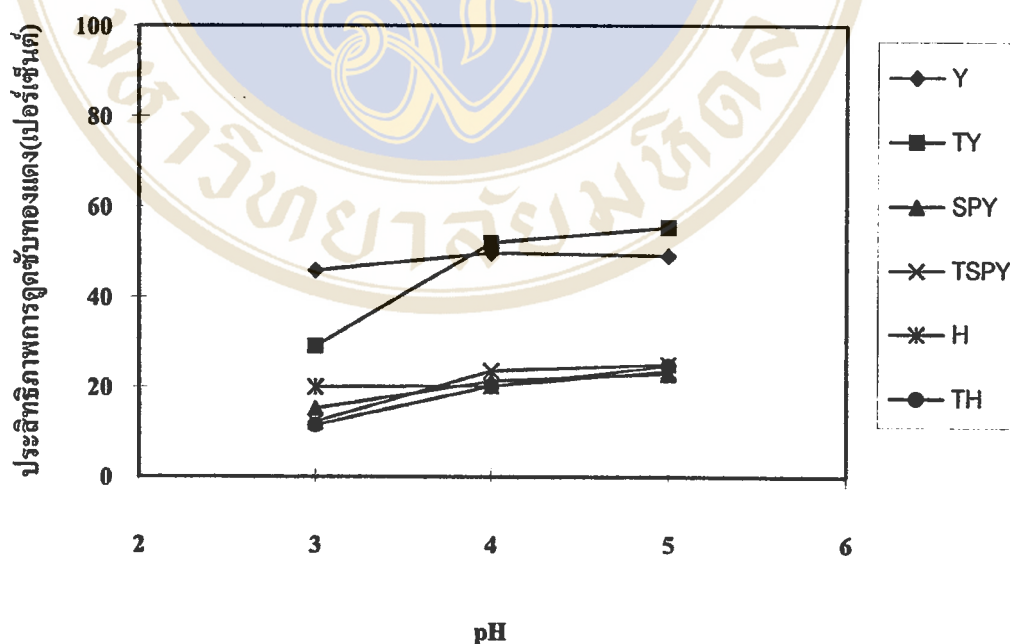
สำหรับกากยีสต์พบว่า โดยทั่วไปแล้วจะมีประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงานต่ำกว่ายีสต์มาก โดยกากยีสต์สามารถดูดซับทองแดง (21.31%) และตะกั่ว (22.47%) ได้ต่ำกว่ายีสต์ (49.80% , 40.18%) กว่า 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกากยีสต์ขจัดซอพพบว่าไม่ทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง (20.17%) และตะกั่ว (22.75%) แตกต่างจากกากยีสต์ (21.31% , 22.47%) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง ค-18 และ ค-21 ในภาคผนวก ค) กากยีสต์เมื่อนำไปผ่านกระบวนการปรับสภาพเซลล์ พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับทองแดงและตะกั่วเพิ่มขึ้นไม่ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น การขจัดซอพและกระบวนการปรับสภาพเซลล์ในกากยีสต์ ไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ เช่นเดียวกับกากยีสต์ในน้ำสังเคราะห์ผสม ณ พีเอชเดียวกัน แต่ประสิทธิภาพของกากยีสต์และกากยีสต์ที่ผ่านการทรีท ทั้งที่ขจัดซอพและไม่ขจัดซอพในการดูดซับทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสม จะสูงกว่าในน้ำเสียมากกว่า 3 เท่า และตะกั่วก็เช่นเดียวกัน

จะเห็นว่า การใช้ยีสต์ดูดซับทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงาน ให้ผลการศึกษาดังกล่าวแตกต่างจากการศึกษาในน้ำสังเคราะห์ผสม อีกทั้งประสิทธิภาพการดูดซับก็ลดลงอย่างมากซึ่งรวมถึงกากยีสต์ที่สามารถดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วได้เพียงเล็กน้อย (ประมาณ 20 กว่าเปอร์เซ็นต์) นั้น โดยยังคงมีทองแดงและตะกั่วอยู่ในน้ำเสียโรงงานอยู่มากกว่า 0.7 และ 2.0 ppm ตามลำดับ ซึ่งยังคงเกินมาตรฐานน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม อาจสันนิษฐานได้ว่า ในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์

น้ำมัน สารอินทรีย์ น้ำมัน ฟูลิเกนหรือแม้แต่โลหะอื่นๆ ที่สามารถ
รบกวนกลไกการดูดซับโลหะหนักของยีสต์ได้ จึงทำให้ความสามารถในการดูดซับโลหะทองแดง
และตะกั่วลดลง (Brower JB, Ryan RL, Pazirandeh; 1997: 2337-39)

ตารางที่ 4.8 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดย
ตัวอย่างยีสต์ 6 ทริทเมนต์ โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100
มิลลิลิตร ณ สภาวะพีเอช 3-5

pH	ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง (%)					
	Y	TY	SPY	TSPY	H	TH
3	45.92	28.99	15.22	12.25	19.95	11.57
4	49.80	52.02	21.31	23.49	20.17	20.23
5	49.17	55.39	22.84	24.95	23.53	24.57

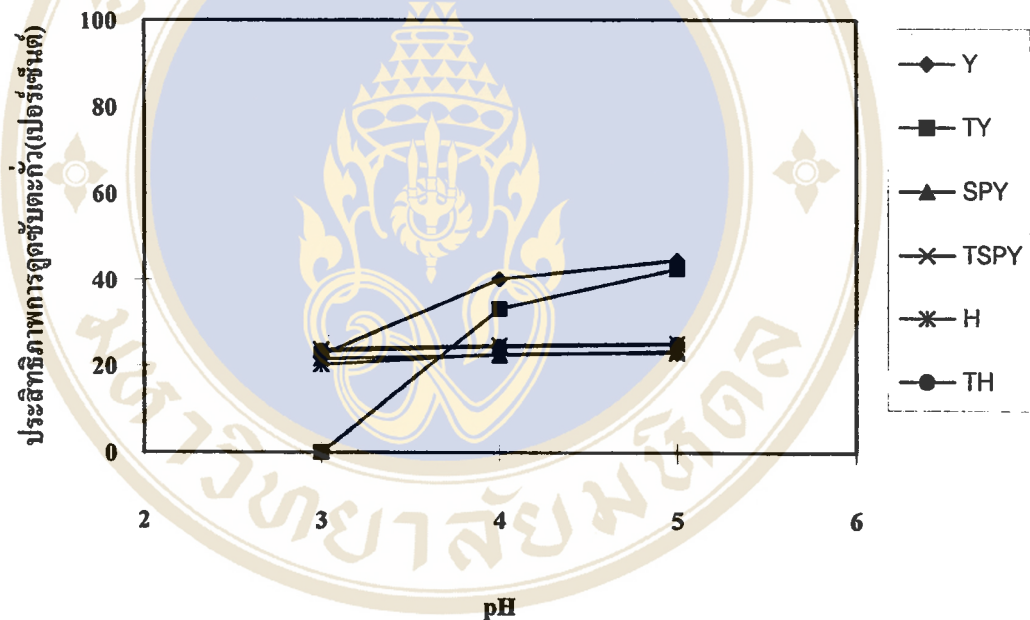


รูปที่ 4.12 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำทิ้งโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ณ
สภาวะพีเอช 3-5 โดยตัวอย่างยีสต์ 6 ทริทเมนต์

ที่มา : จากตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดยใช้ตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร ณ สภาวะพีเอช 3-5

pH	ประสิทธิภาพการดูดซับทองแดง (%)					
	Y	TY	SPY	TSPY	H	TH
3	22.51	0.00	21.63	23.72	20.31	23.49
4	40.18	33.32	22.47	24.78	22.75	24.46
5	44.57	42.57	23.45	25.25	23.08	24.99



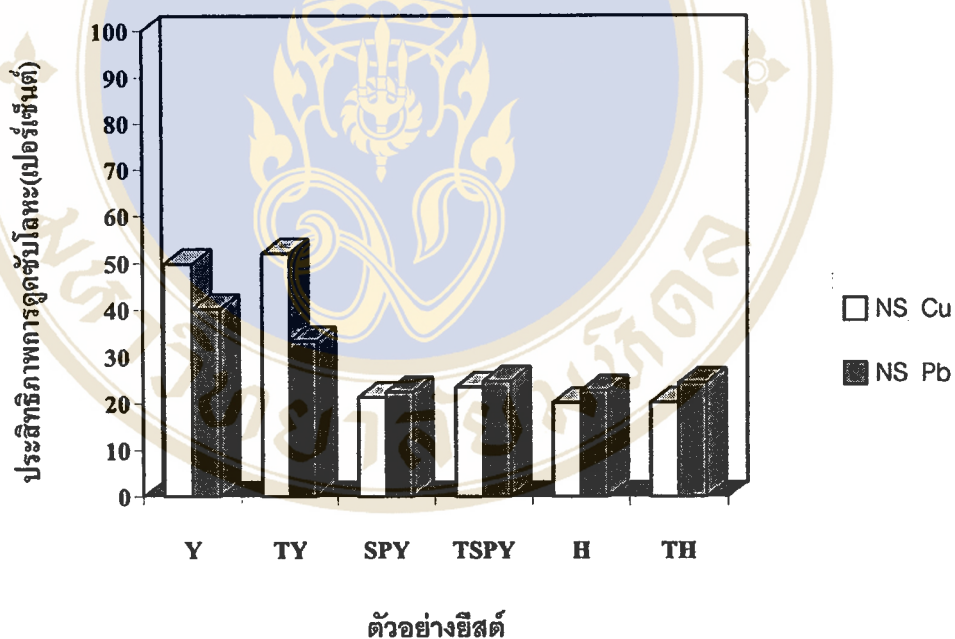
รูปที่ 4.13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ณ สภาวะพีเอช 3-5 โดยตัวอย่างยีสต์ 6 ชนิด

ที่มา : จากตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงาน

ตารางที่ 4.10 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงาน
อิเล็กทรอนิกส์จำกัด โดยตัวอย่างยีสต์ 6 ทริทเมนต์ โดยใช้ ตัวอย่างยีสต์ 0.2 กรัม
น้ำหนักแห้งต่อสารละลาย 100 มิลลิลิตร ณ พีเอช 4

โลหะ	ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะ โดยตัวอย่างยีสต์ (%)					
	Y	TY	SPY	TSPY	H	TH
Cu	49.80	52.02	21.31	23.49	20.17	20.23
Pb	40.18	33.32	22.47	24.78	22.75	24.46



รูปที่ 4.14 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงาน
อิเล็กทรอนิกส์โดยตัวอย่างยีสต์ ณ พีเอช 4
ที่มา จากตารางที่ 4.10

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองการนำกากยีสต์จากโรงงานเบียร์ มาศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักในน้ำสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งผลการทดลองที่กล่าวไปแล้วสามารถสรุปผลและให้ข้อเสนอแนะที่ได้จากการทำวิจัยนี้ ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 กากยีสต์จากโรงงานเบียร์สามารถดูดซับโลหะหนักเกิด ทองแดงและตะกั่ว พบว่ากากยีสต์ดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าทองแดงและนิกเกิลตามลำดับ ($Pb > Cu > Ni$)

5.1.2 ยีสต์ *S. cerevisiae* มีประสิทธิภาพการดูดซับนิกเกิล ทองแดงและตะกั่วได้ดีที่สุด ณ สภาพะพีเอช 4 3-4 และ 4-5 ตามลำดับ และที่พีเอช 4 ยีสต์มีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วได้ดีที่สุด รองลงมาคือทองแดงและนิกเกิล ($Pb > Cu > Ni$) เท่ากับ 75 70 และ 60 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ส่วนกากยีสต์ โดยทั่วไปให้ประสิทธิภาพต่ำกว่ายีสต์ กากยีสต์จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วมากที่สุด รองลงมาคือทองแดงและนิกเกิลตามลำดับ ($Pb > Cu > Ni$) เท่ากับ 60 53 และ 35 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เช่นเดียวกับยีสต์ สำหรับกากยีสต์จัดหอพอกให้ประสิทธิภาพเช่นเดียวกับกากยีสต์ ยกเว้นนิกเกิลที่ดูดซับได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อย(น้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์)

5.1.3 ในน้ำสังเคราะห์ผสมทองแดงและตะกั่วพบว่า ที่พีเอช 4 ยีสต์จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับทองแดงและตะกั่วซึ่งให้ผลไม่แตกต่างจากการดูดซับในน้ำสังเคราะห์เดี่ยว

5.1.4 กระบวนการปรับสภาพเซลล์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของยีสต์และกากยีสต์ในการดูดซับทองแดง แต่ไม่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับนิกเกิลและตะกั่ว

5.1.5 สภาพะพีเอช 4 เป็นพีเอชที่เหมาะสมของน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ของยีสต์และกากยีสต์ในการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่ว แต่ความสามารถในการดูดซับของยีสต์และกากยีสต์ในน้ำทิ้งโรงงานลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับในน้ำสังเคราะห์ผสม ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้คุณภาพน้ำทิ้งของโรงงาน ทั้งปริมาณทองแดงและตะกั่วต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรมได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า ยีสต์และกากยีสต์มีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักเกิด ทองแดงและตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ได้ดี แต่ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะทองแดงและตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ลดลงอย่างมาก ดังนั้น เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ชีววิธีในการขจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยใช้ยีสต์และกากยีสต์เป็นตัวดูดซับ ควรได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในประเด็นต่างๆ ดังนี้

5.2.1 ศึกษาปัจจัยที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักโดยกากยีสต์ เช่น วิธีที่หมักยีสต์ที่เหมาะสมของกากยีสต์ในการดูดซับโลหะแต่ละชนิด วิธีการเตรียมกากยีสต์ก่อนนำมาใช้เป็นตัวดูดซับ

5.2.2 ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้กากยีสต์ดูดซับ โลหะหนักมากกว่าหนึ่งครั้ง

5.2.3 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ โลหะหนักของกากยีสต์

5.2.4 ศึกษาปริมาณการใช้กากยีสต์ที่เหมาะสม รวมถึงเวลาที่น้อยที่สุดที่กากยีสต์ดูดซับโลหะหนักได้มากที่สุด เพื่อประโยชน์ในการนำไปใช้ศึกษาต่อไป

5.2.5 ศึกษาการใช้กากยีสต์เป็นตัวดูดซับ โลหะหนักในน้ำทิ้งจากโรงงานประเภทอื่นๆ ที่มีปริมาณความเข้มข้นของโลหะหนักไม่สูงนัก ซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะของกากยีสต์อาจจะเพียงพอที่จะทำให้คุณภาพน้ำทิ้งของโรงงาน อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานโรงงานอุตสาหกรรมได้ รวมถึงศึกษาการบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นก่อนนำมาทำการดูดซับ

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. (2536). การใช้ประโยชน์ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2537). วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์.
- จรัญ จันทลักษณ์. (2523). สถิติวิเคราะห์และวางแผนงานวิจัย. (พิมพ์ครั้งที่ 4). กรุงเทพมหานคร : ไทยวัฒนาพานิช.
- ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. (2525). สารานุกรมโรค. กรุงเทพมหานคร : O.S. Printing House.
- บุญธรรม จิระจันทร์. (2536). Toxic nephropathies. ใน กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุขและสมาคมแพทยอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (บรรณาธิการ). โรคจากสารพิษและการป้องกันในการประชุมวิชาการอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 5. (หน้า 227-245). กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์กองสุขศึกษา กระทรวงสาธารณสุข.
- ปรีชา วิบูลย์เศรษฐ์. (2524). จุลชีววิทยาของผลิตภัณฑ์เกษตร. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ประเสริฐ ตปนิยางกูร. (2536). การจัดการของเสียที่อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม. ใน กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุขและสมาคมแพทยอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (บรรณาธิการ). โรคจากสารพิษและการป้องกันในการประชุมวิชาการอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 5. (หน้า 350-360). กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์กองสุขศึกษา กระทรวงสาธารณสุข.
- รังสรรค์ ปิ่นทอง. (2536). การใช้ประโยชน์ของเสียอุตสาหกรรม. ใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์ (บรรณาธิการ). การประชุมระดับชาติ สวสท' 36 เทคโนโลยีการควบคุมมลพิษ. (หน้า 213-221). กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ไฟน์อาร์ต พับลิชชิง.
- สุภมาส พนิชศักดิ์พัฒนา. (2540). ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมาคมวิศวกรสิ่งแวดล้อมไทย. (2535). คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. (พิมพ์ครั้งที่ 2). กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ส่วนการประชาสัมพันธ์ บริษัทไทยอมฤต บรียวเอร์ จำกัด. (2540). เบียร์. กรุงเทพมหานคร :

ม.ป.ท. แผ่นพับ.

วิลาวัลย์ เจริญจิระตระกูล. (2536). ผลิตภัณฑ์อาหารหมักจากจุลินทรีย์. (พิมพ์ครั้งที่ 2). สงขลา :

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อดิศักดิ์ ทองไข่มุกด์. (2536). ของเสียที่เป็นอันตราย. ใน กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุขและสมาคมแพทยอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (บรรณาธิการ). โรคจากสารพิษและการป้องกันในการประชุมวิชาการอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 5. (หน้า 335-349). กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์กองสุศึกษา กระทรวงสาธารณสุข.

อรพรรณ เมฆาคิลกกุล. (2536). สถานการณ์โรคพิษสารตะกั่วในประเทศไทย. ใน กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุขและสมาคมแพทยอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (บรรณาธิการ). โรคจากสารพิษและการป้องกันในการประชุมวิชาการอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 5. (หน้า 153-154). กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์กองสุศึกษา กระทรวงสาธารณสุข.

อรพรรณ เมฆาคิลกกุล. (2536). สถานการณ์ปัญหาสุขภาพจากพิษตะกั่วในประเทศไทย. ใน กรมการแพทย์ กระทรวงสาธารณสุขและสมาคมแพทยอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (บรรณาธิการ). โรคจากสารพิษและการป้องกันในการประชุมวิชาการอาชีวเวชศาสตร์และสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 5. (หน้า 155-157). กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์กองสุศึกษา กระทรวงสาธารณสุข.

Aksu, Z., Sag, Y. & Kutsal, T. (1990). A comparative study of the adsorption of chromium(VI) ions to *C. vulgaris* and *Z. ramigera*. Environ Technol, 11, 33-40.

Brady, D., Duncan, J.R. (1994). Bioaccumulation of metal cations by *Saccharomyces cerevisiae*. Appl Microbiol Biotechnol, 41, 149-54.

Brady, D., Stoll, A. & Duncan, J.R. (1994). Biosorption of heavy metal cation by non-viable yeast biomass. Environ Technol, 15, 429-438.

Brower JB, Ryan RL, Pazirandeh M. (1997). Comparison of ion exchange resins and biosorbents for the removal of heavy metals from plating factory wastewater. Environ Sci Technol, 31, 2910-2914.

Chen, P., Y. P. Ting. (1995). Effect of Heavy Metal Uptake on The Electrokinetic Properties of *Saccharomyces cerevisiae*. J Biotechnology Letters, 17, 107-12.

- Duncan, J. R. ,Brady, D. , Stell, A., & Wilhelmi, B. (1995). Heavy Metal Removal from Industrial Effluents by Immobilised Yeast and Algal Biomass. South Africa : Department of Biochemisty and Microbiology Rhodes University Grahamstown.
- Duncan, J.R., Brady, D., Stoll, A. & Wilhelmi, B. (1995). Heavy metal removal from industrial effluent by immobilized yeast and algal biomass. In Jerez,C.A., Vargas,T.,Toledo, H. & Wiertz, J.V. (Eds). Bihydrometallurgical processing Vol. II. (pp.237-246)Vol. II. Santiago: University of Chile.
- Dwivedi, B.K. & Gibson, D.L. (1970). Processing of spent brewers' Yeast for food use. J. Inst. Can. Technol. Aliment, 3, 110-112.
- Gadd, G.M. (1990). Fungi and yeast for metal accumulation. In H.L. Ehrlich (Ed). Microbial mineral recovery (pp.249-275). New York: McGraw Hill.
- Gadd, G.M. & White, C. (1993). Microbial treatment of metal pollution – a working biotechnology. Trends in Biotechnol,11,353-9.
- Huang, C-P. , Chin-Pon, H. & Morehart, A.L. (1990). The Removal of Cu(II) from Aques Solution by *Saccharomyces cereviciae*. wat. res. 4 , 433-439.
- Lu, Y, & Wilkins, E. (1996). Heavy metal removal by caustic treated yeast immobilized in alginate. J of Hazardous Material, 49, 165-179.
- McHale, A.P. & McHale, S. (1994). Microbial treatment of metal: potential in the treatment of metal pollution. Biotechnol Adv, 22, 647-652
- Michael, L.J., & Young,T.W. (1995). Brewing. London : Chapman and Hall Press.
- Nakajima, A., & Takashi, S. (1986). Selective accumulation of heavy metals by microorganisms. Appl Microbiol Biotechnol, 24, 59-64.
- Kapoor, A. & Viraraghavan,T. (1998). Biosorption of heavy metal on *Aspergillus niger*: effects of pretreatment. Biosource Technol, 63, 109-13.
- Kapoor, A. & Viraraghavan,T. (1995). Fungal biosorption-an alternative treatment option for heavy metal bearing wastewaters:a review. Biosource Technol , 53, 195-206.
- Puttanastienpong, T. (1988). The management of wastewater from small-scale electroplating plants. M.S. Thesis in Technology of Environmental Management, Faculty of Graduate Studies, Mahidol University.

- Simmous, P. & Singleton, I. A. (1996). Method to increase silver biosorption by an industrial strain of *Saccharomyces cerevisiae*. Appl Microbial Biotechnol, 45, 278-285.
- Strandberg, G. W., Starling, E. S. & Parrott, JR. (1981). Microbial Cell as Biosorbents for Heavy Metals : Accumulation of Uranium by *Saccharomyces cerevisiae* and *Pseudomonas aeruginosa*. Applie and Environmental Microbiology, 41, 237-245.
- Ting, Y.P. & Teo, W.K. (1994). Uptake of cadmium and zinc by yeast: effect co-metal ion and physical-chemical treatments. Bioresource Technol, 50, 113-117.
- Verzele, M., & De Keukeleire, D. (1991). Chemistry and analysis of hop and beer bitter acids. Netherlands : Elsevier Science.
- Volesky, B. & May – Phillips, H.A. (1995). Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*. Appl Microbial Biotechnol, 42, 797-806.
- Volesky, B., May, H. & Holan, Z.R. (1993). Cadmium biosorption by *Saccharomyces cerevisiae*. Biotechnol and Bioeng, 41, 826-829.
- Volesky, B. (1989). Biosorption of Heavy Metals. United States : McGill University, CRC Press.

ภาคผนวก ก

มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม

ลักษณะน้ำทิ้ง	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	หมายเหตุ
1) ความเป็นกรด-ด่าง	-	5-9	
2) ค่าของเปอร์มังกาเนต (Permanganate Solids)	mg/L	≤ 60	
3) สารละลาย (Dissolve Solids)	mg/L	ไม่มากกว่า 2000 หรือตามที่พนักงานเจ้าหน้าที่เห็นสมควร แต่ต้องไม่มากกว่า 5000 mg/L	น้ำทิ้งซึ่งระบายออกจากโรงงาน ลงสู่แหล่งน้ำกร่อย ที่มีค่าความเค็มเกิน 2000 mg/L หรือลงสู่ทะเล ค่าที่สารละลายได้ในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่สารละลายได้ที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อย หรือทะเลได้ไม่เกิน 5000 mg/L
4) ซัลไฟด์คิดเทียบเป็น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Sulfide as H_2S)	mg/L	≤ 1.0	
5) ไซยาไนด์คิดเทียบเป็น ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (Cyanide as HCN)	mg/L	≤ 0.2	
6) โลหะหนัก			โรงงานเกี่ยวกับการถลุงโลหะสังกะสี
- สังกะสี (Zn)	mg/L	≤ 5.0	ไม่มากกว่า 3.0 mg/L
- โครเมียม (Cr)	mg/L	≤ 0.5	โรงงานเกี่ยวกับการถลุงโลหะสังกะสี
- สารหนู (As)	mg/L	≤ 0.25	ไม่มากกว่า 0.2 mg/L
- ทองแดง (Cu)	mg/L	≤ 1.0	
- ปรอท (Hg)	mg/L	≤ 0.005	โรงงานเกี่ยวกับการถลุงโลหะสังกะสี
- แคดเมียม (Cd)	mg/L	≤ 0.03	ไม่มากกว่า 0.002 mg/L
- บารีียม (Ba)	mg/L	≤ 1.0	โรงงานเกี่ยวกับการถลุงโลหะสังกะสี
			ไม่มากกว่า 0.1 mg/L

มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (ต่อ)

ลักษณะน้ำทิ้ง	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	หมายเหตุ
- เซเลเนียม(Se)	mg/L	≤ 0.2	โรงงานเกี่ยวกับการถลุงโลหะสังกะสี ไม่มากกว่า 0.2 mg/L
- ตะกั่ว (Pb)	mg/L	≤ 0.2	โรงงานเกี่ยวกับการถลุงโลหะสังกะสี ไม่มากกว่า 3.0 mg/L
- นิกเกิล (Ni)	mg/L	≤ 0.2	โรงงานเกี่ยวกับการถลุงโลหะสังกะสี ไม่มากกว่า 3.0 mg/L
- แมงกานีส (Mn)	mg/L	≤ 5.0	
- เงิน (Ag)	mg/L	ไม่กำหนด	โรงงานเกี่ยวกับการถลุงโลหะสังกะสี ไม่มากกว่า 0.02 mg/L
7) น้ำมันทาร์	-	ไม่มีเลย	
8) น้ำมันและไขมัน (Oil & Grease)	mg/L	≤ 5.0	- โรงกลั่นน้ำมันและโรงงานผสม น้ำมันหล่อลื่นและจารบีไม่มากกว่า 15.0 mg/L - โรงงานเกี่ยวกับการถลุงโลหะสังกะสี ไม่มากกว่า 5 mg/L
9) ฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde)	mg/L	≤ 1.0	
10) ฟีนอลและ/หรือครีโซลล์ (Phenol & Cresols)	mg/L	≤ 1.0	
11) คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	mg/L	≤ 1.0	
12) ยาฆ่าแมลง (Insecticide)	mg/L	ไม่มีเลย	
13) สารกัมมันตรังสี (Radioactivity)	mg/L	ไม่มีเลย	

มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (ต่อ)

ลักษณะน้ำทิ้ง	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	หมายเหตุ
14) สารแขวนลอย (Suspended Solid)	mg/L	ขึ้นอยู่กับอัตราส่วน ผสมระหว่างน้ำทิ้ง กับน้ำในลำน้ำ สาธารณะ	อัตราส่วนผสม 1/8 ถึง 1/150 ไม่มากกว่า 30 mg/L 1/151 ถึง 1/300 ไม่มากกว่า 60 mg/L 1/301 ถึง 1/500 ไม่มากกว่า 150 mg/L
15) บีโอดี (5วัน) ที่อุณหภูมิ 20°C (BOD 5 days, at 20°C)	mg/L	≤20	ค่าของบีโอดีอาจแตกต่างกันไปได้ แล้วแต่ ภูมิประเทศหรือลักษณะการระบาย ตามที่พนักงานเจ้าหน้าที่เห็นสมควร แต่ต้องไม่มากกว่า 60 mg/L ยกเว้น (1) โรงงานทำอาหารจากสัตว์น้ำและ บรรจุในภาชนะที่ผนึกและอากาศ เข้าไม่ได้ ไม่มากกว่า 100 mg/L (2) โรงงานผลิตแปงมันสำปะหลัง - โดยวิธีเหวี่ยงแยกแปงแล้วทำให้ แห้งด้วยลมร้อน ไม่มากกว่า 60 mg/L - โดยวิธีแยกแปง ด้วยการตก ตะกอนแล้วทำให้แห้งบนพื้นอังไฟ ไม่มากกว่า 100 mg/L (3) โรงงานผลิตอาหารจากแป้งเป็น เส้นหรือชิ้น (ประเภทก๋วยเตี๋ยว, ขนมจีน, เส้นหมี่ เป็นต้น) ไม่มาก กว่า 100 mg/L (4) โรงงานหมัก ฟอกหนังสัตว์ ไม่มาก กว่า 100 mg/L (5) โรงงานผลิตเยื่อกระดาษจากไม้ ชาน อ้อย หนุ่ย เศษผ้า ฯลฯ ไม่มากกว่า 100 mg/L

มาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม (ต่อ)

ลักษณะน้ำทิ้ง	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	หมายเหตุ
19) อุณหภูมิ (Temp.)	°C	≤ 40	(6) โรงงานห้องเย็นชนิดแกะล้างแล้วแช่แข็งสัตว์น้ำ ไม่มากกว่า 100 mg/L
20) สีหรือกลิ่น (Color & Odour)	-	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ	

หมายเหตุ : ≤ หมายถึง ไม่มากกว่า

ที่มา : ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมออกตามความในพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2512 ฉบับที่ 12 (2525) เรื่องหน้าที่ของผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงาน ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 99 ตอนที่ 33 (ฉบับพิเศษ) ลงวันที่ 5 มีนาคม 2525 และฉบับที่ 10 (2518) เรื่องหน้าที่ของผู้รับใบอนุญาตประกอบกิจการโรงงานเฉพาะประเภทถลุงสังกะสี ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 95 ตอนที่ 132 ลงวันที่ 28 พฤศจิกายน 2521 (ภาคผนวก ง)

ภาคผนวก ข

วิธีการเตรียม YPD Medium

อาหารนี้ใช้สำหรับการเลี้ยงยีสต์ในการทดลองทั่วไป สูตรอาหารมีดังนี้

1. 1% Bacto-yeast extract
2. 2% Bacto-peptone
3. 2% Dextrose
4. 2% Bacto-agar

เติมน้ำกลั่นในปริมาณที่ต้องการ ให้สารละลายจนหมด นำไป autoclave ที่ความดัน 15 lbs/sq.inch และที่อุณหภูมิ 121° C เป็นเวลา 20 นาที

หมายเหตุ 1. 1% Bacto-yeast extract หมายถึง ถ้าต้องการเตรียมอาหารให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร จะต้องชั่งสาร Bacto-yeast extract มา 1 กรัม

2. ถ้าต้องการเตรียมอาหารเหลว ไม่ต้องใช้สารในข้อ 4.

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก-1 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักเกิดในน้ำสังเคราะห์โดยยีสต์ *S. cerevisiae* ณ สภาวะพีเอช 2-6

pH	ซ้ำที่	Ci	Cf	%E	%Eเฉลี่ย	*
2	1	9.71	8.27	14.83	15.14	a
	2	9.71	8.21	15.45		
3	1	9.71	4.08	57.98	58.23	b
	2	9.71	4.07	58.08		
	3	9.55	3.95	58.64		
4	1	9.90	3.91	60.51	60.43	c
	2	9.90	4.02	59.39		
	3	9.71	3.75	61.38		
5	1	9.37	5.51	41.20	42.18	d
	2	9.37	5.48	41.52		
	3	9.86	5.54	43.81		
6	1	9.35	5.71	38.93	40.14	e
	2	9.35	5.58	40.32		
	3	10.01	5.89	41.16		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-2 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์โดยยีสต์ *S. cerevisiae*
ณ สภาวะพีเอช 2-6

pH	ซ้ำที่	Ci	Cf	%E	%Eเฉลี่ย	*
2	1	9.86	7.94	19.54	19.28	a
	2	9.86	7.99	19.03		
3	1	9.82	3.14	68.00	67.89	b
	2	9.82	3.11	68.39		
	3	9.74	3.19	67.29		
4	1	9.93	3.04	69.39	69.50	b
	2	9.93	3.04	69.41		
	3	9.79	2.97	69.71		
5	1	9.74	3.42	64.90	65.55	c
	2	9.74	3.26	66.50		
	3	9.47	3.29	65.26		
6	1	9.64	5.04	47.71	45.26	d
	2	9.35	5.21	44.30		
	3	9.35	5.26	43.77		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ค-3 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์โดยยีสต์ *S. cerevisiae* ณ
สถานะพีเอช 2-6

pH	ซ้ำที่	Ci	Cf	%E	%Eเฉลี่ย	*
2	1	10.10	8.98	11.09	11.63	a
	2	10.10	8.87	12.18		
3	1	12.18	4.01	67.08	65.16	b
	2	12.75	4.49	64.78		
	3	10.31	3.75	63.63		
4	1	12.49	3.39	72.86	72.94	c,d
	2	12.49	3.28	73.74		
	3	11.56	3.21	72.23		
5	1	12.90	3.13	75.74	74.81	c
	2	12.90	3.41	73.57		
	3	10.17	2.53	75.12		
6	1	12.26	3.44	71.94	70.87	d
	2	12.26	3.35	72.68		
	3	10.50	3.36	68.00		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ค-4 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักเกิลในน้ำสังเคราะห์ ณ สภาวะพีเอช 4 โดย
ตัวอย่างยีสต์ 6 treatment

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	9.90	3.91	60.51	60.43	a
	2	9.90	4.02	59.39		
	3	9.71	3.75	61.38		
Treated	1	11.23	5.60	50.13	50.50	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	11.23	5.78	48.53		
	3	9.92	4.68	52.82		
กากยีสต์	1	11.23	7.48	33.39	34.55	c
	2	11.23	7.33	34.73		
	3	11.23	7.24	35.53		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	10.56	6.72	36.36	36.67	d,e
	2	10.56	6.70	36.55		
	3	9.92	6.24	37.10		
กากยีสต์จัดซอพ	1	11.23	7.14	36.42	37.37	d,f
	2	11.23	6.96	38.02		
	3	11.23	7.00	37.67		
กากยีสต์จัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	10.56	6.40	39.39	38.78	e,f
	2	10.56	6.50	38.45		
	3	9.92	6.10	38.51		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-5 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ ณ สภาวะพีเอช 4 โดย
ตัวอย่างยีสต์ 6 treatment

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	9.93	3.04	69.39	69.50	a
	2	9.93	3.04	69.41		
	3	9.79	2.97	69.71		
Treated	1	9.78	1.95	80.03	80.15	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	9.78	2.00	79.58		
	3	9.78	1.87	80.84		
กากยีสต์	1	9.78	4.59	53.11	53.48	c
	2	9.78	4.58	53.18		
	3	9.78	4.48	54.14		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	9.78	3.98	59.34	60.17	d
	2	9.74	3.86	60.38		
	3	9.74	3.82	60.81		
กากยีสต์ขจัดซอพ	1	9.74	4.55	53.28	53.63	c
	2	9.74	4.61	52.65		
	3	9.74	4.39	54.97		
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	9.74	3.91	59.84	60.39	d
	2	9.74	3.79	61.08		
	3	9.74	3.87	60.25		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-6 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ ณ สภาวะพีเอช 4 โดย
ตัวอย่างยีสต์ 6 treatment

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	12.49	3.39	72.86	72.94	a
	2	12.49	3.28	73.74		
	3	11.56	3.21	72.23		
Treated	1	11.56	3.54	69.38	69.20	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	11.56	3.66	68.34		
	3	11.56	3.48	69.90		
กากยีสต์	1	11.56	4.45	61.51	60.01	c
	2	11.56	4.64	59.86		
	3	11.56	4.78	58.65		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	11.56	4.15	64.10	63.61	d
	2	11.64	4.21	63.83		
	3	11.64	4.32	62.89		
กากยีสต์ขจัดซอพ	1	11.64	4.85	58.33	59.51	c
	2	11.64	4.92	57.73		
	3	11.64	4.37	62.46		
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	11.64	3.89	66.58	65.09	d
	2	11.64	4.21	63.83		
	3	11.64	4.09	64.86		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-7 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 3

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	9.94	3.38	65.97	64.04	a
	2	9.97	3.57	64.25		
	3	9.93	3.78	61.91		
Treated	1	9.94	5.42	45.45	44.62	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	9.97	5.52	44.66		
	3	9.93	5.58	43.75		
กากยีสต์	1	9.94	4.83	51.40	51.38	c
	2	9.97	4.77	52.22		
	3	9.93	4.91	50.54		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	9.94	6.82	31.39	31.03	d
	2	9.97	6.96	30.22		
	3	9.93	6.80	31.48		
กากยีสต์ขจัดซอพ	1	9.94	4.92	50.48	50.41	c
	2	9.97	4.86	51.23		
	3	9.93	5.01	49.52		
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	9.94	7.01	29.47	30.21	d
	2	9.97	6.92	30.63		
	3	9.93	6.90	30.54		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-8 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 4

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	9.85	3.13	68.25	69.22	a
	2	9.63	2.92	69.73		
	3	9.58	2.91	69.67		
Treated	1	9.85	1.87	80.98	80.29	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	9.63	1.95	79.73		
	3	9.58	1.90	80.16		
กากยีสต์	1	9.85	4.53	54.03	54.12	c
	2	9.63	4.31	55.22		
	3	9.58	4.49	53.12		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	9.85	3.80	61.48	61.99	d
	2	9.63	3.66	61.97		
	3	9.58	3.59	62.52		
กากยีสต์จัดซอพ	1	9.85	4.61	53.20	53.10	c
	2	9.63	4.58	52.44		
	3	9.58	4.44	53.65		
กากยีสต์จัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	9.85	3.81	61.32	61.37	d
	2	9.63	3.72	61.36		
	3	9.58	3.70	61.43		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ค-9 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 5

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	9.25	3.30	64.39	64.17	a
	2	9.41	3.32	64.72		
	3	9.31	2.41	63.41		
Treated <i>S. cerevisiae</i>	1	9.25	1.39	84.95	84.35	b
	2	9.41	1.53	83.75		
	3	9.31	1.46	84.34		
กากยีสต์	1	9.25	3.72	59.77	61.03	c
	2	9.41	3.54	62.36		
	3	9.31	3.63	60.97		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	9.25	2.35	74.55	74.16	d
	2	9.41	2.46	73.85		
	3	9.31	2.41	74.09		
กากยีสต์จัดหอพ	1	9.25	3.78	59.14	59.10	e
	2	9.41	3.86	58.98		
	3	9.31	3.80	59.18		
กากยีสต์จัดหอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	9.25	2.72	70.62	69.79	f
	2	9.41	2.90	69.16		
	3	9.31	2.83	69.59		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-10 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะตะกั่ว ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 6

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	9.40	5.20	44.64	44.75	a
	2	9.21	5.10	44.64		
	3	9.32	5.13	44.98		
Treated	1	9.40	1.40	85.15	85.38	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	9.21	1.29	86.05		
	3	9.32	1.40	84.96		
กากยีสต์	1	9.40	3.41	63.70	63.78	c
	2	9.21	3.31	64.09		
	3	9.32	3.40	63.54		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	9.40	2.11	77.57	78.04	d
	2	9.21	2.05	77.71		
	3	9.32	1.97	78.84		
กากยีสต์ขจัดซอพ	1	9.40	3.65	61.17	61.61	e
	2	9.21	3.50	62.00		
	3	9.32	3.57	61.67		
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	9.40	2.80	70.18	69.68	f
	2	9.21	2.90	68.57		
	3	9.32	2.77	70.30		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ค-11 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะทองแดง ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 3

Treatment	ซ้ำที่	C _i	C _f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	10.64	4.32	59.40	59.80	a,c
	2	11.23	4.54	59.57		
	3	10.56	4.18	60.42		
Treated	1	10.64	7.70	27.63	29.04	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	11.23	7.91	29.56		
	3	10.56	7.40	29.92		
กากยีสต์	1	10.64	4.40	58.65	57.92	c
	2	11.23	4.78	57.44		
	3	10.56	4.47	57.67		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	10.64	3.71	65.13	63.96	d,e
	2	11.23	3.95	64.83		
	3	10.56	4.02	61.93		
กากยีสต์ขจัดซอพ	1	10.64	4.32	59.40	56.66	c
	2	11.23	5.00	55.48		
	3	10.56	4.74	55.11		
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	10.64	3.98	62.59	61.76	a,e
	2	11.23	4.28	61.89		
	3	10.56	4.14	60.80		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-12 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะทองแดง ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 4

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	11.41	3.39	70.29	70.21	a
	2	11.28	3.10	72.52		
	3	12.15	3.91	67.82		
Treated	1	11.41	3.72	67.40	68.63	a
<i>S. cerevisiae</i>	2	11.28	3.55	68.53		
	3	12.15	3.65	69.96		
กากยีสต์	1	11.41	4.29	62.40	61.36	b,c,d,f
	2	11.28	4.35	61.44		
	3	12.15	4.83	60.25		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการฆ่าเซลล์	1	11.41	4.13	63.80	64.68	b,e
	2	11.28	3.95	64.98		
	3	12.15	4.22	65.27		
กากยีสต์จัดซอพ	1	11.41	4.43	61.17	60.72	d
	2	11.28	4.39	61.08		
	3	12.15	4.87	59.92		
กากยีสต์จัดซอพที่ผ่านขบวนการฆ่าเซลล์	1	11.41	4.20	63.19	63.70	e,f
	2	11.28	3.89	65.51		
	3	12.15	4.57	62.39		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ค-13 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะทองแดง ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 5

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	11.59	3.14	72.91	71.80	a
	2	11.87	3.54	70.18		
	3	12.14	3.36	72.32		
Treated <i>S. cerevisiae</i>	1	11.59	3.41	70.58	69.91	a
	2	11.87	3.75	68.41		
	3	12.14	3.55	70.76		
กากยีสต์	1	11.59	4.41	61.95	60.43	b
	2	11.87	4.92	58.55		
	3	12.14	4.76	60.79		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการฆ่าเซลล์	1	11.59	4.07	64.88	63.84	c
	2	11.87	4.26	64.11		
	3	12.14	4.55	62.52		
กากยีสต์จัดซอพ	1	11.59	4.44	61.69	60.32	b
	2	11.87	4.79	59.65		
	3	12.14	4.90	59.64		
กากยีสต์จัดซอพที่ผ่านขบวนการฆ่าเซลล์	1	11.59	4.17	64.02	62.90	c
	2	11.87	4.54	61.75		
	3	12.14	4.50	62.93		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-14 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสมโลหะทองแดง ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 6

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	12.44	4.05	67.44	67.95	a
	2	11.90	3.78	68.24		
	3	12.16	3.87	68.17		
Treated	1	12.44	3.41	72.59	73.55	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	11.90	2.98	74.96		
	3	12.16	3.27	73.11		
กากยีสต์	1	12.44	4.62	62.86	62.82	c
	2	11.90	4.40	63.03		
	3	12.16	4.55	62.58		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	12.44	4.40	64.63	65.41	d
	2	11.90	2.99	66.47		
	3	12.16	4.24	65.13		
กากยีสต์จัดหอพ	1	12.44	4.75	61.82	61.98	c
	2	11.90	4.49	62.27		
	3	12.16	4.64	61.84		
กากยีสต์จัดหอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	12.44	4.32	64.42	65.23	d
	2	11.90	4.06	65.88		
	3	12.16	4.21	65.38		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ค-15 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำสังเคราะห์ผสม ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยยีสต์ *S. cerevisiae* ณ สภาวะพีเอช 3-6

pH	ซ้ำที่	Ci	Cf	%E	%Eเฉลี่ย	*
3	1	9.94	3.38	65.97	64.04	a
	2	9.97	3.57	64.25		
	3	9.93	3.78	61.91		
4	1	9.85	3.13	68.25	69.22	b
	2	9.63	2.92	69.73		
	3	9.58	2.91	69.67		
5	1	9.25	3.30	64.39	64.17	a
	2	9.41	3.32	64.72		
	3	9.31	3.41	64.39		
6	1	9.40	5.20	44.64	44.75	c
	2	9.21	5.10	44.64		
	3	9.32	5.13	44.98		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-16 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ผสม ณ ความเข้มข้นของโลหะอย่างละ 10 mg/L โดยยีสต์ *S. cerevisiae* ณ สภาวะพีเอช 3-6

pH	ซ้ำที่	Ci	Cf	%E	%Eเฉลี่ย	*
3	1	10.64	4.32	59.40	59.80	a
	2	11.23	4.58	59.57		
	3	10.56	4.18	60.42		
4	1	11.41	3.39	70.29	70.21	b,c
	2	11.28	3.10	72.52		
	3	12.15	3.91	67.82		
5	1	11.59	3.14	72.91	71.80	b
	2	11.87	3.54	70.18		
	3	12.14	3.36	72.32		
6	1	12.44	4.05	67.44	67.95	c
	2	11.90	3.78	68.24		
	3	12.16	3.87	68.17		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-17 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดย
ตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 3

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	0.99	0.52	47.61	45.92	a
	2	0.97	0.52	46.45		
	3	0.92	0.52	43.71		
Treated <i>S. cerevisiae</i>	1	0.99	0.70	28.93	28.99	b
	2	0.97	0.67	30.59		
	3	0.92	0.67	27.44		
กากยีสต์	1	0.99	0.84	14.72	15.22	c
	2	0.97	0.82	15.55		
	3	0.92	0.78	15.40		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	0.99	0.85	13.30	12.25	d
	2	0.97	0.86	11.74		
	3	0.92	0.81	11.71		
กากยีสต์จัดหอฟ	1	0.99	0.80	19.19	19.95	e
	2	0.97	0.76	21.55		
	3	0.92	0.74	19.13		
กากยีสต์จัดหอฟที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	0.99	0.87	11.37	11.57	d
	2	0.97	0.85	12.37		
	3	0.92	0.82	10.98		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-18 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดย
ตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 4

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	0.95	0.46	51.01	49.80	a
	2	0.92	0.47	49.05		
	3	0.90	0.46	48.89		
Treated	1	0.95	0.45	52.21	52.02	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	0.92	0.45	51.30		
	3	0.90	0.43	52.56		
กากยีสต์	1	0.95	0.75	21.05	21.31	c,e
	2	0.92	0.73	20.65		
	3	0.90	0.70	22.22		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	0.95	0.72	24.42	23.49	d
	2	0.92	0.71	22.39		
	3	0.90	0.69	23.67		
กากยีสต์จัดหอพ	1	0.95	0.75	21.05	20.17	c,f
	2	0.92	0.74	19.89		
	3	0.90	0.72	19.56		
กากยีสต์จัดหอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	0.95	0.76	20.00	20.23	e,f
	2	0.92	0.74	19.57		
	3	0.90	0.71	21.11		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-19 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดย
ตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 5

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	0.97	0.50	48.46	49.17	a
	2	0.96	0.48	50.05		
	3	0.96	0.49	49.01		
Treated <i>S. cerevisiae</i>	1	0.97	0.42	56.49	55.39	b
	2	0.96	0.44	53.85		
	3	0.96	0.42	55.83		
กากยีสต์	1	0.97	0.76	21.65	22.84	c,d
	2	0.96	0.73	23.96		
	3	0.96	0.74	22.92		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	0.97	0.73	24.43	24.95	e,f
	2	0.96	0.73	24.06		
	3	0.96	0.71	26.35		
กากยีสต์ขจัดซอพ	1	0.97	0.74	23.71	23.53	c,e,g
	2	0.96	0.73	23.54		
	3	0.96	0.74	23.33		
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	0.97	0.74	23.71	24.57	d,f,g
	2	0.96	0.71	26.04		
	3	0.96	0.73	23.96		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-20 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดย
ตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 3

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	3.68	2.79	24.18	22.51	a,h,I,j
	2	3.54	2.80	20.90		
	3	3.52	2.73	22.44		
Treated	1	3.68	3.84	-4.35	0.00	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	3.54	3.71	-4.80		
	3	3.52	3.78	-7.39		
กากยีสต์	1	3.68	2.96	19.57	21.63	c,j,k
	2	3.54	2.74	22.60		
	3	3.52	2.72	22.73		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	3.68	2.76	25.00	23.72	a,c,d,e
	2	3.54	2.63	25.71		
	3	3.52	2.80	20.45		
กากยีสต์ขจัดซอพ	1	3.68	2.97	19.29	20.31	d,f,I,k
	2	3.54	2.85	19.49		
	3	3.52	2.74	22.16		
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	3.68	2.89	22.01	23.49	e,f,g,h
	2	3.54	2.74	22.60		
	3	3.52	2.61	25.85		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-21 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดย
ตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 4

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	3.75	2.28	39.20	40.18	a
	2	3.63	2.11	41.87		
	3	3.70	2.24	39.46		
Treated	1	3.75	2.55	32.00	33.32	b
<i>S. cerevisiae</i>	2	3.63	2.38	34.44		
	3	3.70	2.46	33.51		
กากยีสต์	1	3.75	2.91	22.40	22.47	c
	2	3.63	2.82	22.31		
	3	3.70	2.86	22.70		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	3.75	2.84	24.27	24.73	d
	2	3.63	2.72	25.07		
	3	3.70	2.78	24.86		
กากยีสต์ขจัดซอพ	1	3.75	2.89	22.93	22.75	c
	2	3.63	2.79	23.14		
	3	3.70	2.88	22.16		
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	3.75	2.84	24.27	24.46	d
	2	3.63	2.73	24.79		
	3	3.70	2.80	24.32		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-22 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดย
ตัวอย่างยีสต์ ณ สภาวะพีเอช 5

Treatment	ซ้ำที่	C_i	C_f	%E	%Eเฉลี่ย	*
<i>S. cerevisiae</i>	1	3.73	2.14	42.63	44.57	a
	2	3.64	1.92	47.25		
	3	3.72	2.09	43.82		
Treated	1	3.73	2.18	41.55	42.57	a
<i>S. cerevisiae</i>	2	3.64	2.04	43.96		
	3	3.72	2.15	42.20		
กากยีสต์	1	3.73	2.84	23.86	23.45	b,c,f
	2	3.64	2.78	23.63		
	3	3.72	2.87	22.85		
กากยีสต์ที่ผ่านขบวนการ ฆ่าเซลล์	1	3.73	2.78	25.47	25.25	b,d
	2	3.64	2.70	25.82		
	3	3.72	2.81	24.46		
กากยีสต์ขจัดซอพ	1	3.73	2.89	22.52	23.08	e,f
	2	3.64	2.80	23.08		
	3	3.72	2.84	23.66		
กากยีสต์ขจัดซอพที่ผ่าน ขบวนการฆ่าเซลล์	1	3.73	2.85	23.59	24.99	c,d,e
	2	3.64	2.69	26.10		
	3	3.72	2.78	25.27		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ก-23 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะทองแดงในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดย
ยีสต์ *Saccharomyce cerevisiae* ณ สภาวะพีเอช 3-5

pH	ซ้ำที่	Ci	Cf	%E	%Eเฉลี่ย	*
3	1	0.99	0.52	47.61	45.92	a
	2	0.97	0.52	46.45		
	3	0.92	0.52	43.71		
4	1	0.95	0.46	51.01	49.80	b
	2	0.92	0.47	49.51		
	3	0.90	0.45	48.89		
5	1	0.97	0.50	48.46	49.17	b
	2	0.96	0.48	50.05		
	3	0.96	0.49	49.01		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ตารางที่ ค-24 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วในน้ำเสียโรงงานอิเล็กทรอนิกส์ โดยยีสต์
S. cerevisiae ณ สภาวะพีเอช 3-5

pH	ซ้ำที่	Ci	Cf	%E	%Eเฉลี่ย	*
3	1	3.68	2.79	24.18	22.51	a
	2	3.54	2.80	20.90		
	3	3.52	2.73	22.44		
4	1	3.75	2.28	39.20	40.18	b
	2	3.63	2.11	41.87		
	3	3.70	2.24	39.46		
5	1	3.73	2.14	42.63	44.57	c
	2	3.64	1.92	47.25		
	3	3.72	2.09	43.82		

* แสดงความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's Multiple Range Test

ตัวอักษรที่เหมือนกันถือว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ภาคผนวก ง

การผลิตเบียร์

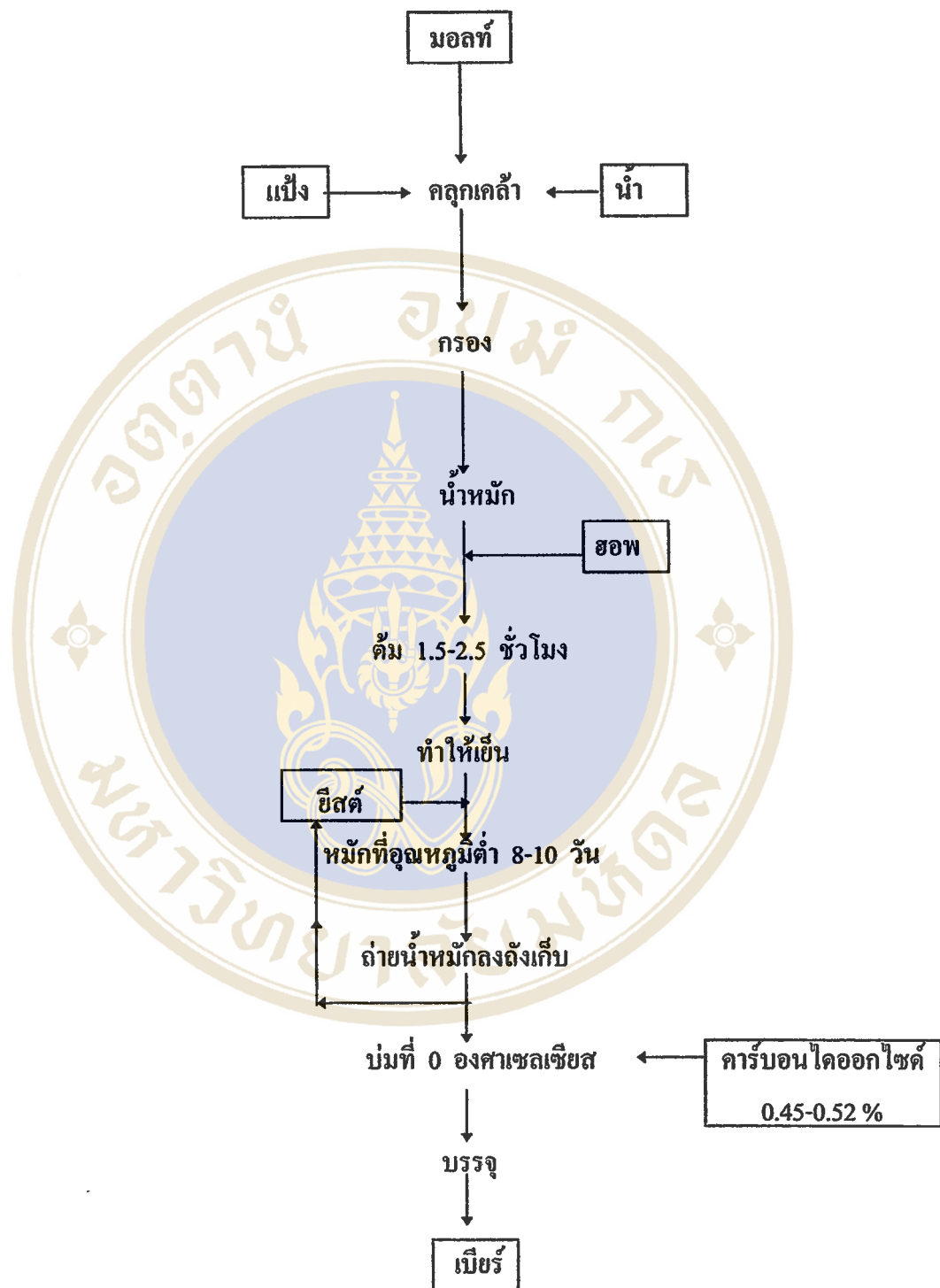
ในการผลิตเบียร์มีวัตถุดิบและขั้นตอนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 1

วัตถุดิบที่ใช้ในการหมักเบียร์

1) มอลท์ (Malt) เติร์ชมได้จากข้าวบาร์เลย์ (barley) โดยนำข้าวบาร์เลย์มาทำความสะอาด แช่น้ำทิ้งไว้ 2 วัน นำข้าวบาร์เลย์ที่ได้ไปบ่มไว้ 4-6 วันเพื่อให้งอกรากสั้นๆ ในช่วงของการงอกนี้ มีการสร้างเอนไซม์อัลฟา-อะมัยเลส(α -amylase) บีตา-อะมัยเลส(β -amylase) และโปรติโอไลติกเอนไซม์(proteolytic enzyme) หลังจากนั้นปรับอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อยับยั้งการงอก แต่ไม่สูงจนยับยั้งเอนไซม์ที่ต้องการ นำมอลท์ที่ได้ไปทำให้แห้ง และเก็บไว้ มอลท์เป็นแหล่งของเอนไซม์ต่างๆ เช่น อะมัยเลส(amylase) โปรติเอส(protease) นอกจากนี้ยังให้แป้ง โปรตีน สารเร่งการเติบโต และกลีโคส (วิลาลีย์ เจริญจิระตระกูล, 2536: 199) โดยมอลท์มีความสำคัญคือ เป็นแหล่งของน้ำตาลที่จะนำไปใช้ในการหมักเพราะในระหว่างการคั้น (mashing) แป้งของข้าวมอลท์จะถูกเอนไซม์เปลี่ยนเป็นน้ำตาล ข้าวมอลท์ไม่จำเป็นต้องเป็นข้าวบาร์เลย์เสมอไป ในบางกรณีก็ใช้มอลท์ที่ทำจากข้าวสาลีเช่นที่บริษัทไทยอมฤต บริวเวอรี่ จำกัด

2) เครื่องประกอบมอลท์ (malt adjuncts) เนื่องจากข้าวบาร์เลย์ประกอบด้วยโปรตีนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นหากใช้เฉพาะข้าวบาร์เลย์เป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนเพียงอย่างเดียวจะทำให้เบียร์ที่ได้มีสีเข้ม ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเจือจางโปรตีนด้วยการเติมแป้งลงไป แป้งเหล่านี้อาจได้จากข้าวหรือข้าวโพด แต่ในการผลิตเบียร์ของบางประเทศจะไม่อนุญาตให้เติมเครื่องประกอบมอลท์

3) ฮอป (hops) ฮอปเป็นโคน (cone) ที่ได้จากต้นฮอปเพศเมีย มีส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดคือ ส่วนของ essential oil และส่วนของเรซิน(resin) ที่มีกรดอัลฟา(α -acid) ในส่วนของ essential oil ทำให้เบียร์มีกลิ่นหอม มีรสและมีความคงตัว ฮอปให้แทนนิน (tannin) ซึ่งช่วยตกตะกอนโปรตีนให้เรซิน(resin) ซึ่งมีสารเคมีชนิดหนึ่งที่ทำให้ความขมคือ กรดอัลฟา (Alpha acid) และสามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวกเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ยังให้เพคติน(pectin) ซึ่งเชื่อว่าเกี่ยวข้องกับการเกิดฟองเบียร์ ฮอปมีองค์ประกอบ ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 1 วิธีการหมักเบียร์

ที่มา : วิลาวลัย เจริญจิระตระกูล, 2536: 203

ตารางที่ 1 แสดงองค์ประกอบของฮอป

Nature	Weight %
Alpha acids	2-12
Amino acids	0.1
Beta acids	1-10
Cellulose	40-50
Chlorophyll	-
Essential oil	0.5-5
Monosaccharides	2
Oils and fatty acids	trace to 25%
Pectins	2
Poly phenols (tannins)	2-5
Proteins	1
Salts (ash)	10
Water	8-12
Waxes and Steroids	-

ที่มา : Verzele & Keukeleire, 1991: 9

4) น้ำ น้ำที่ใช้ในการทำเบียร์ มีความสำคัญต่อรสชาติและสมบัติอื่นๆของเบียร์เป็นอย่างมาก จึงต้องควบคุมความกระด้าง ความเป็นกรดค้างและปริมาณเกลือแร่แต่ละชนิดด้วย พบว่าเกลือซัลเฟตจะทำให้เบียร์มีรสขมเฝื่อน เกลือคลอไรด์จะทำให้เบียร์มีรสนุ่มนวล ธาตุแคลเซียมจะช่วยให้เอนไซม์ทำงานได้ดีในระหว่างการต้ม และธาตุเหล็กกับทองแดงถ้ามีมากเกินไปจะทำให้ยีสต์ไม่ทำงาน ดังนั้น น้ำที่เหมาะสมในการทำเบียร์ ควรมีพีเอชระหว่าง 6.5-7.0 มีแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) และแมกนีเซียมคาร์บอเนต (MgCO_3) น้อยกว่า 100 PPM มีแคลเซียมซัลเฟต (CaSO_4) 250-500 PPM โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) 200-300 PPM มีเหล็ก (Fe) น้อยกว่า 1 PPM (วิลาวุธ, 2536)

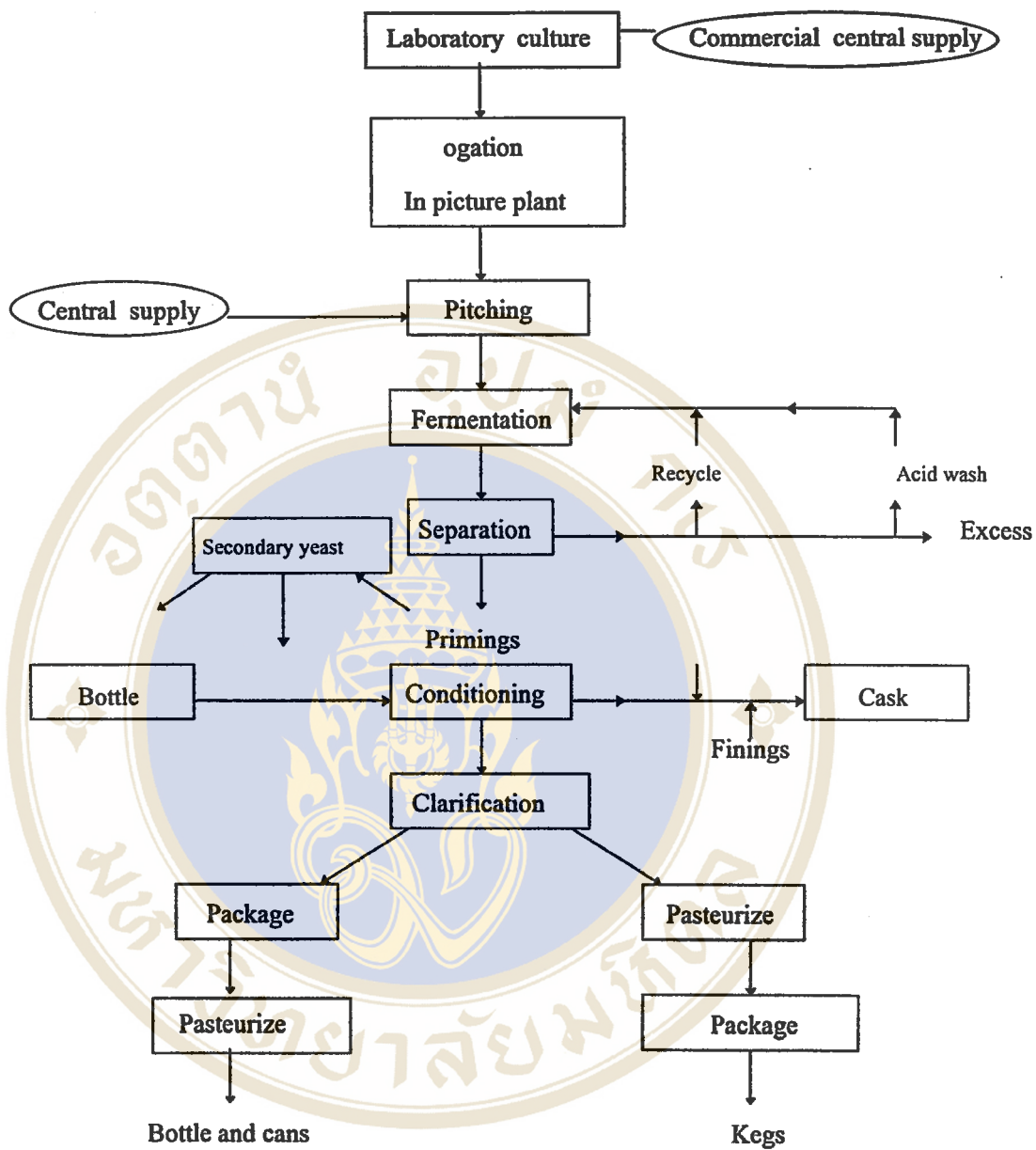
5) ยีสต์ หรือสำ ในขบวนการผลิตเบียร์ ขั้นตอนการหมักเบียร์เป็นสิ่งสำคัญมาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้ยีสต์ ซึ่งมีหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น ในการผลิตเบียร์จึงจำเป็นต้องเลือกใช้สายพันธุ์ยีสต์ที่บริสุทธิ์ มีคุณภาพ แข็งแรง มี activity ดี (Lewis & Young, 1995: 147-8)

สายพันธุ์ยีสต์ที่นิยมใช้อาศัยอยู่ใน Genus *Saccharomyces* และ Species *cerevisiae* พบว่าในอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์จะใช้ยีสต์ 2 ชนิดคือ ale yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) ใช้ผลิต 'ales' และ lager yeasts (*Saccharomyces carlsbergensis*) ใช้ผลิต lagers ในส่วนบริษัทบุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด ใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*

การใช้ยีสต์ในขบวนการผลิตเบียร์ ยีสต์จะถูกเติมลงใส่ถังหมักประมาณ 3/4 - 1 ปอนด์ต่อน้ำหมัก 1 บาร์เรล (31.5 แกลลอน) (วิลาวัลย์ เจริญจิระตระกูล, 2536: 201) โดยยีสต์จะต้องมีคุณภาพ และต้องผ่านการตรวจสอบจากห้องปฏิบัติการก่อนการใช้ยีสต์ (Lewis & Young, 1995: 151) ดังรูปที่ 2

หลังจากนั้นอาจจะมีการเติมยีสต์ประมาณ 0.5-2 ล้าน cell/mL (Lewis & Young, 1995: 157-8) ส่วนยีสต์จะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ได้ 6-7 รอบ ของการหมัก ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของยีสต์ และจำนวนยีสต์ที่ตายและอ่อนแอด้วย

ยีสต์ที่ผ่านขบวนการหมักเบียร์และยีสต์ส่วนเกินอื่น ๆ ก็จะถูกกรองแยกออกจากน้ำเบียร์ กลายเป็นกากยีสต์ (spent yeast หรือ waste yeast) ซึ่งเป็นส่วนที่ต้องกำจัด โดยรังสรรค์ ปิ่นทอง (2536: 5) กล่าวว่า บางโรงงานมีกากยีสต์มากถึง 1,300 ตัน/เดือน กากยีสต์บางส่วนจะมีโรงงานกลั่นสุรา โรงงานผลิตอาหาร หรือโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ต้องการรับซื้อไป ส่วนการจะนำเอากากยีสต์ไปทำให้เป็นยีสต์ที่บริสุทธิ์นั้นมีราคาแพง



รูปที่ 2.3 Flow diagram for the use of yeast in a brewery

ที่มา : Lewis & Young, 1995: 151

ขั้นตอนการผลิตเบียร์

1) การคลุกเคล้า (mashing) นำเครื่องประกอบมอลท์มาให้ความร้อน หลังจากนั้นเติมน้ำและมอลท์ลงไป นำไปคลุกเคล้า การคลุกเคล้าจะสกัดสารต่างๆจากมอลท์และเครื่องประกอบมอลท์ และเป็นช่วงที่เอนไซม์อะมัยเลสจากมอลท์สลายแป้งและโปรตีน ระดับในการสลายสารโดยเอนไซม์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเป็นสำคัญ อุณหภูมิเหมาะสำหรับบีต้า-อะมัยเลสประมาณ 57-65 องศาเซลเซียส อัลฟา-อะมัยเลสประมาณ 70-75 องศาเซลเซียส ส่วนการทำงานของเอนไซม์ที่สลายโปรตีนนั้น ถ้าอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียสจะได้เปปไทน์(peptone)และเพปไทด์(peptide) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง แต่ ถ้าอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียสจะได้กรดอะมิโนและเพปไทด์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้การควบคุมพีเอชระหว่างการคลุกเคล้าก็มีความจำเป็นเช่นกัน เพราะนอกจากมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ต่างๆแล้ว ยังมีผลต่อปริมาณสารสกัดที่ได้จากมอลท์และเครื่องประกอบ รวมถึงสารสกัดพวกเทนินและเรซินอีกด้วย พีเอชที่เหมาะสมในการคลุกเคล้าคือ 5.1-5.2 การปรับพีเอชทำได้โดยการเติมกรดแลกติก กรดซัลฟูริก หรือฟอสฟอริก จากนั้นจะกรองเพื่อแยกเอาเปลือกหรือส่วนอื่นๆของเมล็ดรวมทั้งตะกอน โปรตีนและของแข็งอื่นๆออกจากน้ำหมัก จะได้ส่วนของน้ำหมักสีน้ำตาล เรียกว่า wort นำส่วนน้ำหมักที่ได้ไปต้มประมาณหนึ่งชั่วโมงครึ่งถึงสองชั่วโมงครึ่ง ขณะต้มกวนไปด้วย และเมื่อการต้มใกล้สิ้นสุด เติมหอพลลงไปโดยใช้ฮอฟ 1/4 ปอนด์ต่อน้ำหนัก 1 บาร์เรล (31.5 แกลลอน) การต้มน้ำหมักกับฮอฟ มีจุดประสงค์หลายประการคือ

1. ทำให้น้ำหมักเข้มข้นขึ้น
2. ทำลายจุลินทรีย์ต่างๆในน้ำหมัก
3. ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์
4. สกัดสารต่างๆจากฮอฟ เช่น เทนิน เรซิน essential oil
5. ตกตะกอนโปรตีนและสารอื่นๆ
6. คาราเมลไลซ์น้ำตาล

เมื่อต้มเสร็จเอาฮอฟและตะกอนต่างๆออกจากน้ำหมัก

2) การหมัก น้ำหมักจะถูกทำให้เย็นลงโดยมีอุณหภูมิ น้ำหมักจะถูกทำให้เย็นลง โดยมีอุณหภูมิ 10-11 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปใส่ถังหมัก เติมเชื้อยีสต์ลงไปประมาณ 3/4-1 ปอนด์ ต่อน้ำหนัก 1 บาร์เรล (31.5 แกลลอน) อุณหภูมิของน้ำหมัก ในระหว่างการหมักแตกต่างกันแล้วแต่ชนิดของเบียร์ โดยทั่วไปจะอยู่ระหว่าง 3.3-14 องศาเซลเซียส หลังจากหมักได้ 24 ชั่วโมง จะเริ่มมีฟองเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของน้ำหมัก โดยมากในระยะนี้จะถ่ายน้ำหมักลงถังที่สอง เพื่อ

แยกเอาอีสต์ที่ตายหรืออ่อนแอ ตะกอนโปรตีนและพวกเรซินออกหลังจากหมักไปได้ 40-60 ชั่วโมง ฟองที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าน้ำหมักจะหนามาก ในระยะนี้อีสต์จะเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว และมีกิจกรรมสูง ทำให้เกิดความร้อนมากขึ้น ความร้อนเหล่านี้ทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 12-13 องศาเซลเซียส หลังจากหมักไปได้ 5 วัน ปริมาณฟองจะน้อยลง เมื่อหมักได้ 8-10 วัน ก็เป็นระยะสุดท้ายของการหมัก อีสต์เริ่มตกตะกอนที่ก้นถังหมัก น้ำหมักถูกทำให้เย็นลงเพื่อทำให้ตกตะกอนเร็วขึ้น (วิลลีย์ เจริญจิระตระกูล, 2536: 201) ในส่วนของอีสต์จะถูกนำกลับไปใช้ในการหมักใหม่ได้ โดยบริษัทบุญรอดบริวเวอรี่ จำกัดจะใช้อีสต์ประมาณ 6-7 รอบการหมัก

3) การบ่ม (aging) เมื่อการหมักเสร็จสิ้นสมบูรณ์แล้ว ถายน้ำหมักลงในถังเก็บและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลาหลายอาทิตย์ถึงหลายเดือน ในระยะนี้โปรตีน เซลล์อีสต์ เรซินและสารอื่นๆที่ไม่ต้องการจะตกตะกอน ทำให้เบียร์ใสขึ้น ขณะเดียวกันมีการสร้างสารพวก เอสเทอร์และสารประกอบอื่นๆ ทำให้เบียร์มีกลิ่น รสชาติและลักษณะดีขึ้น ในช่วงนี้จะมีการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทำได้ 2 แบบคือ การเติมคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ และการใช้ขบวนการครูเซนิ่ง (Krausening process) ซึ่งทำได้โดยการเติมอีสต์ลงไปเบียร์ที่เก็บไว้ในที่เย็น อีสต์เหล่านี้จะหมักอย่างช้าๆให้คาร์บอนไดออกไซด์ออกมา คาร์บอนไดออกไซด์ที่มากเกินไปถูกระบายออกไปจนได้ปริมาณเท่าที่ต้องการ หลังจากนั้นเก็บเบียร์ไว้ในที่เย็นหลายอาทิตย์ เพื่อให้อีสต์ตกตะกอน

โดยทั่วไปการเติมคาร์บอนไดออกไซด์ จะเติมให้มีคาร์บอนไดออกไซด์ในเบียร์ประมาณ 0.45-0.52 เปอร์เซ็นต์ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เติมลงไปนี้จะไปแทนที่ออกซิเจนโดยจะช่วยให้เบียร์คงตัว ช่วยในการทำให้เกิดฟอง และช่วยป้องกันการเน่าเสียของเบียร์

4) การกรอง (filtration) หลังจากเบียร์ซึ่งเก็บบ่มได้ที่แล้ว จะนำมาเข้าเครื่องกรองเพื่อแยกอีสต์ออก ทำให้น้ำเบียร์ดูใสขึ้น จากนั้นจะผ่านเข้าไปยังถังพักเพื่อส่งไปบรรจุต่อไป

5) การบรรจุ (packaging) ภาชนะในการบรรจุจะต้องสะอาดปราศจากเชื้อและการปนเปื้อนของสารเคมี เช่น ขวด กระป๋องหรือบาร์เรล เบียร์ที่ได้จะมีแอลกอฮอล์ประมาณ 3.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เบียร์ที่บรรจุบาร์เรลมักไม่พลาสเจอไรส์ ดังนั้นเก็บไว้ได้ไม่นาน ส่วนเบียร์ที่บรรจุกระป๋องหรือขวดมักพลาสเจอไรส์ประมาณ 60-61 องศาเซลเซียส จะทำให้เบียร์เก็บไว้ได้นานขึ้นแต่จะมีผลต่อรสชาติของเบียร์ ดังนั้นอาจจะใช้วิธีการอื่น เช่นการกรองด้วยเมมเบรน

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ

นางสาวรพีพร คำรัตน์

วัน เดือน ปีเกิด

3 กันยายน 2512

สถานที่เกิด

กรุงเทพมหานคร

ประวัติการศึกษา

มหาวิทยาลัยขอนแก่น, พ.ศ. 2530-2534 :

วิทยาศาสตรบัณฑิต(เทคนิคการแพทย์)

มหาวิทยาลัยมหิดล, พ.ศ. 2537-2542 :

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต(เทคโนโลยีการบริหารสิ่งแวดล้อม)

ทุนการศึกษา

ทุนเรียนดี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ. 2538