



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

ปริญญา

ฟิสิกส์

ฟิสิกส์

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ด้วยคีมจับเชิงแสงแบบเส้น

Growth Pattern of Yeast Cells Studied Under Line Optical Tweezers

นามผู้วิจัย นางสาวสุขพิชญา จรรย์ชวล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ชัยรัฐพร ฉัตรแถม, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุธี บุญช่วย, วท.ค.)

หัวหน้าภาควิชา

(อาจารย์วิวัฒน์ วงศ์ก่อเกื้อ, วท.ค.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Arg.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ด้วยคีมจับเชิงแสงแบบเส้น

Growth Pattern of Yeast Cells Studied Under Line Optical Tweezers

โดย

นางสาวสุภาพิษา จรรย์ชล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุขพิชญา จรรย์ชล 2556: การศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ด้วยคิมจับเชิงแสง
แบบเส้น ปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิสิกส์) สาขาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ฉัฐพร ฉัตรแถม, Ph.D. 82 หน้า

การแบ่งเซลล์และการเจริญเติบโตของเซลล์เป็นเรื่องที่นักวิทยาศาสตร์สนใจในการศึกษา
มาเป็นระยะเวลายาวนาน การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเจริญเติบโตของเซลล์นั้น
เป็นเรื่องที่ได้มีการทำวิจัยและเป็นที่น่าสนใจอย่างแพร่หลายนานนับศตวรรษ การวิจัยนี้จึงได้ทำการ
ทดลองศึกษาจับเซลล์ที่สนใจ โดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อว่า คิมจับเชิงแสง เครื่องมือ
ดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการจับวัตถุที่มีขนาดเล็กด้วยแสงเลเซอร์กำลังโพกัสสูงที่เคลื่อนที่ผ่าน
เลนส์ใกล้วัตถุ โดยเครื่องมือนี้ได้ทำการพิสูจน์มาเป็นเวลายาวนานว่ามีความปลอดภัย ไม่ส่งผล
อันตรายต่อสิ่งมีชีวิตเมื่อใช้เลเซอร์ในย่านความถี่อินฟราเรดในการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces bayanus* ภายใต้อุปกรณ์คิมจับเชิงแสงด้วยเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 1064 นาโนเมตร รูปแบบแสง
เลเซอร์ที่ใช้ในการทดลองได้มีการปรับเปลี่ยนเป็น 4 รูปแบบ กล่าวคือ เส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม
และตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวแอล จากผลการวิจัยพบว่ายีสต์มีการเจริญเติบโตตามเส้นทางของ
รูปแบบเลเซอร์ที่กำหนดเนื่องจากปรากฏการณ์ความร้อนที่เกิดขึ้น ณ บริเวณจุดโฟกัสของแสง
เลเซอร์

ผลที่ได้จากการศึกษาการเจริญเติบโตของยีสต์ สามารถคำนวณหาอัตราการเจริญเติบโตได้
จากการวิเคราะห์ภาพด้วยกระบวนการทางคอมพิวเตอร์ในทุกๆ 5 นาที นอกจากนั้นในงานวิจัยนี้ยัง
ได้มีการศึกษาและอธิบายโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการเจริญเติบโตของเซลล์ดังกล่าวภายใต้
กระบวนการคิมจับเชิงแสง

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

/ /

Sookpichaya Charrunchon 2013: Growth Pattern of Yeast Cells Studied Under Line Optical Tweezers. Master of Science (Physics), Major Field: Physics, Department of Physics. Thesis Advisor: Miss Nattaporn Chattham, Ph.D. 82 pages.

Cell growth and division has been of scientists' interest for over generations. Several mathematical models have been reported derived from conventional method of cell culture. Here we applied optical tweezers, a powerful tool for manipulating microscopic objects using tightly focused beam through a high numerical aperture microscope objective, to guide cell division directionally. Thus far, the use of infrared light under optical tweezers have proven to be an ideal tool for studying biological system with less optical damage to living cells.

The patterns of *Saccharomyces Bayanus* yeast growth was studied under 1064 nm line optical tweezers generated by time-shared multiple optical traps. Yeast growth was found following the path of the various generated laser patterns in linear, circular, square and L shapes, speculatively as a result of localized heating effect due to absorption at the focal point.

The area of grown yeast cells was measured through image processing procedure and plotted as a function of time. Mathematical model for the growth rate under line optical trap has also been determined and discussed.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

/ /

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจากบุคคลหลายฝ่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ฉัฐพร ฉัตรแถม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่กรุณาให้ความรู้ในเรื่องทฤษฎีเชิงแสง ให้คำแนะนำในการทำวิจัยทั้งเรื่องการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองทางแสงและแนวทางการวิเคราะห์ผล รวมไปถึงยังให้การสนับสนุนในการนำเสนอผลงานวิจัยนอกสถาบันเพื่อเพิ่มพูนประสบการณ์การนำเสนอผลงานและทำให้ได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความคิดเห็นในด้านงานวิจัยกับผู้ฟังหลากหลายกลุ่มจึงส่งผลให้มีแนวความคิดมากมายในการทำวิจัยและส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทธิ บุญช่วย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่กรุณาให้ความรู้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองทางด้านคณิตศาสตร์เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณคุณอุษวิณ เรณูสวัสดิ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทางด้านการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ขอขอบคุณนายธนศ ญ วิเชียร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านข้อมูลการติดตั้งอุปกรณ์การทดลองและความช่วยเหลือในการทำทดลองตลอดมา ขอขอบคุณนางสาวฐิติรัตน์ กันทะวัง ที่สละเวลาในการสอนการเลี้ยงยีสต์ และให้ข้อมูลทางด้านชีววิทยาที่มีประโยชน์กับการทดลอง และขอขอบคุณนางสาวเปมิกา หิรัญกิตติวงศ์ ที่สละเวลาให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในด้านต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนวิชาความรู้ด้านวิชาการและในทุกๆ ด้านที่มีประโยชน์

ขอขอบพระคุณบุพการีและญาติสำหรับกำลังใจ การสนับสนุน และความเชื่อมั่นตลอดการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมา

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และต่างสถาบันที่ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจ

ศุขพิชญ์ จรรย์ชด

มกราคม 2556

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	31
ผลและวิจารณ์	37
ผล	37
วิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	58
สรุป	58
ข้อเสนอแนะ	58
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	59
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก ภาพแสดงการศึกษารูปแบบของแสงเลเซอร์ที่สามารถเกิดขึ้น ได้ด้วยชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสง	63
ภาคผนวก ข ภาพแสดงการศึกษากาจรณเดบโตของยีสต์ภายใต้คิมจับ เชิงแสง	72
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	82

สารบัญตาราง

ตารางผนวกที่		หน้า
ก1	ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นตัวอักษรต่างๆ	71
ข1	ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปเส้นตรง ในช่วงเวลา 0:01-6:41 ชั่วโมง	73
ข2	ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปเส้นตรง ในช่วงเวลา 6:43 - 8:02 ชั่วโมง	74
ข3	ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปวงกลม ในช่วงเวลา 0:01-1:22 ชั่วโมง	75
ข4	ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปวงกลม ในช่วงเวลา 1:39-2:20 ชั่วโมง	76
ข5	ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในช่วงเวลา 0:01-1:50 ชั่วโมง	77
ข6	ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในช่วงเวลา 1:58-4:20 ชั่วโมง	78
ข7	ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในช่วงเวลา 4:25-5:35 ชั่วโมง	79
ข8	ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปตัว L ในช่วงเวลา 0:01-3:49 ชั่วโมง	80
ข9	ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปตัว L ในช่วงเวลา 3:56-9:30 ชั่วโมง	81

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แรงเกรเดียนต์ที่เป็นแรงที่มีความเข้มสูงที่คอยดึงคู่และต่อต้านไม่ให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทางของแรงที่พยายามทำให้อนุภาคเคลื่อนออกจากวงของลำแสงเลเซอร์	6
2	เมื่ออนุภาคถูกจับที่จุดศูนย์กลางของแสงเลเซอร์ แรงกระเจิงที่มีทิศทางในแนวข้างนั้นจะส่งผลให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ตามทิศทางของจุดโฟกัสของแสงเลเซอร์	7
3	ภาพแสดงการประยุกต์ใช้คีมจับเชิงแสงกับฟิลาเมนต์ในไซโตพลาสซึมสังเคราะห์ของเซลล์หัวหอม โดยคีมจับเชิงแสงได้เริ่มต้นจับที่บริเวณตัวอักษร A ในนิวเคลียสซึ่งแสดงด้วยตัวอักษร N จากนั้นคีมจับเชิงแสงเลื่อนตำแหน่งไปยังบริเวณ B เพื่อดึงฟิลาเมนต์ออกตามเส้นทางจากตัวอักษร A ถึง B	10
4	กระจกสองบานในตัวสแกนกลวงอิมิตเตอร์	11
5	กระบวนการผลิตภาพในการสแกนแสงเลเซอร์	12
6	ระบบแกนอ้างอิง	13
7	รูปแบบแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นภายใต้ระบบสแกนของกระจกสองบาน	13
8	ชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์สำเร็จรูปในขนาดที่แตกต่างกัน	14
9	โครงสร้างภายในของชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์สำเร็จรูป	14
10	ส่วนประกอบของชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์สำเร็จรูปและบอร์ดควบคุม	15
11	องค์ประกอบภายในของยีสต์	16
12	องค์ประกอบของผนังเซลล์ยีสต์	17
13	การแบ่งเซลล์ของยีสต์	19
14	กราฟตัวอย่างของฟังก์ชันลอจิสติก	20
15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันลอจิสติกส์และตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	21
16	กราฟแสดงฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ในรูปแบบที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร a	22
17	กราฟแสดงฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ในรูปแบบที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร b	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
18	กราฟแสดงฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ในรูปแบบที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร c	23
19	กราฟแสดงตัวอย่างของลักษณะกราฟที่สอดคล้องกับฟังก์ชันรีชาร์ด	26
20	กราฟแสดงค่าเศษเหลือที่มีลักษณะจุดในรูปแบบกระจายรอบแกนนอน	27
21	กราฟค่าเศษเหลือในรูปแบบสุ่มซึ่งสอดคล้องกับ โมเดลแบบเชิงเส้นมากที่สุด	27
22	กราฟค่าเศษเหลือในรูปแบบไม่สุ่มกล่าวคือเป็นรูปตัวอักษรภาษาอังกฤษแบบหงายและแบบคว่ำตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับ โมเดลแบบไม่เป็นเชิงเส้นมากที่สุด	28
23	ชุดอุปกรณ์กิมจับเชิงแสงที่ใช้ในการทดลองศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์	30
24	ชุดอุปกรณ์การเลี้ยงยีสต์ประกอบด้วยอาหารเลี้ยงยีสต์แบบแข็งที่อยู่ในภาควงกลม มีฝาปิดและอาหารเลี้ยงยีสต์แบบเหลวที่บรรจุในหลอดทดลอง	31
25	ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์กิมจับเชิงแสงเพื่อใช้ในการทดลอง	33
26	ภาพแสดงหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่แสดงผลการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการควบคุมแสงเลเซอร์และชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์	33
27	แสดงกระบวนการแปลงผลของภาพยีสต์ที่ได้จากการทดลองเพื่อที่จะใช้หาค่าจำนวนฟิคเซลที่ยีสต์ครอบครอง	35
28	รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบเส้นตรงแนวตั้งในขนาดที่แตกต่างกัน	37
29	รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบเส้นตรงแนวนอนในขนาดที่แตกต่างกัน	37
30	รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบเส้นตรงในมุมที่แตกต่างกัน	38
31	รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบวงกลมในขนาดที่แตกต่างกัน	38
32	รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบวงรีในขนาดที่แตกต่างกัน	39
33	รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบวงรีในทิศทางที่แตกต่างกัน	39
34	รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมในขนาดที่แตกต่างกัน	39
35	รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นตัวอักษรต่างๆ	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
36	ภาพแสดงยีสต์ที่ถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสงภายใต้เลเซอร์รูปเส้นตรงที่มีทิศทางมุมแตกต่างกัน	40
37	ภาพแสดงการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบเลเซอร์เส้นตรง โดยภาพตัวอย่างนี้เป็นการถอดภาพจากไฟล์วิดีโอที่มีความยาว 8 ชั่วโมง	41
38	ภาพแสดงการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบเลเซอร์วงกลม โดยภาพตัวอย่างนี้เป็นการถอดภาพจากไฟล์วิดีโอที่มีความยาว 2 ชั่วโมง 20 นาที	42
39	ภาพแสดงการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบเลเซอร์สี่เหลี่ยม โดยภาพตัวอย่างนี้เป็นการถอดภาพจากไฟล์วิดีโอที่มีความยาว 5 ชั่วโมง 35 นาที	42
40	ภาพแสดงการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบเลเซอร์ตัวอักษรแอล โดยภาพตัวอย่างนี้เป็นการถอดภาพจากไฟล์วิดีโอที่มีความยาว 9 ชั่วโมง 30 นาที	43
41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลา	43
42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาในช่วงนาทิตี่ 130-220 โดยมีลักษณะสอดคล้องกับฟังก์ชันเอกโปเนนเชียล	44
43	กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันลอจิสติกส์ (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา	45
44	กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น	45
45	กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา	46
46	กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น	46
47	กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันริชาร์ด (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา	47
48	กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น	47
49	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลา	48

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
50	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาในช่วงนาที่ที่ 0-110	48
51	กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันลอจิสติกส์ (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา	49
52	กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น	50
53	กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา	50
54	กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น	51
55	กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันริชาร์ด (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา	52
56	กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น	52
57	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาของการให้อาหารทุกๆ 48 ชั่วโมง	53
58	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาของการให้อาหารทุกๆ 24 ชั่วโมง	54
59	กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาของการให้อาหารทุกๆ 24 และ 48 ชั่วโมง	54

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า	
ก1	ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นเส้นตรงในแนวตั้งที่มีความยาวแตกต่างกัน	64
ก2	ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นเส้นตรงในแนวนอนที่มีความยาวแตกต่างกัน	65
ก3	ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นเส้นตรงในทิศทางมุมที่แตกต่างกัน	66
ก4	ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นวงกลมที่มีขนาดแตกต่างกัน	67
ก5	ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นวงรีที่มีขนาดแตกต่างกัน	68
ก6	ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นวงรีในทิศทางมุมที่แตกต่างกัน	69
ก7	ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นสี่เหลี่ยมที่มีขนาดแตกต่างกัน	70

การศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ด้วยคีมจับเชิงแสงแบบเส้น

Growth Pattern of Yeast Cells Studied Under Line Optical Tweezers

คำนำ

คีมจับเชิงแสง (Optical Tweezers) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายหรือควบคุมวัตถุที่มีขนาดนาโนเมตรหรือไมโครเมตรด้วยแสงเลเซอร์ที่ผ่านเลนส์ใกล้วัตถุกำลังโฟกัสสูง โดยจะเกิดแรงขนาดพิโคนิวตัน กระทำกับวัตถุภายใต้แสงเลเซอร์ดังกล่าวจึงทำให้สามารถควบคุมตำแหน่งของวัตถุได้ เทคนิคนี้ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายทั้งในทางฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์ และชีววิทยา โดยในด้านทางชีววิทยานั้นคีมจับเชิงแสงได้รับการพิสูจน์ว่าเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมในการศึกษาเซลล์สิ่งมีชีวิตเพราะนอกจากการใช้เลเซอร์อินฟราเรดจะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กแล้ว คีมจับเชิงแสงยังมีความเหมาะสมที่จะจับวัตถุที่มีขนาดเล็กถึง 5 นาโนเมตรและเกิดแรงได้สูงถึง 100 พิโคนิวตันอีกด้วย

ยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces bayanus* เป็นยีสต์ที่มีความสำคัญในด้านกระบวนการผลิตอาหารและเครื่องดื่ม นอกจากนี้ยีสต์สายพันธุ์นี้ก็เป็นที่ยอมรับสำหรับการศึกษาการเจริญเติบโตทั้งในด้านวิทยาศาสตร์พื้นฐานและวิทยาศาสตร์ประยุกต์เป็นอันดับสองรองจาก *Saccharomyces cerevisiae* ที่ได้รับการขนานนามว่าเป็นแม่แบบในการศึกษาสิ่งมีชีวิตยูคาริโอตชั้นสูง โดยลักษณะกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก อีกทั้งลักษณะการเจริญเติบโตแบบแตกหน่อของยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์มีการศึกษาในหลากหลายรูปแบบกรรมวิธีและเป็นงานวิจัยที่ได้รับความสนใจมาเป็นระยะเวลายาวนาน

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces bayanus* ด้วยเครื่องมือคีมจับเชิงแสงภายใต้รูปแบบของแสงเลเซอร์ที่กำหนด กล่าวคือรูปแบบเส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม และตัวอักษรแอล จากนั้นทำการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันที่สอดคล้องกับการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบที่กำหนด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อประยุกต์การติดตั้งอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์ในการควบคุมรูปแบบลักษณะของแสงเลเซอร์สำหรับระบบทางชีวภาพ
2. เพื่อศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบของแสงเลเซอร์ที่กำหนด โดยการควบคุมภายใต้ระบบคิมจับเชิงแสง
3. เพื่อศึกษาโมเดลอัตราการเจริญเติบโตของยีสต์ คำนวณสมการและฟังก์ชันที่เกี่ยวข้อง
4. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้อาหารและอัตราการเจริญเติบโตของยีสต์

การตรวจเอกสาร

ในช่วงเวลามากกว่า 30 ปีที่ผ่านมา ได้มีการนำเลเซอร์มาศึกษาเพื่อใช้ในการจับและควบคุม วัตถุที่มีขนาดเล็กตั้งแต่ระดับอะตอมไปจนกระทั่งถึงวัตถุขนาดไมครอน โดยการศึกษาแรงโดยใช้ คลื่นแสงนั้นเริ่มขึ้นตั้งแต่ปี 1970 (Ashkin, 1970) และหลังจากนั้นเทคนิคจับเชิงแสงได้ถือกำเนิด ขึ้นในปี 1986 โดย Ashkin และคณะได้ทำการทดลองโดยใช้แสงเลเซอร์จับอนุภาคขนาดระหว่าง 25 nm จนถึง 10 μm ซึ่งแขวนลอยอยู่ในน้ำได้ (Ashkin et al., 1986) ในปีถัดไป Ashkin ได้สาธิตว่า สามารถใช้แสงในการบังคับการเคลื่อนที่ของไวรัส, ยีสต์, แบคทีเรีย, โปรโตซัว และออร์แกนัล ภายในเซลล์สิ่งมีชีวิตได้โดยไม่ทำให้เกิดอันตรายขึ้นกับเซลล์ (Ashkin and Dziedzic, 1987) เทคนิค นี้นอกจากจะสามารถใช้ในการจับเซลล์สิ่งมีชีวิตแล้ว ในสาขาฟิสิกส์ของอะตอมยังได้พัฒนาเทคนิค นี้ทำให้สามารถจับอะตอมได้ ซึ่งทำให้ Steven Chu ผู้ที่ร่วมคิดเทคนิค Optical Tweezers ในการจับ อนุภาค ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี 1997 ในหัวข้อ Laser Cooling and Trapping of Atoms

Optical Tweezers ได้มีการศึกษาอย่างแพร่หลายอย่างมากในทั้งในทางชีววิทยาและฟิสิกส์ โดยในทางชีววิทยาได้มีการทดลองนำเซลล์ ออร์แกนัล หรืออนุภาคกลมขนาดเล็กมาติดกับ บริเวณหรือเซลล์ที่ต้องการ และศึกษาควบคุมการเคลื่อนที่ของวัตถุดังกล่าว (Grier, 2003) ในปี 1991 ได้เริ่มทำการศึกษาในเซลล์ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม และพบว่ามีความสามารถในการ ตอบสนองต่อแสงเลเซอร์โดยการขยายเท้าเทียม (pseudopodia) โดยมีทิศทางไปยังเลเซอร์ (Buehler, 1991) ในปี 2002 ได้มีการศึกษา neuronal cell-lines ด้วยแสงอินฟราเรดและค้นพบว่า ลักษณะลำแสงมีผลต่อการเจริญเติบโตของเซลล์ดังกล่าว (Ehrlicher et al., 2002) นอกจากนั้นยังได้ มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของแบคทีเรีย ทดสอบปฏิกิริยาระหว่างเม็ดเลือดแดงและไวรัส เป็นต้น

การศึกษาเกี่ยวกับสิ่งมีชีวิตในทางชีววิทยา หากจะพูดถึงสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวที่มีประโยชน์ ในการผลิตอาหารต่างๆและมีการเจริญเติบโตแบ่งเซลล์โดยใช้เวลาไม่นานมากก็คงจะเป็นสิ่งมีชีวิต ประเภทยีสต์ ซึ่งยีสต์เป็นสิ่งมีชีวิตที่ใช้ในการทดลองศึกษาอย่างแพร่หลาย จากการสืบค้นวารสาร จากฐานข้อมูล ISI พบว่ามีการศึกษาการจับและควบคุมยีสต์ด้วยแสงเลเซอร์แต่ลักษณะการทดลอง รูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ยังไม่แพร่หลายมากนัก จึงถือว่าการทดลองที่น่าสนใจและ หากทดลองได้ในรูปแบบที่หลากหลายมากขึ้น ย่อมทำให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบ การเจริญเติบโตของยีสต์กับเลเซอร์ได้มากขึ้น

คีมจับเชิงแสง

คีมจับเชิงแสง (Optical Tweezers) เป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้แสงเลเซอร์สำหรับจับอนุภาคนาโนขนาดเล็กให้คงอยู่ในบริเวณที่ต้องการ โดยการตั้งระบบของลำแสงเลเซอร์เพื่อให้โฟกัสไปยังจุดที่ต้องการซึ่งส่งผลให้ความเข้มของสนามไฟฟ้ามีความสูงมากพอที่จะจับอนุภาคไดอิเล็กตริกในตำแหน่งต่างๆได้ ในเบื้องต้นคีมจับเชิงแสงได้ออกแบบเพื่อใช้งานในด้านการจับอะตอมและศึกษาเลเซอร์อุณหภูมิต่ำ (Laser cooling) และในปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปจนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับสิ่งมีชีวิตอีกด้วย

1. ทฤษฎีของคีมจับเชิงแสง

1.1 แรงที่มีผลต่อการจับอนุภาค

โฟตอนที่อยู่ในลำแสงเลเซอร์นั้นต่างมีโมเมนตัมและสามารถที่จะทำให้เกิดแรงได้ เมื่อแสงของเลเซอร์ถูกโฟกัสผ่านเลนส์ใกล้วัตถุจะทำให้โฟตอนแต่ละตัวพยายามแสดงแรงออกมาในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง แรงดังกล่าวที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อรวมกันจะทำให้เกิดแรงที่สามารถจับและเคลื่อนที่อนุภาคนาโนขนาดเล็กได้ ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นภายใต้เครื่องมือที่มีชื่อว่าคีมจับเชิงแสง แรงที่เกิดขึ้นมีสองประเภทแบ่งเป็นแรงเกรเดียนท์ (gradient force) และแรงกระเจิง (scattering force) ซึ่งแรงดังกล่าวจะกระทำบนอนุภาคและจับให้อนุภาคนั้นถูกควบคุมอยู่ในบริเวณของแสงเลเซอร์

แรงเกรเดียนท์เกิดมาจากผลของเกรเดียนท์ของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเมื่อแสงเลเซอร์ถูกโฟกัสและโฟตอนของแสงได้ถูกจัดวางตำแหน่งโดยสนามไฟฟ้างกล่าวมีความเข้มสูงสุดตรงบริเวณที่แคบที่สุดของแสงเลเซอร์ที่จุดโฟกัส โดยอนุภาคไดอิเล็กตริกที่ศึกษานั้นจะถูกจับติดกับเกรเดียนท์ของสนามไฟฟ้าของลำแสงเลเซอร์

ส่วนแรงกระเจิงนั้นเป็นแรงที่ส่งผลให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่โดยเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของโฟตอนที่เคลื่อนที่ในทิศทางของลำแสงเลเซอร์ แรงนี้จะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของอนุภาคให้ไปอยู่ยังบริเวณจุดศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์

เมื่อรวมผลของแรงที่เกิดขึ้นทั้งสองเข้าด้วยกันจะพบว่าอนุภาคจะถูกจับภายใต้ระบบ คีมจับเชิงแสงตามทิศทางของจุดโฟกัสของลำแสงเลเซอร์ (Ethier and Simmons, 2007) การกระจัด ในแนวด้านข้างจากจุดศูนย์กลางของแสงเลเซอร์นั้นขึ้นอยู่กับความแรงของแรงกระเจิงและ เสถียรภาพของคีมจับเชิงแสง โดยหากพิจารณาแบบรูปธรรมจะพบว่าเสถียรภาพของคีมจับเชิงแสง นั้นเปรียบเทียบกับค้ำกับค่าคงที่ของสปริงในกฎของฮุก (Hooke's Law) (Neuman and Block, 2004)

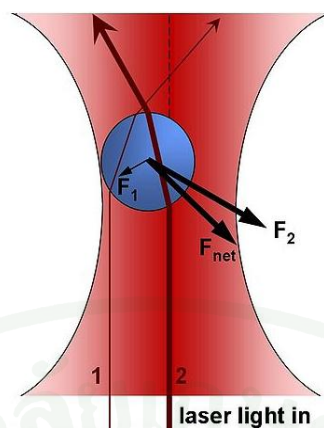
1.2 แบบจำลองของแรงในการจับอนุภาค

การเกิดแรงจับบนอนุภาคนั้นขึ้นอยู่กับตรงกันข้ามกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเทียบกับ ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบ โดยแบบจำลองเชิงแสงแบบดั้งเดิมนั้นสามารถอธิบาย ถึงแรงที่ใช้ในการจับและระยะทางของอนุภาคได้เพียงแต่เมื่อรัศมีของอนุภาคนั้นมีขนาดใหญ่กว่า ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์มากๆ แต่เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ถูกจับนั้นมีขนาดเล็ก กว่าความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ เราจะพิจารณาอนุภาคดังกล่าวเป็น ไดโพลไฟฟ้า (Electric dipole) โดยการประมาณการดังกล่าวจะสามารถใช้ในการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นบนอนุภาคได้

1.2.1 แบบจำลองของแรงในการจับอนุภาค

เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ถูกจับมีขนาดมากกว่าความยาวคลื่นของ แสงเลเซอร์ที่ตกกระทบจะสามารถใช้แบบจำลองแบบดั้งเดิมในการอธิบายถึงผลของแรงกระเจิง และแรงเกรเดียนท์ที่เกิดขึ้นบนอนุภาคที่ถูกจับซึ่งส่งผลให้อนุภาคนั้นถูกจับที่ศูนย์กลางของ ลำแสงเลเซอร์

เนื่องจากโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาและเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางของแสง เลเซอร์นั้นล้วนแล้วแต่มีโมเมนตัม โดยขนาดของโมเมนตัมที่สอดคล้องกับโฟตอนนั้นมีการ เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการปะทะกับอนุภาคที่ถูกจับเนื่องมาจากโฟตอนมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางและ ส่งผลไปยังการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของโฟตอน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมจึงส่งผลให้เกิด แรงกระทำบนโฟตอน และเนื่องจากกฎข้อที่สามของนิวตันจะได้ว่า จะเกิดแรงที่มีค่าเท่ากับแรงที่ เกิดขึ้นข้างต้นกระทำกับอนุภาคที่ถูกจับไว้



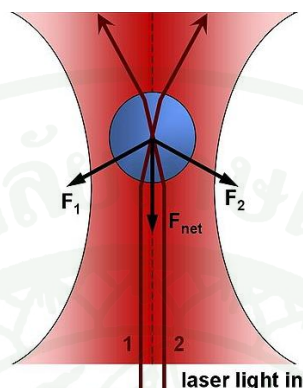
ภาพที่ 1 แรงเกรเดียนต์เป็นแรงที่มีความเข้มสูงที่คอยดึงดูดและต่อต้านไม่ให้อนุภาคเคลื่อนที่ไปในทิศทางของแรงที่พยายามทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากวงของลำแสงเลเซอร์

ที่มา: Neuman et al. (2004)

แสงเลเซอร์ที่ใช้ในคีมจับเชิงแสงนั้นจะมีลักษณะเป็นลักษณะเกาส์เซียน ซึ่งหมายความว่าผลที่เกิดขึ้นบนโฟตอนแต่ละตัวที่กระทำต่ออนุภาคที่ถูกจับนั้นขึ้นกับระยะทางที่ห่างจากอนุภาคข้างต้น โดยโฟตอนที่อยู่ใกล้กับอนุภาคที่ถูกจับจะเกิดแรงดึงดูดซึ่งส่งผลดึงอนุภาคผ่านศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ โดยแรงดังกล่าวจะมีผลต่ออนุภาคสูงกว่าแรงที่เกิดจากโฟตอนที่อยู่ไกลออกไปซึ่งเกิดแรงที่จะพยายามทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ออกจากลำแสงเลเซอร์ (Gordon, 1973) เมื่อแรงกระเจิงที่เกิดขึ้นพยายามที่จะเลื่อนอนุภาคที่ถูกจับไปยังด้านซ้ายหรือด้านขวาจากจุดศูนย์กลางของลำแสง ในขณะที่นั้นจะมีแรงที่มีค่าความดึงดูดสูง ที่พยายามจะเอาชนะแรงกระเจิงเพื่อที่จะให้อนุภาคคงอยู่ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ดังที่แสดงในภาพที่ 1 โดยแรงความเข้มสูงนี้มีชื่อว่า แรงเกรเดียนต์ (Neuman and Block, 2004)

เมื่อแรงเกรเดียนต์ส่งผลให้อนุภาคอยู่ในตำแหน่งจุดศูนย์กลางของแสงเลเซอร์ จากนั้นลำแสงโฟตอนที่มีการหักเหจะเกิดสมมาตรกับอนุภาคที่ถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสง ซึ่งส่งผลให้ผลรวมของโมเมนตัมมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมจึงทำให้ไม่มีแรงที่จะดึงอนุภาคให้ออกจากจุดศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์ นอกจากนั้นยังส่งผลให้ตำแหน่งของอนุภาคในแนวข้างยังคงเดิมอีกด้วย ดังนั้นเมื่อไม่มีแรงรวมในฝั่งด้านข้างของอนุภาค จะทำให้มีแรงเพียงแรงเดียวที่จะทำให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ตามแนวแกนได้ ซึ่งแรงดังกล่าวคือแรงกระเจิง กล่าวโดยสรุปคือ แรงกระเจิงเป็นแรงที่ส่งผลให้อนุภาคที่ถูกจับอยู่ที่จุดศูนย์กลางของลำแสงเลเซอร์

สามารถเลื่อนที่ไปในแนวข้างได้และส่งผลให้อนุภาคที่ถูกจับเลื่อนที่ไปตามทิศทางของจุดโฟกัสของลำแสงเลเซอร์ดังที่แสดงในภาพที่ 2 โดยแรง F_1 และ F_2 ที่เกิดขึ้นในภาพเป็นแรงที่มีขนาดเท่ากันจึงส่งผลให้อนุภาคอยู่ในสถานะสมดุลที่จุดศูนย์กลางของโฟกัสของเลเซอร์ (Gordon, 1973)



ภาพที่ 2 เมื่ออนุภาคถูกจับที่จุดศูนย์กลางของแสงเลเซอร์ แรงกระเจิงที่มีทิศทางในแนวข้างนั้นจะส่งผลให้อนุภาคมีการเคลื่อนที่ตามทิศทางของจุดโฟกัสของแสงเลเซอร์

ที่มา: Neuman et al. (2004)

1.2.2 แบบจำลองของไดโพลไฟฟ้า

เมื่อรัศมีของอนุภาคที่ถูกจับ มีขนาดน้อยกว่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้แบบจำลองไดโพลไฟฟ้าเพื่อที่จะคาดการณ์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโฟตอนและอนุภาค เนื่องจากขนาดของอนุภาคนั้นมีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์มาก ๆ จึงทำให้อนุภาคนั้นสามารถถูกพิจารณาว่าเป็นจุดไดโพลที่อยู่ท่ามกลางสนามไฟฟ้าของโฟตอน

แรงที่กระทำบนจุดประจุเดี่ยวที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กนั้นเรียกว่าแรงลอเรนซ์ (Lorentz force) (Harada and Asakura, 1996) และสามารถอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\vec{F} = (\vec{p} \cdot \nabla) \vec{E} + \frac{d\vec{p}}{dt} \times \vec{B} \quad (1)$$

โดยที่ \vec{F} คือ แรง (N)

\vec{E} คือ สนามไฟฟ้า (V/m)

\vec{B} คือ สนามแม่เหล็ก (T)

\vec{p} คือ โพลาริเซชันของไดโพล โดยที่ $\vec{p} = q\vec{d}$

q คือ ประจุไฟฟ้า (C)

\vec{d} คือ ระยะทางระหว่างประจุ (m)

จากนั้นทำการเปลี่ยนตัวแปรโพลาริเซชันของไดโพลในสมการ (1) ด้วยสมการ $\vec{p} = \alpha\vec{E}$ โดยที่ α คือ ค่าสภาพมีขั้ว (polarizability) ดังนั้นจากสมการ (1) สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\vec{F} = \alpha \left[(\vec{E} \cdot \nabla) \vec{E} + \frac{d\vec{E}}{dt} \times \vec{B} \right] \quad (2)$$

ซึ่งเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ว่า

$$\vec{F} = \alpha \left[\frac{1}{2} \nabla E^2 + \frac{d}{dt} (\vec{E} \times \vec{B}) \right] \quad (3)$$

ในพจน์สุดท้ายทางด้านขวามือของสมการ (3) นั้นเป็นอนุพันธ์ (derivative) ของเวกเตอร์พอยน์ติง (Poynting vector) ซึ่งเป็นค่าที่สามารถอธิบายได้ถึงกำลังฟลักซ์ที่ผ่านสนามไฟฟ้า โดยระหว่างการทดลองคิมจับเชิงแสงนั้นค่าความถี่ของตัวอย่างจะมีค่าน้อยกว่าค่าความถี่ของแสงเลเซอร์กล่าวคือมีค่าประมาณ 10^{14} เฮิร์ต ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่ากำลังของเลเซอร์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (Ashkin et al., 1986) เมื่อกำลังของเลเซอร์มีค่าคงที่จะทำให้ค่าอนุพันธ์ของเวกเตอร์พอยน์ติงมีค่าเป็นศูนย์จึงสามารถลบพจน์ดังกล่าวออกจากสมการได้ ดังนั้นค่าของแรงที่กระทำบนไดโพลไฟฟ้าสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\vec{F} = \frac{1}{2} \alpha \nabla E^2 \quad (4)$$

เนื่องจากค่าของ E^2 ในสมการ (4) นั้นเป็นค่าของความเข้มแม่เหล็กไฟฟ้าของโฟตอน โดยค่าดังกล่าวจะมีค่าสูงที่สุดเมื่อมีแรงของแสงที่มีค่าสูงที่สุดกระทำบนอนุภาค เนื่องจาก

ความเข้มของโฟตอนนั้นมีค่าสูงที่สุดที่จุดศูนย์กลางของโพกัสของแสงเลเซอร์ซึ่งมีแรงกระทำกับอนุภาคโดยมีลักษณะเป็นแรงเกรเดียนท์ทำหน้าที่ในการดึงอนุภาคให้อยู่ยังจุดศูนย์กลางของแสงเลเซอร์

จากการประมาณทางด้านทัศนศาสตร์ เมื่อแรงเกรเดียนท์มีหน้าที่ทำให้อนุภาคที่ถูกจับอยู่ตรงจุดศูนย์กลางของแสงเลเซอร์ การเคลื่อนที่ของอนุภาคจะเกิดขึ้นในทิศทางด้านข้างเท่านั้นด้วยแรงกระเจิง ซึ่งค่าของแรงกระเจิงนั้นสามารถเขียนเป็นสมการโดยการประมาณแบบ Rayleigh ได้ดังนี้

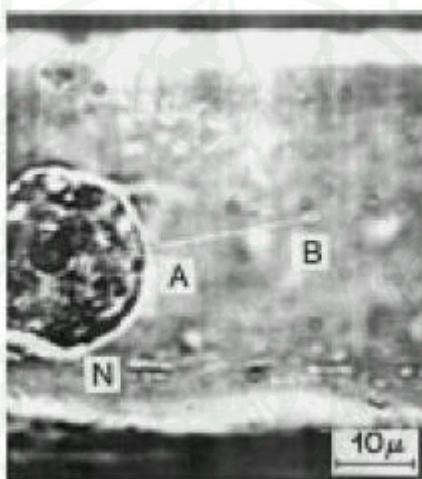
$$\vec{F}_{scat}(r) = \frac{k^4 \alpha^2}{6\pi c n^3 \epsilon_0} I(r) \hat{z} \quad (5)$$

และแรงนี้นั่นเองที่ทำให้อนุภาคที่ถูกจับนั้นเคลื่อนที่ไปตามแสงเลเซอร์ (Harada and Asakura, 1996)

2. การประยุกต์ใช้กิมจับเชิงแสง

ถึงแม้ว่าแรกเริ่มนั้นกิมจับเชิงแสงได้ออกแบบมาเพื่อใช้ในการจับอะตอม แต่จากประโยชน์ของกิมจับเชิงแสงนั้นจึงได้มีการนำมาประยุกต์อย่างหลากหลายทั้งทางฟิสิกส์ เคมี และชีววิทยา สิ่งมีชีวิตชนิดแรกที่ได้ถูกประยุกต์ใช้กับกิมจับเชิงแสงคือไวรัสและแบคทีเรีย (Ashkin and Dziedzic, 1989) ด้วยความยาวคลื่นเลเซอร์ที่เหมาะสมกับการทดลองนั้นทำให้แบคทีเรียไม่ถูกทำลายเมื่อถูกจับด้วยกิมจับเชิงแสง และภายหลังจากนั้นนักวิทยาศาสตร์ได้มีการประยุกต์ใช้กิมจับเชิงแสงกับสิ่งมีชีวิตหลายชนิดรวมไปถึงเม็ดเลือดแดง สาหร่ายสีเขียว อะมีบาและสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็กชนิดอื่นๆ (Smith et al., 1996) และในอนาคตก็จะมีการใช้เซลล์หัวหอมในการผลิตเพื่อทำการศึกษาฟิลาเมนต์ในไซโตพลาสซึมสังเคราะห์ โดยการใช้กิมจับเชิงแสงในการดึงฟิลาเมนต์จากผิวของนิวเคลียสของเซลล์ไปยังจุดศูนย์กลางของแควคิวโอลของเซลล์ดังที่แสดงในภาพที่ 3 นอกจากนี้กิมจับเชิงแสงยังได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อทำการศึกษาผลที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลที่มีความหลากหลายซับซ้อนเช่น DNA อีกด้วย (Svoboda and Block, 1994)

คีมจับเชิงแสงยังเป็นเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในทางฟิสิกส์และเคมีอีกด้วย มีการศึกษาการเหนี่ยวนำให้วัสดุไม่สมมาตรที่มีขนาดไมครอนเกิดทอร์คและเกิดการหมุนขึ้น (Murray, 1962) และยังได้มีการแสดงให้เห็นอีกว่าอนุภาคนาขนาดเล็กที่มีคุณสมบัติเป็นโลหะและมีค่าสภาพมีขั้วมากกว่าอนุภาคไดอิเล็กตริกสามารถที่จะถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสงได้ (Rohrbach, 2005) ในการศึกษาเกี่ยวกับสารคอลลอยด์นั้นได้มีการใช้คีมจับเชิงแสงในการวัดค่าที่สนใจโดยตรงนอกจากนั้นในการวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าแรงดึงดูดสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างอนุภาคในสารละลายคอลลอยด์ในบริเวณใกล้พื้นผิวซึ่งผลที่เกิดดังกล่าวตรงข้ามกับทฤษฎีที่เคยกล่าวมาจากการวิจัยข้างต้นยังสามารถผลิตผลึกคอลลอยด์ที่มีลักษณะกึ่งเสถียรได้อีกด้วย (Matthew and Block, 2003)



ภาพที่ 3 ภาพแสดงการประยุกต์ใช้คีมจับเชิงแสงกับฟิลาเมนต์ในไซโตพลาซึมสังเคราะห์ของเซลล์หัวหอม โดยคีมจับเชิงแสงได้เริ่มต้นจับที่บริเวณอักษร A ในนิวเคลียสซึ่งแสดงด้วยตัวอักษร N จากนั้นคีมจับเชิงแสงเลื่อนตำแหน่งไปยังบริเวณ B เพื่อดึงฟิลาเมนต์ออกตามเส้นทางจากตัวอักษร A ถึง B

ที่มา: Ashkin (2000)

3. ชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์

ชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์หรือตัวสแกนเลเซอร์ (Laser scanners) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเคลื่อนแสงเลเซอร์ด้วยกระจกสองบานในแนวสองมิติ กล่าวคือกระจกบานแรกเคลื่อนที่ไปตามแกน X และกระจกอีกบานเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน Y โดยกระจกทั้งสองบานจะอยู่บนกัลวานอมิเตอร์ (galvanometers)

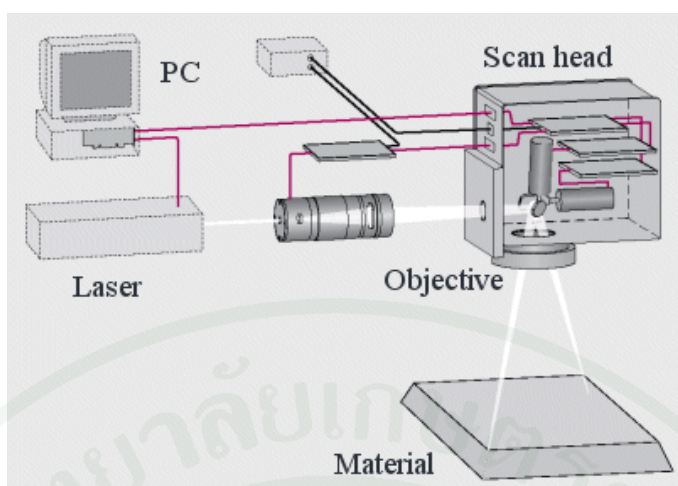
กัลวานอมิเตอร์คือมอเตอร์ที่สามารถหมุนได้เพียงแค่ 20 องศา โดยตำแหน่งของตัวหมุนกัลวานอมิเตอร์นั้นจะถูกควบคุมโดยความต่างศักย์ขาเข้า เนื่องจากน้ำหนักที่เบาของตัวหมุนจึงทำให้กระจกเคลื่อนที่ค่อนข้างเร็วจึงทำให้สามารถผลิตรูปแบบแสงเลเซอร์ได้อย่างรวดเร็วและหลากหลายซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่ง

การควบคุมสัญญาณสำหรับตัวสแกนกัลวานอมิเตอร์นั้นส่งสัญญาณดิจิทัลมาจากบอร์ดควบคุม โดยบอร์ดดังกล่าวที่อยู่ภายในหัวสแกนนั้นสามารถแปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณที่เหมาะสมซึ่งทำให้สามารถรวบรวมทั้งควบคุมตำแหน่งของกระจกได้



ภาพที่ 4 กระจกสองบานในตัวสแกนกัลวานอมิเตอร์

ที่มา: The Scanlab AG Company



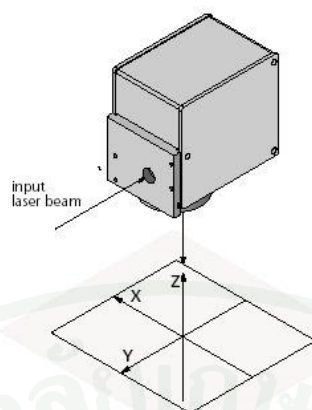
ภาพที่ 5 กระบวนการผลิตภาพในการสแกนแสงเลเซอร์

ที่มา: The Scanlab AG Company

ในการผลิตภาพที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับการกระโดดตำแหน่งของกระจกและการปรับกระจกให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ โดยการกระโดดของตำแหน่งกระจกนั้นเป็นการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของกระจกแฉกในขณะที่ไม่ใช่แสงเลเซอร์กระทบที่กระจกจึงส่งผลให้จุดโฟกัสของแสงเลเซอร์นั้นมีการกระโดดไปยังตำแหน่งใหม่ ถ้าหากระบบของเลเซอร์ไม่สามารถปรับให้มีการเปิดปิดอย่างรวดเร็วก็สามารถแก้ไขได้โดยการปรับให้ความเร็วการกระโดดตำแหน่งของกระจกมีค่าสูงขึ้นมากพอที่จะหลีกเลี่ยงผลกระทบที่ไม่ต้องการได้

การปรับตำแหน่งกระจกให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการเป็นการเคลื่อนที่ของกระจกขณะที่มีแสงเลเซอร์กระทบที่กระจก ซึ่งจะทำให้จุดโฟกัสของแสงเลเซอร์เคลื่อนไปตามเส้นทางที่กำหนดด้วยความเร็วที่ต้องการ โดยการกระโดดตำแหน่งของกระจกและการปรับกระจกให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการนั้นสามารถอธิบายด้วยเวกเตอร์ได้เนื่องจากตัวสแกนเลเซอร์นั้นมักจะสร้างรูปแบบในลักษณะเชิงเส้น

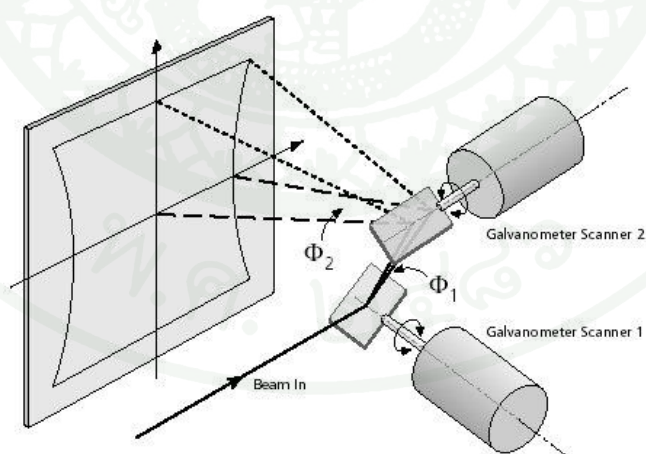
ในระบบการอ้างอิงด้วยแกน X, Y, Z นั้นจะใช้ระบบมือขวาโดยกำหนดให้ตำแหน่งจุดเริ่มต้นของระบบอ้างอิงอยู่ที่จุดศูนย์กลางของภาพ ซึ่งแกน Y มีทิศทางสวนทางกับทิศทางของแสงเลเซอร์และแกน X จะอยู่ตั้งฉากทางฝั่งขวาของแกน Y



ภาพที่ 6 ระบบแกนอ้างอิง

ที่มา: The Scanlab AG Company

ขอบเขตของภาพที่เกิดขึ้นนั้นถูกกำหนดโดยมุมสแกนที่มากที่สุดและความยาวโฟกัสของเลนส์โก้วัดดูหรือระยะระหว่างหัวสแกนและฉากรับภาพที่เกิดขึ้น โดยปกติแล้วหัวสแกนจะมีการกำหนดขอบเขตของภาพเอาไว้เรียบร้อยแล้วเนื่องจากหากเลเซอร์เคลื่อนที่ออกไปนอกบริเวณที่กำหนดจะทำให้หัวสแกนถูกทำลายเนื่องจากการดูดซึมแสงเลเซอร์ที่มีกำลังสูงนั่นเอง



ภาพที่ 7 รูปแบบแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นภายใต้ระบบสแกนของกระจกสองบาน

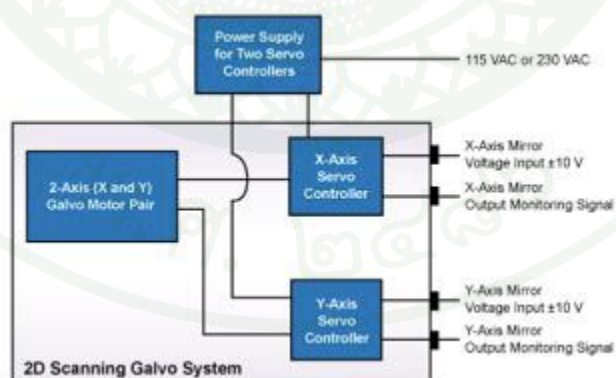
ที่มา: The Scanlab AG Company



ภาพที่ 8 ชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์สำเร็จรูปในขนาดที่แตกต่างกัน

ที่มา: The Scanlab AG Company

ชุดทดลองระบบปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์สำเร็จรูป ประกอบไปด้วย มอเตอร์ที่ใช้สำหรับสแกนแบบกัลวานอมิเตอร์ โดยมีกระจกติดตั้งอยู่บนแกน และตัวตรวจจับที่จะให้ผลลัพธ์ของตำแหน่งที่ต้องการตอบสนองส่งกลับไปยังบอร์ดควบคุมนอกจากนั้นแม่เหล็กที่เคลื่อนไหวได้ ที่ออกแบบสำหรับอุปกรณ์ดังกล่าวนี้จะต้องถูกออกแบบมาเพื่อให้มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว และตอบสนองต่อความถี่เรโซแนนซ์ที่สูงได้ ส่วนตำแหน่งของกระจกจะเปลี่ยนแปลงตามการควบคุมโดยระบบที่อยู่ภายในมอเตอร์จากการเข้ารหัสเนื่องจากการทดลองค่าความเร่งเชิงมุม



ภาพที่ 9 โครงสร้างภายในของชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์สำเร็จรูป

ที่มา: Thorlabs Company

ที่แกนหมุนของกระจกมีค่าค่อนข้างสูงจึงทำให้ลักษณะรูปร่างขนาด และโมเมนต์ความเฉื่อยของกระจกเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบระบบดังกล่าว ยิ่งไปกว่านั้นกระจกจะต้องยังคงมีลักษณะที่แบนราบและคงที่แบบวัตถุแข็งเกร็งถึงแม้จะเคลื่อนที่ในขณะที่มีความเร่งสูงอยู่ก็ตาม ซึ่งลักษณะที่กล่าวมาดังกล่าวเป็นลักษณะที่จะทำให้ระบบการทดลองมีประสิทธิภาพอย่างสูงที่สุด



ภาพที่ 10 ส่วนประกอบของชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์สำเร็จรูปและบอร์ดควบคุม

ที่มา: Thorlabs Company

ระบบของกระจกสแกนนั้นจะมีกระจกในหนึ่งหรือสองแนวแกน (ในการทดลองใช้กระจกแบบสองแนวแกน) และการ์ดควบคุม โดยกระจกจะต้องมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้หลากหลายตามความต้องการ ส่วนบอร์ดควบคุมนั้นจะเป็นตัวนำสัญญาณของตำแหน่งที่ได้รับการป้อนค่ามาแปลงเป็นค่าความต่างศักย์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนและควบคุมให้กระจกหมุนและเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ โดยจะต้องควบคุมให้กระแสไฟในวงจรบอร์ดมีค่าคงที่ถึงแม้จะมีความถี่สูงก็ตาม

ยีสต์

ยีสต์เป็นยูคาริโอติกเซลล์จึงมีโครงสร้างของเซลล์แบบยูคาริโอต โดยลักษณะรูปร่างและโครงสร้างของยีสต์จะแตกต่างกันไปตามสปีชีส์

1. องค์ประกอบของเซลล์ยีสต์

ยีสต์มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

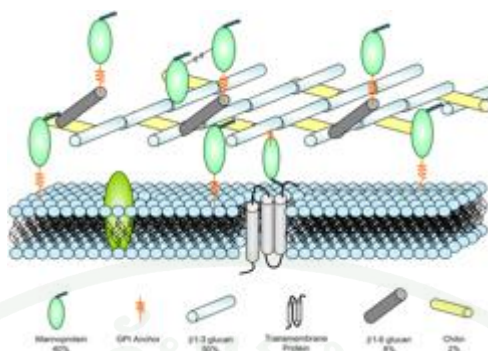
1.1 แคปซูล (capsule) ยีสต์บางชนิดมีสารเมือกเหนียว ที่ขับออกสู่ภายนอกเซลล์ที่เรียกว่า แคปซูล แคปซูลส่วนใหญ่ประกอบด้วยโพลีแซ็กคาไรด์ ซึ่งมีทั้งเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ แมนโนส (mannose) และสารที่คล้ายแป้ง



ภาพที่ 11 องค์ประกอบภายในของยีสต์

ที่มา: Wikipedia Encyclopedia

1.2 ผนังเซลล์ (cell wall) ผนังเซลล์ของยีสต์จะบางในเชื้ออายุน้อยและจะหนาขึ้นตามอายุ องค์ประกอบส่วนใหญ่ของผนังเซลล์ของ *S.cerevisiae* มีพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด คือ กลูแคน (glucan) 30-34 % และแมนแนน (mannan) 30 % กลูแคน (ประกอบด้วย ดี-กลูโคส) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบในยีสต์ต่างๆ แต่แมนแนน (ประกอบด้วยดี-แมนโนส) จะไม่พบในผนังเซลล์ของ *Schizosaccharomyces*, *Nadsonia*, *Rhodotorulal* และราที่มีเส้นใยทุกชนิดผนังเซลล์ของยีสต์มีโปรตีนประกอบอยู่ด้วย โปรตีนบางชนิดทำหน้าที่เป็นเอนไซม์ ไกมันมีอยู่ 8.5 – 13.5 % ปริมาณไคติน (chitin) เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของยีสต์



ภาพที่ 12 องค์ประกอบของผนังเซลล์ยีสต์

ที่มา: European Association for Specialty Yeast Products (EURASYP)

1.3 เยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) เยื่อหุ้มเซลล์มีความหนาประมาณ 8 ไมโครเมตร ประกอบด้วยชั้น 3 ชั้น ที่ทับต่อแสงอิเล็กตรอน 2 ชั้น คือ ชั้นนอกและชั้นในสุด เยื่อหุ้มเซลล์ประกอบด้วยไขมัน (รวมทั้งฟอสโฟลิพิด) โปรตีน และโพลิแซ็กคาไรด์

1.4 องค์ประกอบในโปรโทพลาซึม (protoplasm) เซลล์ยีสต์ประกอบด้วยไซโทพลาซึม ซึ่งเป็นสารกึ่งเหลว ภายในมีไรโบโซมซึ่งล้วนมี RNA มาก และออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้ม ได้แก่ เอนโดพลาสมิกเรติคูลัม ซึ่งเชื่อมต่อกับเยื่อหุ้มนิวเคลียสชั้นนอก และอาจติดต่อกับเยื่อหุ้มเซลล์ด้วย ในไซโทพลาซึมมีเอ็นไซม์หลายชนิด

1.5 นิวเคลียส (nucleus) เป็นออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสล้อมรอบ เยื่อหุ้มนิวเคลียสมีสมบัติยอมให้สารบางอย่างผ่านได้เท่านั้น (semipermeable membrane) นิวเคลียสมีหน้าที่เกี่ยวกับเมแทบอลิซึม และการสืบพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต

1.6 ไมโทคอนเดรีย (mitochondria) เป็นออร์แกเนลล์ที่มีเยื่อหุ้ม มีลักษณะคล้ายเส้นด้ายพันกันอยู่ ไมโทคอนเดรียมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.3-1 ไมโครเมตร และความยาวถึง 3 ไมโครเมตร มีเยื่อหุ้มสองชั้น ชั้นในจะพับเว้าเข้าข้างในเป็นคริสตี (cristae) ไมโทคอนเดรียประกอบด้วยลิโปโปรตีนจำนวนมาก และมี RNA และ DNA เล็กน้อย DNA นี้ต่างจาก DNA ของนิวเคลียส เนื่องจากไมโทคอนเดรียมีเอ็นไซม์เกี่ยวกับการหายใจ จึงเรียกว่าเป็นแหล่งพลังงานของเซลล์

1.7 แวกิวโอล (vacuole) ภายในเซลล์ยีสต์จะมีแวกิวโอลอยู่หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งแวกิวโอล ซึ่งมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดาเมื่อย้อมสี ในเซลล์ที่กำลังเจริญเติบโตภายในแวกิวโอลจะไม่มีโครงสร้างที่เป็นชิ้นส่วนแต่เมื่อเซลล์เข้าสู่ระยะ “stationary phase” แวกิวโอลจะมีสารแกรนูลเพิ่มขึ้น อาจเป็นเมตาฟอสเฟต (metaphosphate) พอลิฟอสเฟต (polyphosphate) หรือลิพิด สารที่อยู่ในแวกิวโอลที่แยกได้ ได้แก่ เอนไซม์ที่เกี่ยวกับการไฮโดรไลซ์ปฏิกิริยาต่างๆ เช่น โปรตีนเอส (protease) ไรโบนิวคลีเอส (ribonuclease) และเอสเทอเรส (esterase) โดยจากการที่พบเอ็นไซม์ไฮโดรเลสในแวกิวโอล จึงคิดว่าแวกิวโอลเปรียบเหมือนไลโซโซม

1.8 อินคลูชันต่างๆ (inclusion) เซลล์ยีสต์ที่แก่จะมีผนังเซลล์หนาขึ้นและสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ เช่น ความร้อน ความแห้งแล้ง และสารเคมี ยีสต์บางชนิดสะสมสารต่างๆ ไว้จำนวนมาก เช่น ไกมัน คาร์โบไฮเดรตหรือโปรตีน บางชนิดมีรงควัตถุสีเหลือง ส้ม ชมพู น้ำตาลหรือคำ รงควัตถุเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นคาโรทีนอยด์ที่ละลายในไขมัน นอกจากนี้ รงควัตถุ เช่น ซีโตโครม เฟลวิน ฮีโมโกลบิน และอื่นๆ ที่พบในเซลล์พืชและสัตว์ชั้นสูง ก็พบในยีสต์ด้วย

2. การเจริญเติบโตและการแบ่งเซลล์ยีสต์

การแบ่งตัวของยีสต์โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ แบบไม่อาศัยเพศและแบบอาศัยเพศ

2.1 แบบไม่อาศัยเพศ

2.1.1 การแตกหน่อ (Budding)

ก. แบ่งตามตำแหน่งที่เกิด แบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

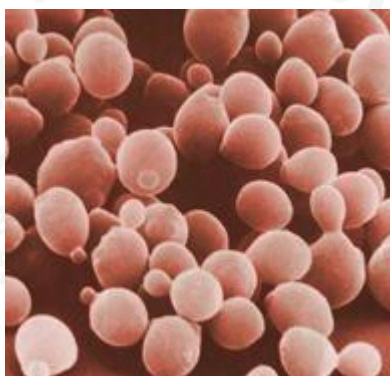
1) Monopolar budding เป็นการแตกหน่อที่ปลายด้านเดียวซ้ำๆ กัน เช่น

Malassezia

2) Bipolar budding เป็นการแตกหน่อที่ปลายทั้งสองข้าง โดยจะเกิดที่ละข้าง

ซึ่งหน่อแยกออกจากเซลล์แม่เมื่อมีการสร้างผนังกันทางระหว่างเซลล์ใหม่ทั้งสอง ดังนั้นจึงเป็นการแตกหน่อบนฐานที่กว้าง หรือที่เรียกว่า “buddfission” ลักษณะดังกล่าวพบได้ใน apiculate yeast เช่น *Nadsonia*, *Hanseniaspora* และ *Kloeckera*

3) Multipolar budding เป็นการแตกหน่อโดยรอบเซลล์ทุกๆด้าน ซึ่งสามารถแตกหน่อได้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนเซลล์แม่เช่น *Saccharomyces*, *Debaryomyces*, *Hansenula* และ *Pichia*



ภาพที่ 13 การแบ่งเซลล์ของยีสต์

ที่มา: Yeast Integrative Biology Project, Terence Donnelly Centre for Cellular and Biomolecular Research, University of Toronto

ข. แบ่งตามลักษณะการแบ่งของผนังเซลล์แม่ แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

1) Holoblastic budding ผนังเซลล์ของเซลล์แม่ทุกชั้นร่วมในการสร้างหน่อ การแตกหน่อแบบนี้เป็นลักษณะของ *Saccharomycetales*

2) Enteroblastic budding นั้น การแตกหน่อแรกจะเกิดจากการมีรอยแยกบนผนังเซลล์ของเซลล์แม่โดยที่ชั้นในของผนังเซลล์แม่ยื่นเจริญออกไปเพื่อสร้างชั้นนอกสุดของผนังหน่อ และท้ายสุดขาดออกจากเซลล์แม่ หลังจากที่มีหน่อจำนวนมากเกิดที่บริเวณเดียวกัน ตำแหน่งที่สร้างหน่อบนเซลล์แม่ล้อมรอบด้วยคอลลา (colla) วิธีการแตกหน่อแบบนี้พบในสายพันธุ์ *Basidiosporogenous*

2.1.2 การแบ่งเซลล์แบบฟิวชั่น (Fusion)

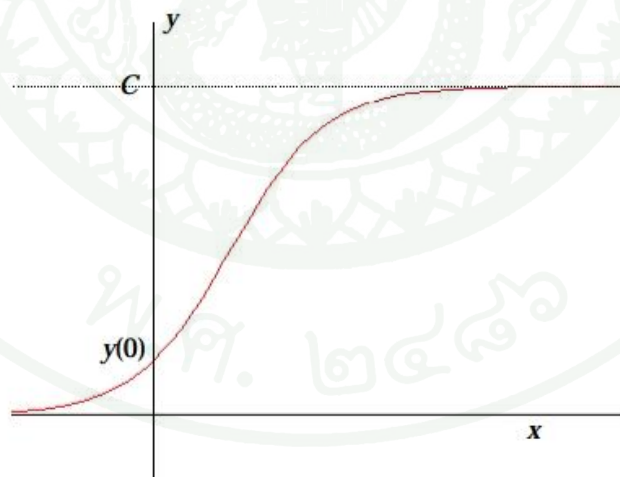
การแบ่งเซลล์แบบฟิวชั่นเกิดจากการสร้างผนังเซลล์มาขวางกัน (cross wall) แยกเซลล์ทั้งสองออกจากกัน โดยก่อนที่จะเกิดการแบ่งเซลล์จะต้องเกิดการเจริญของเซลล์อย่างสมบูรณ์

2.2 การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศ

เกิดจากการที่เซลล์ของยีสต์หรือสปอร์ที่มีนิวเคลียสเป็น Haploid และมี Mating type ตรงข้ามกันมารวมกันในไซโตพลาซึมเป็น Diploid มีการแบ่งเซลล์แบบ Meiosis จนได้เซลล์ Haploid 4 นิวเคลียส มี 2 ชนิด คือพวกที่สร้าง Ascospore และ Basidiospore

ฟังก์ชันการเจริญเติบโต

1. ฟังก์ชันลอจิสติกส์



ภาพที่ 14 กราฟตัวอย่างของฟังก์ชันลอจิสติกส์

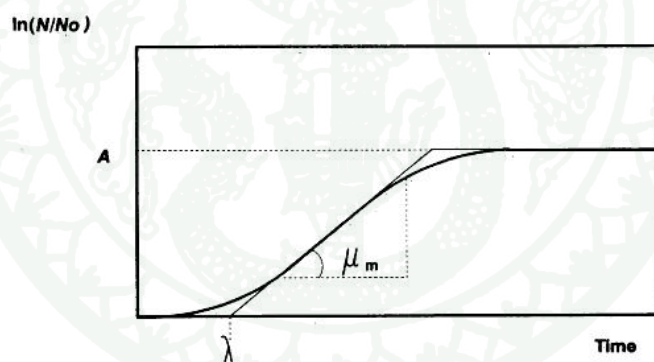
ที่มา: Department of Mathematics, Xavier University

ฟังก์ชันลอจิสติกส์ (Logistic function) เป็นฟังก์ชันที่มักใช้ในการอธิบายลักษณะการเจริญเติบโต โดยลักษณะของฟังก์ชันดังกล่าวจะมีรูปแบบการเจริญเติบโตคล้ายคลึงกับแบบเอกซ์โปเนนเชียลกล่าวคือจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในช่วงแรกแต่เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดพื้นที่ในการเจริญเติบโตจึงทำให้อัตราการเจริญเติบโตค่อยๆ ช้าลงและคงที่

จากกราฟข้างต้นจะเห็นว่าลักษณะของกราฟเป็นรูปตัวเอสซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวมีรูปแบบสมการโดยทั่วไปดังนี้

$$y = \frac{a}{1 + \exp(b - ct)} \quad (6)$$

ฟังก์ชันดังกล่าวเป็น โมเดลที่นิยมใช้ในการอธิบายการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตทางชีวภาพซึ่งจะมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงสิ่งแวดล้อมของการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตดังกล่าวมีความหนาแน่นสูง



ภาพที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันลอจิสติกส์และตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ที่มา: Zwietering (1990)

ในปกติทั่วไปของการพิจารณาโมเดลการเจริญเติบโตมักจะนิยามวาดเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันลอการิทึมของอัตราการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตกับเวลา เพื่อให้มีความสอดคล้องกับการพิจารณาค่าของตัวเลขต่างๆที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตที่ทำการศึกษา จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรทางคณิตศาสตร์ในสมการ (6) ให้เป็นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับทางชีวภาพ กล่าวคือ กำหนด 3 ตัวแปร คือ μ_m หรือ μ คืออัตราการเจริญเติบโตสูงสุดกำหนดโดยความชันของ

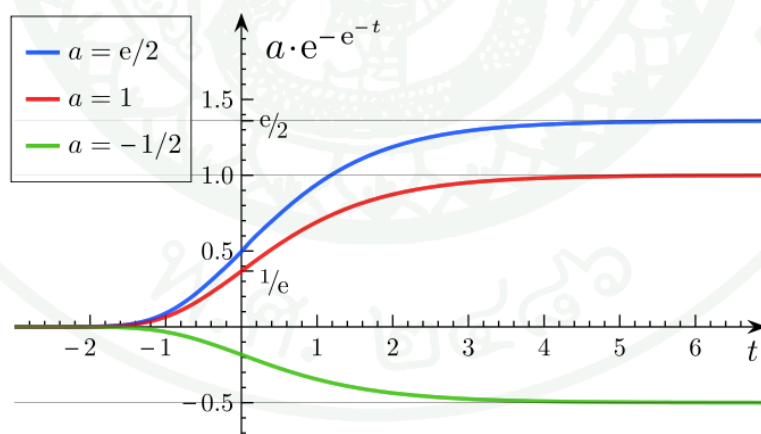
กราฟภายหลังจากช่วงเวลาพักการเจริญเติบโต λ คือช่วงระยะเวลาพักการเจริญเติบโต และ A คือค่าของการเจริญเติบโตสูงสุด ซึ่งได้สมการลอจิสติกส์ที่มีตัวแปรทางชีวภาพเป็นดังนี้

$$y = \frac{a}{1 + \exp(b - ct)} = \frac{A}{1 + \exp\{(4\mu/A)(\lambda - t) + 2\}} \quad (7)$$

2. ฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์

ฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ (Gompertz Function) เป็นฟังก์ชันที่ตั้งชื่อมาจาก Benjamin Gompertz นักคณิตศาสตร์ชาวอังกฤษซึ่งฟังก์ชันดังกล่าวเป็นหนึ่งในฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับอธิบายการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตที่จะมีการเจริญเติบโตที่ช้าในช่วงเริ่มต้นและสุดท้าย และฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันในกรณีพิเศษของฟังก์ชันลอจิสติกส์ โดยมีรูปแบบของสมการทั่วไปของฟังก์ชันนี้คือ

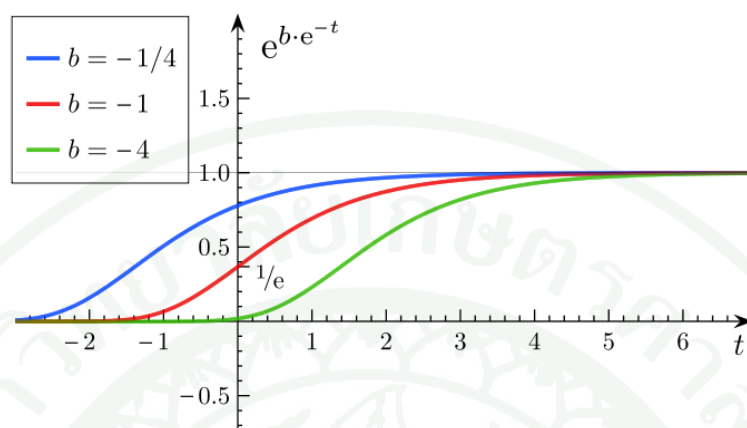
$$y = a \cdot \exp[-\exp(b - ct)] \quad (8)$$



ภาพที่ 16 กราฟแสดงฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ในรูปแบบที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร a

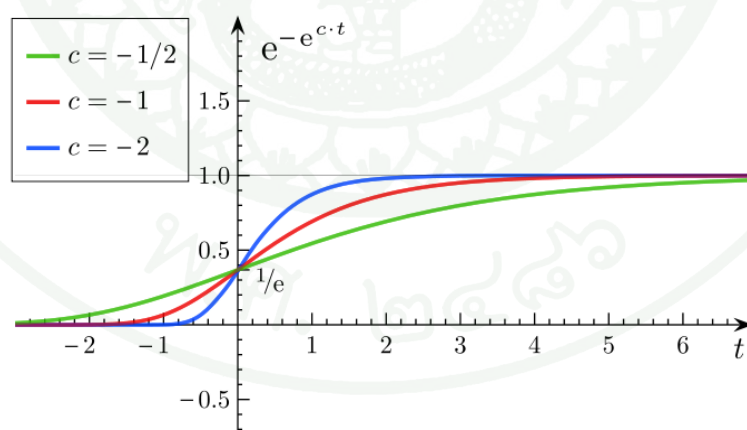
ที่มา: Wikipedia Encyclopedia

จากสมการ(8) จะพบว่ามีตัวแปรอิสระสามตัวแปร หากมีการปรับเปลี่ยนค่าในแต่ละตัวแปรจะทำให้ได้รูปแบบของกราฟที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 17 กราฟแสดงฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ในรูปแบบที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร b

ที่มา: Wikipedia Encyclopedia



ภาพที่ 18 กราฟแสดงฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ในรูปแบบที่แตกต่างกันเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปร c

ที่มา: Wikipedia Encyclopedia

การแปลงตัวแปรทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ในรูปแบบสมการทั่วไปให้มีตัวแปรทางชีวภาพนั้นสามารถทำได้โดยการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งและอันดับสองของฟังก์ชันจะได้เป็น

$$\frac{dy}{dt} = ac \cdot \exp[-\exp(b-ct)] \cdot \exp(b-ct) \quad (9)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = ac^2 \exp[-\exp(b-ct)] \cdot \exp(b-ct) \cdot [\exp(b-ct) - 1] \quad (10)$$

ในช่วงเวลาจุดเปลี่ยนเว้าของกราฟที่เวลา $t = t_i$ พบว่าสมการอนุพันธ์อันดับสองมีค่าเป็นศูนย์ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{d^2y}{dt^2} = 0 \rightarrow t_i = \frac{b}{c} \quad (11)$$

จากนั้นพิจารณาถึงอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดซึ่งสามารถพิจารณาได้จากอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่เวลา $t = t_i$ ดังนี้

$$\mu_m = \left(\frac{dy}{dt} \right)_{t_i} = \frac{ac}{e} \quad (12)$$

โดยตัวแปร c ในฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์สามารถแทนค่าโดย $c = \mu_m e/a$ นั่นเอง จากนั้นพิจารณาถึงสมการเส้นตรงที่พาดผ่านบริเวณที่พิจารณาอัตราการเจริญเติบโตสูงสุดจะได้ว่ามีสมการเป็น

$$y = \mu_m \cdot t + \frac{a}{e} - \mu_m \cdot t_i \quad (13)$$

จากนั้นกำหนดช่วงเวลาระยะพักซึ่งมีค่าเป็น λ นั่นคือจุดของกราฟสมการเส้นตรงดังกล่าวที่สัมผัสกับแกนเวลา ดังนั้นจะได้ว่า

$$0 = \mu_m \cdot \lambda + \frac{a}{e} - \mu_m \cdot t_i \quad (14)$$

จากสมการที่ 11, 12 และ 14 จะได้ว่า

$$\lambda = \frac{(b-1)}{c} \quad (15)$$

ดังนั้นจะได้ว่าตัวแปร b ในสมการรูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันกอมเพิร์ตต์มีค่าเป็น

$$b = \frac{\mu_m e}{a} \lambda + 1 \quad (16)$$

และพิจารณาหาค่าสูงสุดของกราฟจะได้ว่าพิจารณาเมื่อเวลามีค่าเข้าใกล้อนันต์

$$t \rightarrow \infty; \quad y \rightarrow a \Rightarrow A = a \quad (17)$$

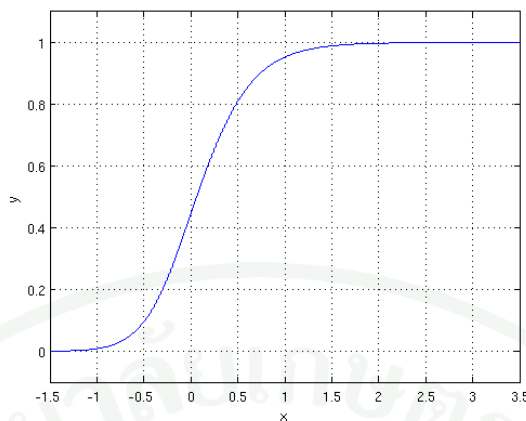
ดังนั้นตัวแปร a ในสมการรูปแบบทั่วไปสามารถแทนได้ด้วยค่า A ดังนั้นจะได้สมการกอมเพิร์ตต์ในรูปแบบตัวแปรทางชีววิทยาเป็นดังนี้

$$y = A \exp \left\{ -\exp \left[\frac{\mu_m e}{A} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (18)$$

3. ฟังก์ชันริชาร์ด

ฟังก์ชันริชาร์ด (Richards Function) หรือ Richard's Curve หรือ Generalized Logistic Function เป็นฟังก์ชันที่ใช้อย่างกว้างขวางและเป็นฟังก์ชันซิกมอยด์ที่มีความยืดหยุ่นสูงที่สุดสำหรับใช้เป็นโมเดลสำหรับการเจริญเติบโตของระบบชีวภาพกล่าวคือสามารถสอดคล้องกับกราฟการเจริญเติบโตในรูปแบบลักษณะคล้ายคลึงกับตัวอักษรภาษาอังกฤษเอสแบบหลากหลาย โดยฟังก์ชันลอจิสติกส์แบบปกติจะมีความสมมาตรของกราฟในบริเวณก่อนและหลังจุดเปลี่ยนว่า หากแต่ในฟังก์ชันริชาร์ดนั้นจะเพิ่มความยืดหยุ่นในความไม่สมมาตรของกราฟในบริเวณก่อนและหลังจุดเปลี่ยนไว้จึงทำให้มีตัวแปรและสมการที่ซับซ้อนขึ้น โดยรูปแบบสมการทั่วไปของฟังก์ชันริชาร์ดเป็นดังนี้

$$y = a \{1 + v \cdot \exp[k(\tau - t)]\}^{(-1/v)} \quad (19)$$



ภาพที่ 19 กราฟแสดงตัวอย่างของลักษณะกราฟที่สอดคล้องกับฟังก์ชันริชาร์ด

ที่มา: Wikipedia Encyclopedia

จากสมการรูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันริชาร์ดข้างต้นนั้นมีตัวแปรทางคณิตศาสตร์ปรากฏในสมการแต่ยังไม่มีตัวแปรที่สอดคล้องกับค่าทางชีวภาพ จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนตัวแปรเป็นตามตัวแปรที่กำหนดได้สมการเป็น

$$y = A \left\{ 1 + \nu \cdot \exp(1 + \nu) \cdot \exp \left[\frac{\mu_m}{A} \cdot (1 + \nu)^{\left(1 + \frac{1}{\nu}\right)} \cdot (\lambda - t) \right] \right\}^{(-1/\nu)} \quad (20)$$

4. การพิจารณาหาฟังก์ชันที่เหมาะสม

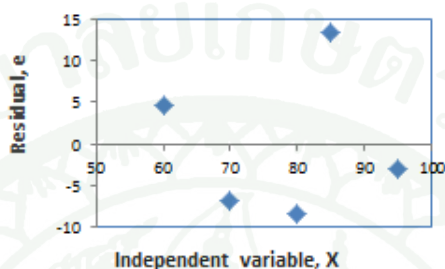
4.1 ค่าเศษเหลือ

ค่าเศษเหลือ (Residual) หรือตัวแปร e คือผลต่างระหว่างค่าที่เกิดขึ้นจากกราฟ (y) กับค่าที่คาดเดา (\hat{y}) โดยในทุกๆจุดของสมการจะสามารถพิจารณาค่าเศษเหลือนี้ได้ ซึ่งค่าผลรวมและค่าเฉลี่ยของค่าเศษเหลือจะมีค่าเป็นศูนย์ โดยค่าเศษเหลือสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$e = y - \hat{y} \quad (21)$$

1.2 กราฟค่าเศษเหลือ

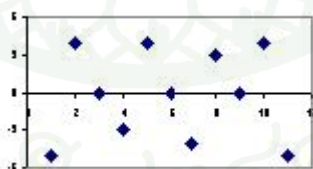
กราฟค่าเศษเหลือ (Residual Plot) คือกราฟที่แสดงให้เห็นถึงค่าเศษเหลือบนแกนตั้ง เขียนเทียบกับค่าในแกนนอน ถ้าหากว่าจุดในกราฟของค่าเศษเหลือกระจายรอบๆแกนนอนอย่างสม่ำเสมอจะได้ว่ากราฟดังกล่าวนี้มีลักษณะสอดคล้องกับฟังก์ชันที่กำหนด



ภาพที่ 20 กราฟแสดงค่าเศษเหลือที่มีลักษณะจุดในรูปแบบกระจายรอบแกนนอน

ที่มา: Stat Trek

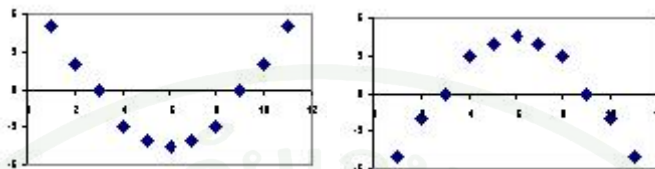
จากภาพที่ 20 จะเห็นว่าค่าเศษเหลือค่าแรกมีค่าเป็นบวก ค่าเศษเหลือค่าที่สองและสามมีค่าเป็นลบ ค่าเศษเหลือค่าที่สี่มีค่าเป็นบวก และค่าเศษเหลือตัวสุดท้ายมีค่าเป็นลบ



ภาพที่ 21 กราฟค่าเศษเหลือในรูปแบบสุ่มซึ่งสอดคล้องกับโมเดลแบบเชิงเส้นมากที่สุด

ที่มา: Stat Trek

จากภาพที่ 21 จะเห็นรูปแบบของจุดมีลักษณะเป็นแบบสุ่มกระจายอย่างสม่ำเสมอรอบแกน
นอนแสดงให้เห็นว่ารูปแบบโมเดลเชิงเส้นเป็นรูปแบบที่เหมาะสมกับข้อมูลข้างต้นมากที่สุด



ภาพที่ 22 กราฟค่าเศษเหลือในรูปแบบไม่สุ่มกล่าวคือเป็นรูปตัวอักษรภาษาอังกฤษแบบหงายและ
แบบคว่ำตามลำดับซึ่งสอดคล้องกับโมเดลแบบไม่เป็นเชิงเส้นมากที่สุด

ที่มา: Stat Trek

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์ในการเลี้ยงเซลล์ยีสต์
 - 1.1 ยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces Bayanus*
 - 1.2 อาหารแข็งสำหรับยีสต์ PDA (Potato Dextrose Agar)
 - 1.3 อาหารเหลวสำหรับยีสต์ PDB (Potato Dextrose Broth)
 - 1.4 ชุดถาดแก้วกลมสำหรับเลี้ยงยีสต์ในอาหารแข็ง
 - 1.5 หลอดทดลอง
 - 1.6 สำลี
 - 1.7 ตะเกียงแอลกอฮอล์
 - 1.8 สารละลายแอลกอฮอล์
 - 1.9 ไฟแช็ค
 - 1.10 ถุงมือพลาสติก
 - 1.11 แผ่นฟอยล์
 - 1.12 พลาสติกใส
 - 1.13 ไมโครปิเปต
 - 1.14 ซ้อนห่วงตัดสารสเตนเลส
 - 1.15 ขวดสำหรับบรรจุสารละลายยีสต์
 - 1.16 แท่งวางขวด
 - 1.17 หลอดทดลอง

2. อุปกรณ์ที่ใช้เตรียมตัวอย่างสำหรับการทดลอง
 - 2.1 กระจกปิดสไลด์ (cover slip)
 - 2.2 กาวสองหน้าอย่างบางชนิดเยื่อ
 - 2.3 กรรไกร
 - 2.4 ซิลิโคน

3. ชุดอุปกรณ์คีมจับเชิงแสง
 - 3.1 กล้องจุลทรรศน์ยี่ห้อ Nikon รุ่น Ti-U
 - 3.2 กล้องวิดีโอ SONY Carl Zeiss HDR-SR12
 - 3.3 ชุดอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ (Scanning Galvo Mirror)
 - 3.4 ชุดอุปกรณ์เลเซอร์อินฟราเรด
 - 3.5 คอมพิวเตอร์
 - 3.6 เลนส์ใกล้วัตถุ
 - 3.7 กระจกสไลด์
 - 3.8 โต๊ะทัศนศาสตร์ (Sealed Hole Table Top with Tuned Damping, Newport รุ่น RS2000
 - 3.9 อุปกรณ์สร้างความสมดุลของโต๊ะทัศนศาสตร์ High Performance Laminar Flow Isolator I-2000 Series (Newport Stabilizer)
 - 3.10 เลนส์นูนเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 นิ้ว ความยาวโฟกัส 30 และ 75 mm
 - 3.11 แท่งเหล็ก 6 อัน



ภาพที่ 23 ชุดอุปกรณ์คีมจับเชิงแสงที่ใช้ในการทดลองศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์

วิธีการ

1. การเลี้ยงเซลล์ยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces Bayanus*

1.1 ในการเริ่มต้นของการทดลองสำหรับยีสต์จะเริ่มด้วยการเลี้ยงยีสต์ในอาหารแข็งที่จัดเตรียมใส่ในถาดแก้วที่มีฝาปิดอย่างเรียบร้อย จากนั้นนำตัวอย่างยีสต์ที่ได้ใส่ลงในถาดและปิดฝาให้เรียบร้อย หลังจากนั้น 3 วัน ทำการเตรียมอาหารเหลวสำหรับยีสต์โดยแบ่งใส่ขวดสำหรับใส่ยีสต์ 1ขวดในปริมาณ 1 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ยีสต์ปริมาณเล็กน้อยจากถาดใส่ลงในขวดข้างต้น และเก็บขวดดังกล่าวไว้ในอุณหภูมิห้อง ส่วนอาหารเหลวสำหรับยีสต์ที่เหลือให้บรรจุใส่ขวดปิดให้เรียบร้อย และเก็บไว้ในตู้เย็นเพื่อใช้ต่อไป

1.2 เมื่อเวลาผ่านไป 2 วัน ทำการแบ่งอาหารเหลวจากขวดใหญ่ใส่ในขวดใหม่ขนาดเล็กสำหรับบรรจุยีสต์ 2 ขวดในปริมาตรขวดละ 1 มิลลิลิตร โดยกำหนดชื่อเป็นขวด ก. และ ข. จากนั้นใช้ไมโครปิเปตดูดยีสต์ที่อยู่ในอาหารจากขวดที่เตรียมไว้ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรใส่ลงในขวดทั้งสอง จากนั้นสามารถนำขวด ก. ไปใช้ในการทดลองได้ และขวด ข. ให้เก็บไว้ในอุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 24 ชุดอุปกรณ์การเลี้ยงยีสต์ประกอบด้วยอาหารเลี้ยงยีสต์แบบแข็งที่อยู่ในถาดวงกลมมีฝาปิดและอาหารเลี้ยงยีสต์แบบเหลวที่บรรจุในหลอดทดลอง

1.3 เมื่อเวลาผ่านไป 2 วัน ขวด ก. ที่ใช้ในการทดลองมีการเปิดเพื่อดูดสารละลายยีสต์ไปใช้หลายครั้ง ซึ่งอาจทำให้มีการปนเปื้อนเกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อทำการทดลองจะทำการเตรียมสารละลายยีสต์ใหม่ โดยเตรียมอาหารเหลวปริมาตร 1 มิลลิลิตรใส่ขวด 2 ขวดกำหนดชื่อเป็นขวด ก. และ ข. จากนั้นนำขวด ข. ที่เก็บไว้ออกมาและดูดสารละลายยีสต์ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตรใส่ลงใน

ขวด ค. และขวด ง. จากนั้นนำสารละลายยีสต์ในขวด ค. ไปทดลอง และเก็บขวด ง. ไว้ใน อุณหภูมิห้องเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการเตรียมยีสต์ในอีกสองวันต่อไป เมื่อทำเช่นนี้เรื่อยๆจะได้ยีสต์ ที่ไม่แออัดในขวด อยู่ภายใต้สภาวะควบคุมที่เหมาะสมต่อการทดลองเรื่องการเจริญเติบโตของยีสต์ต่อไป

2. การเตรียมตัวอย่างยีสต์สำหรับการทดลองภายใต้คิมจับเชิงแสง

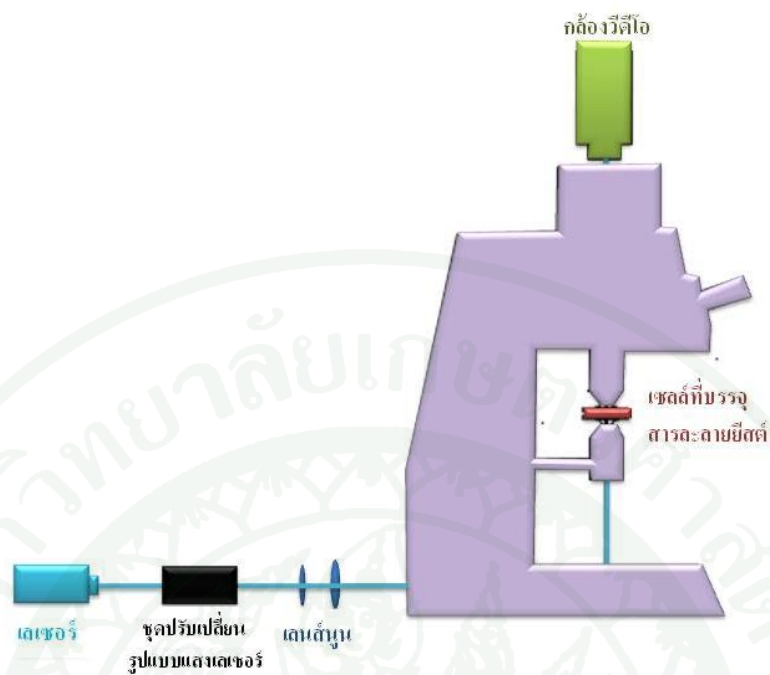
2.1 ทำการเตรียมเซลล์สำหรับบรรจุสารละลายยีสต์โดยการนำกระดาษกรองหน้าชนิดที่เยื่อความหนา 0.01 มิลลิเมตร ตัดเป็นเส้น 2 เส้น โดยมีขนาดความยาวเท่ากับกระจกปิดสไลด์และความกว้างประมาณ 2-3 มิลลิเมตร จากนั้นนำมาติดที่ด้านซ้ายและขวาของกระจกปิดสไลด์ และนำกระจกปิดสไลด์อีกแผ่นมาวางทับโดยให้ปิดเยื้องขึ้นข้างบนประมาณ 2-3 มิลลิเมตร

2.2 นำสารละลายยีสต์ที่ได้ใส่ไมโครปิเปตและบรรจุลงในเซลล์ที่เตรียมไว้ จากนั้นนำซิลิโคนเคลือบปิดบริเวณช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกปิดสไลด์ทั้งสอง และนำเซลล์ดังกล่าวไปไว้ตรงที่วางตัวอย่างเพื่อทำการทดลองต่อไป

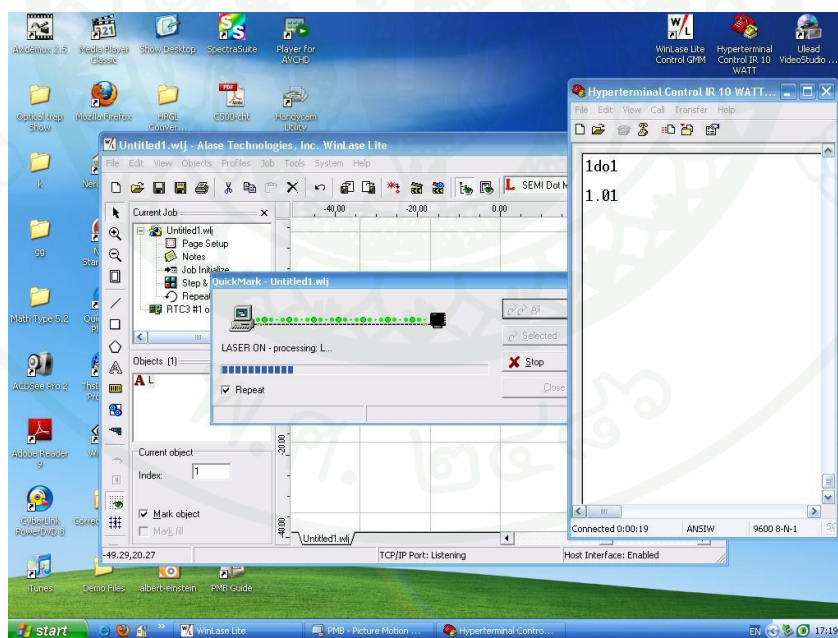
3. การติดตั้งชุดทดลองคิมจับเชิงแสง

3.1 ทำการติดตั้งระบบคิมจับเชิงแสง โดยแสงเลเซอร์อินฟราเรดจะเคลื่อนผ่านชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ จากนั้นผ่านเลนส์นูนสองเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายพื้นที่หน้าตัดของลำแสงเลเซอร์ให้มีขนาดตามที่ต้องการ และเข้าสู่กล้องจุลทรรศน์ดังแสดงในภาพที่ 25 โดยเซลล์ของสารละลายยีสต์จะวางบนบริเวณที่วางตัวอย่างการทดลอง และเมื่อทำการทดลองภาพที่ได้จะถูกบันทึกด้วยกล้องวีดีโอ

3.2 ในการควบคุมความเข้มของแสงเลเซอร์และรูปแบบของแสงเลเซอร์ที่ปรากฏบนสารละลายยีสต์นั้นจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการควบคุมกล่าวคือ โปรแกรม Hyperterminal Control IR จะใช้ในการเปิดปิดและตั้งความเข้มของแสงเลเซอร์ และโปรแกรม WinLase Control GMM จะใช้สำหรับควบคุมชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 25 ภาพแสดงการติดตั้งอุปกรณ์คีมจับเชิงแสงเพื่อใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 26 ภาพแสดงหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่แสดงผลขณะใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการควบคุมแสงเลเซอร์และชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์

4. การทดลองศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้คิมจับเชิงแสง

4.1 ศึกษารูปแบบของแสงเลเซอร์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ โดยทำการทดลองปรับเปลี่ยนการออกคำสั่งในโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ให้เป็นไปตามรูปแบบที่ต้องการและบันทึกผลที่ได้ รวมทั้งศึกษารูปแบบที่มีความเสถียรและเหมาะสมที่จะใช้ในการทดลองนำแสงดังกล่าวจับยีสต์และศึกษาการเจริญเติบโตต่อไป

4.2 ศึกษายีสต์ที่ถูกจับด้วยคิมจับเชิงแสงภายใต้รูปแบบเลเซอร์ที่กำหนดขึ้น โดยในการทดลองได้ทำการจับยีสต์ด้วยคิมจับเชิงแสงโดยใช้เลเซอร์รูปเส้นตรงที่มีทิศทางมุมแตกต่างกันครั้งละ 30 องศา จากนั้นบันทึกภาพที่ได้จากการทดลอง

4.3 ศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ที่ถูกจับด้วยคิมจับเชิงแสงภายใต้รูปแบบเลเซอร์ที่กำหนดขึ้น โดยในการทดลองได้ทำการศึกษายีสต์ด้วยคิมจับเชิงแสงและใช้เลเซอร์ในรูปแบบที่เหมาะสมกล่าวคือ รูปเส้นตรง รูปวงกลม รูปสี่เหลี่ยม และรูปตัวอักษรแอล จากนั้นบันทึกภาพการเจริญเติบโตของยีสต์ที่เกิดขึ้น

4.4 ศึกษาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการทดลอง โดยทำการศึกษายีสต์ที่ถูกจับด้วยคิมจับเชิงแสงภายใต้รูปแบบเลเซอร์รูปเส้นตรง จากนั้นทำการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของยีสต์พร้อมกับนำค่าที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย วาดกราฟการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับเวลา และคำนวณหาฟังก์ชันที่เหมาะสมกับโมเดลในการทดลองนี้

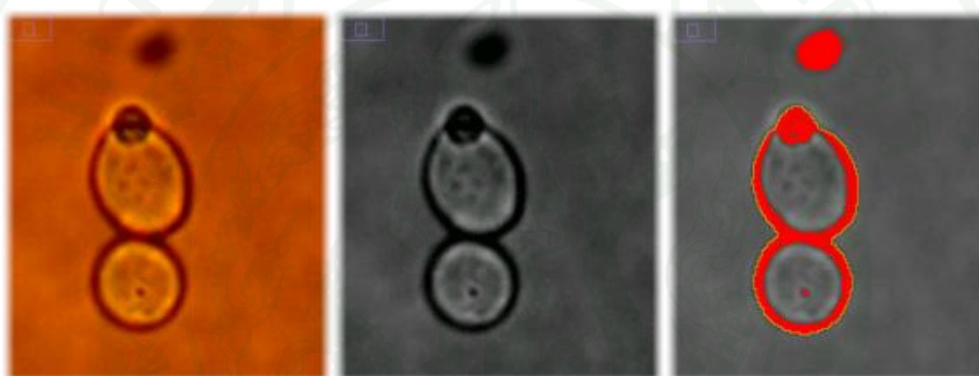
4.5 ศึกษาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากรูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้เลเซอร์รูปวงกลม โดยทำการศึกษายีสต์ที่ถูกจับด้วยคิมจับเชิงแสงภายใต้รูปแบบเลเซอร์รูปวงกลม จากนั้นทำการเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของยีสต์พร้อมกับนำค่าที่ได้จากการทดลองทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย วาดกราฟการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับเวลา และคำนวณหาฟังก์ชันที่เหมาะสมกับโมเดลนี้

4.6 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้อาหารและอัตราการเจริญเติบโตของยีสต์ในการทดลองนี้จะทำการปรับเปลี่ยนอัตราการให้อาหารภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีการควบคุม กล่าวคือ ทำการทดลองเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของยีสต์ด้วยการให้อาหารด้วยความถี่ทุกๆ 24

ชั่วโมง เทียบกับการให้อาหารด้วยความถี่ทุกๆ 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการวาดกราฟและเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น

5. วิธีการวัดขนาดของยีสต์จากการทดลอง

5.1 หลังจากการทดลองในแต่ละตอน ผลที่ได้จากการทดลองจะเป็นไฟล์วิดีโอและทำการแปลงไฟล์วิดีโอออกมาเป็นไฟล์ภาพในทุกๆ 5 นาที และนำภาพที่ได้มาทำการแปลงเป็นภาพ 2 บิต เพื่อวิเคราะห์หาขอบเขตของเซลล์ต่อไปดังที่แสดงในภาพที่ 28 โดยค่าที่วัดออกมาได้จะมีค่าเป็นจำนวนพิกเซลที่ยีสต์ครอบครอง (NoP)



ภาพที่ 27 แสดงกระบวนการแปลงผลของภาพยีสต์ที่ได้จากการทดลองเพื่อที่จะใช้หาค่าจำนวนพิกเซลที่ยีสต์ครอบครอง

5.2 เมื่อได้ขนาดของเซลล์ในแต่ละภาพแล้วจะทำการหาครรชนพื้นที่เซลล์เพื่อที่จะสามารถเปรียบเทียบขนาดของยีสต์ในแต่ละการทดลองได้ เนื่องจากในแต่ละการทดลองขนาดของยีสต์เริ่มต้นไม่เท่ากันจึงทำการเทียบค่าที่ได้โดยการหารด้วยค่าจำนวนพิกเซลที่ยีสต์ครอบครองในเวลาเริ่มต้นของการทดลอง ดังนั้นจะได้สมการครรชนพื้นที่เซลล์ (CAI) ที่ใช้ในการพิจารณาผลที่ได้ดังนี้

$$CAI(t) = \frac{NoP(t)}{NoP(t_0)} \quad (22)$$

โดยที่ CAI คือ ดรรชนีพื้นที่เซลล์ (Cell Area Index)

NoP(t) คือ จำนวนพิกเซลที่ยีสต์ครอบครองที่เวลา t ใดๆ (Number of Pixels)

NoP(t_0) คือ จำนวนพิกเซลที่ยีสต์ครอบครองที่เวลาเริ่มต้นของการทดลอง



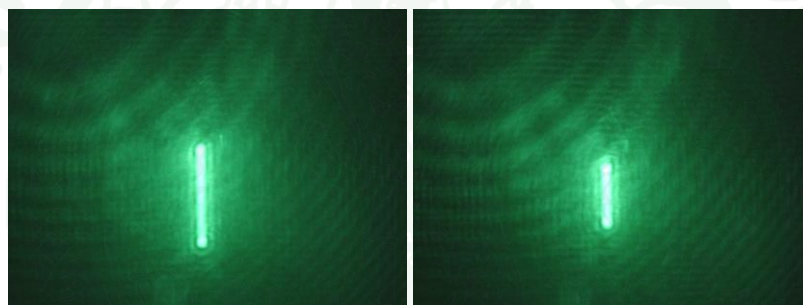
ผลและวิจารณ์

ผล

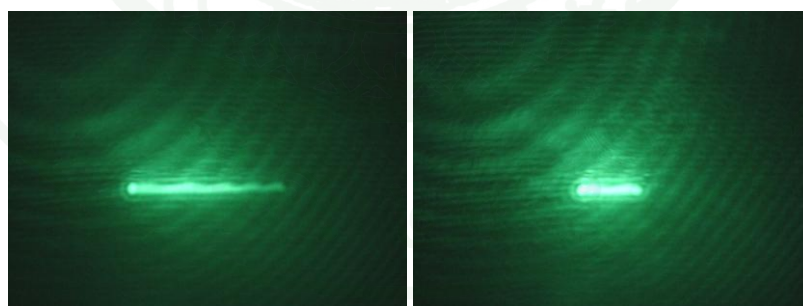
1. การศึกษารูปแบบของแสงเลเซอร์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสง

1.1 รูปแบบแสงเลเซอร์เส้นตรง

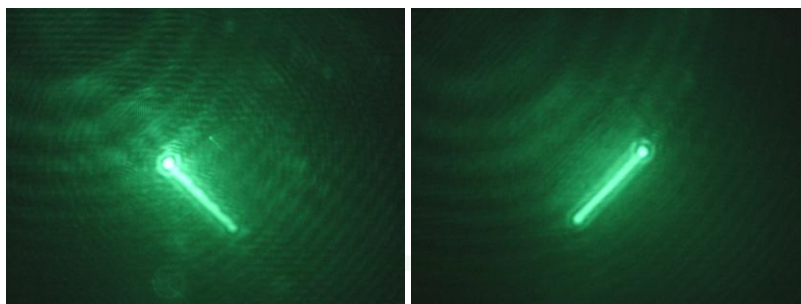
ในการวิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ให้เป็นเส้นตรงใน 3 รูปแบบ กล่าวคือเป็นรูปเส้นตรงแนวตั้ง เส้นตรงแนวนอน และรูปเส้นตรงในมุมต่างๆ



ภาพที่ 28 รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบเส้นตรงแนวตั้งในขนาดที่แตกต่างกัน



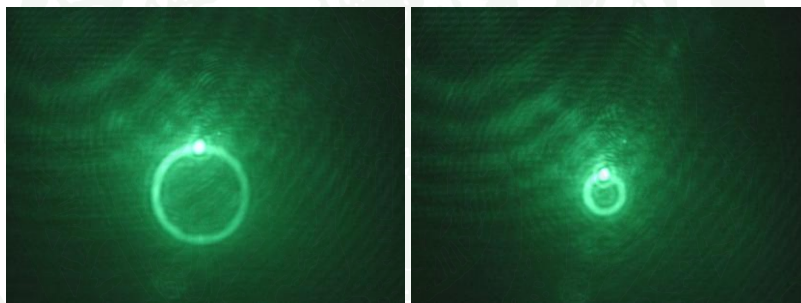
ภาพที่ 29 รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบเส้นตรงแนวนอนในขนาดที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 30 รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบเส้นตรงในมุมที่แตกต่างกัน

1.2 รูปแบบแสงเลเซอร์วงกลม

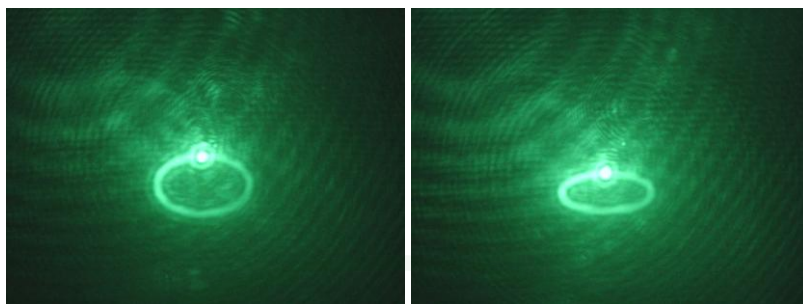
ในการวิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ให้เป็นวงกลมในขนาดต่างๆ



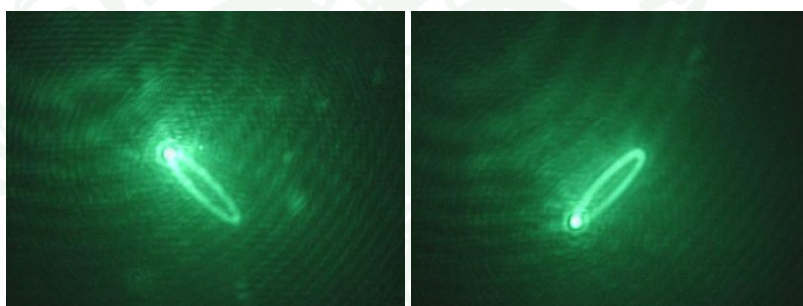
ภาพที่ 31 รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบวงกลมในขนาดที่แตกต่างกัน

1.3 รูปแบบแสงเลเซอร์วงรี

ในการวิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ให้เป็นวงรีในขนาดและทิศทางที่แตกต่างกัน



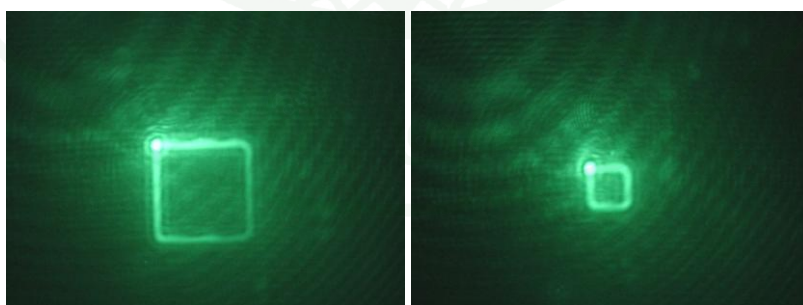
ภาพที่ 32 รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบวงรีในขนาดที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 33 รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบวงรีในทิศทางที่แตกต่างกัน

1.4 รูปแบบแสงเลเซอร์สี่เหลี่ยม

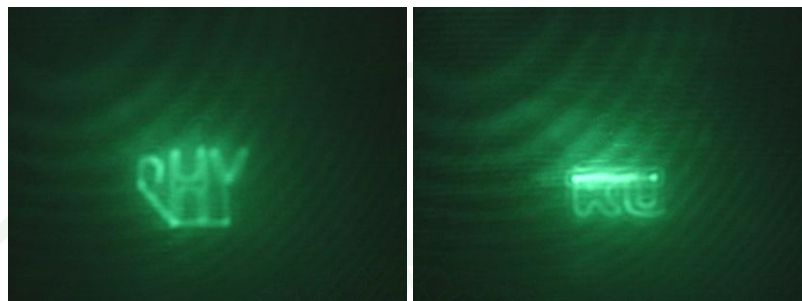
ในการวิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ให้เป็นสี่เหลี่ยมในขนาดต่างๆ



ภาพที่ 34 รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมในขนาดที่แตกต่างกัน

1.5 รูปแบบแสงเลเซอร์ตัวอักษร

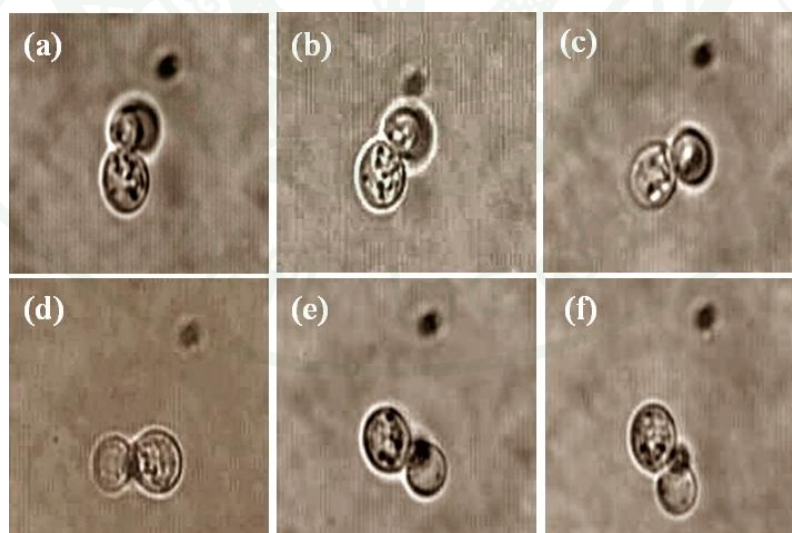
ในการวิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ให้เป็นตัวอักษรต่างๆ



ภาพที่ 35 รูปแบบการกำหนดแสงเลเซอร์เป็นตัวอักษรต่างๆ

2. การศึกษาอีสต์ที่ถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสงภายใต้เลเซอร์รูปเส้นตรงที่มีทิศทางมุมแตกต่างกัน ครั้งละ 30 องศา

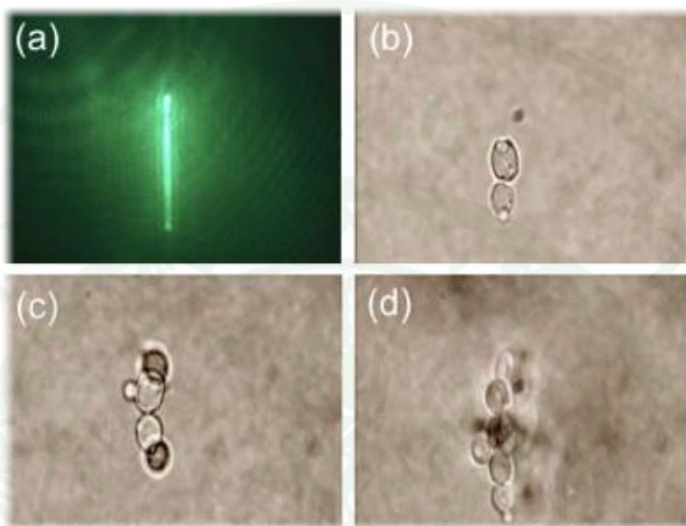
ในการวิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงเลเซอร์ที่ใช้ในการจับอีสต์เป็นมุมต่างๆ
กล่าวคือ 0, 30, 60, 90, 120, 150 องศา กับแนวอ้างอิงตามลำดับ



ภาพที่ 36 ภาพแสดงอีสต์ที่ถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสงภายใต้เลเซอร์รูปเส้นตรงที่มีทิศทางมุม
แตกต่างกัน

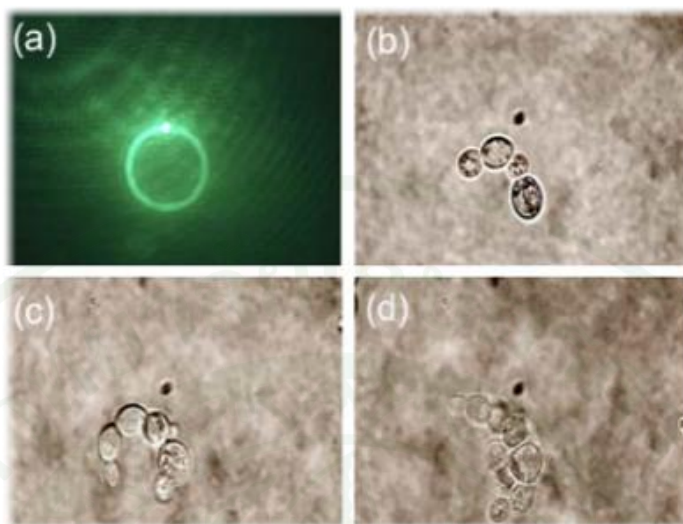
3. การศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ที่ถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสงภายใต้รูปแบบเลเซอร์ต่างๆ

3.1 ยีสต์ถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสงด้วยรูปแบบแสงเลเซอร์เส้นตรง



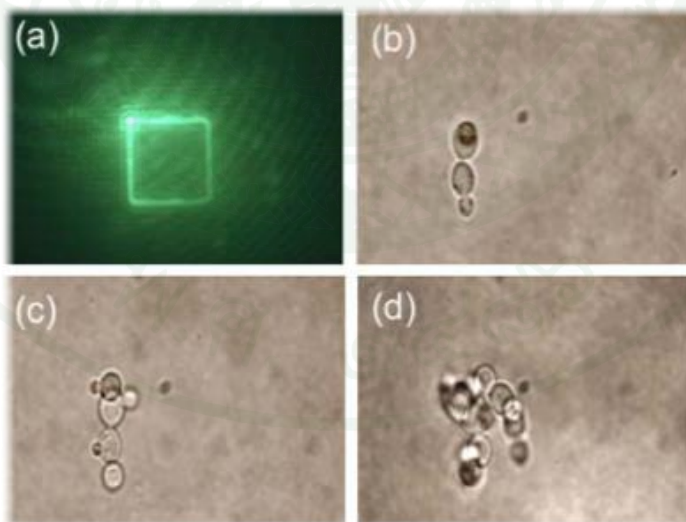
ภาพที่ 37 ภาพแสดงการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบแสงเลเซอร์เส้นตรง โดยภาพตัวอย่างนี้เป็นการถอดภาพจากไฟล์วิดีโอที่มีความยาว 8 ชั่วโมง

3.2 ยีสต์ถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสงด้วยรูปแบบแสงเลเซอร์วงกลม



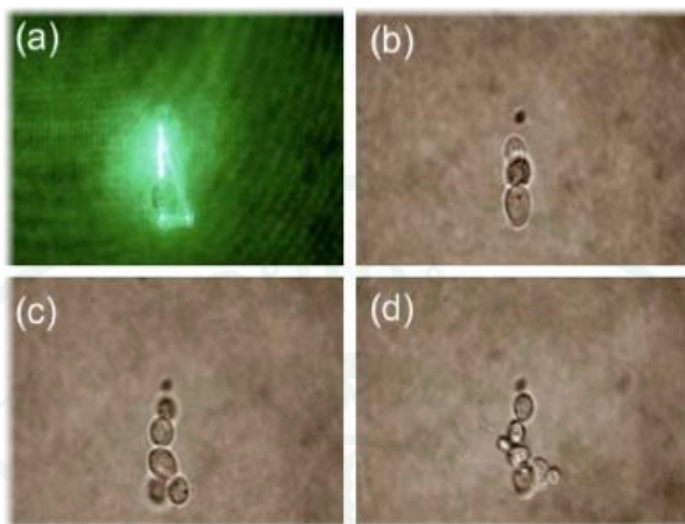
ภาพที่ 38 ภาพแสดงการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบแสงเลเซอร์วงกลม โดยภาพตัวอย่างนี้เป็นการถอดภาพจากไฟลั้วดีไอที่มีความยาว 2 ชั่วโมง 20 นาที

3.3 ยีสต์ถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสงด้วยรูปแบบแสงเลเซอร์สี่เหลี่ยม



ภาพที่ 39 ภาพแสดงการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบแสงเลเซอร์สี่เหลี่ยม โดยภาพตัวอย่างนี้เป็นการถอดภาพจากไฟลั้วดีไอที่มีความยาว 5 ชั่วโมง 35 นาที

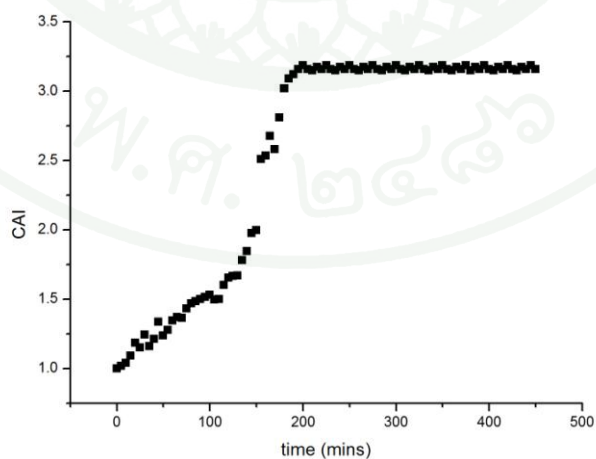
3.4 ยีสต์ถูกจับด้วยคีมจับเชิงแสงด้วยรูปแบบแสงเลเซอร์ตัวอักษรแอล



ภาพที่ 40 ภาพแสดงการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบแสงเลเซอร์ตัวอักษรแอล โดยภาพตัวอย่างนี้เป็นการถอดภาพจากโฟลวีดีโอที่มีความยาว 9 ชั่วโมง 30 นาที

4. ศึกษาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการอธิบายรูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบเลเซอร์เส้นตรง

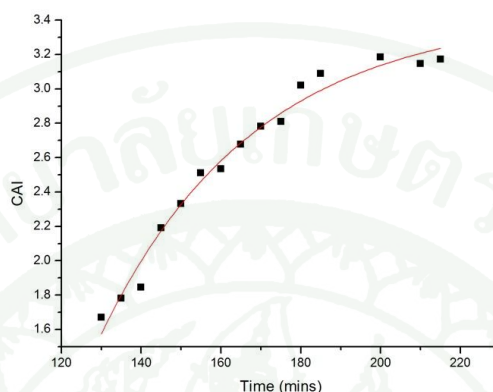
นำผลที่ได้มาบันทึกเป็นกราฟและพิจารณาหาโมเดลและฟังก์ชันที่เหมาะสม



ภาพที่ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลา

4.1 ฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล

พิจารณารูปการเจริญเติบโตของยีสต์ในช่วงเวลาระหว่างนาที่ที่ 130-220 มีลักษณะการเจริญเติบโตแบบเอกซ์โปเนนเชียล จึงได้ทำการเทียบกราฟกับฟังก์ชันและวาดกราฟได้ดังนี้



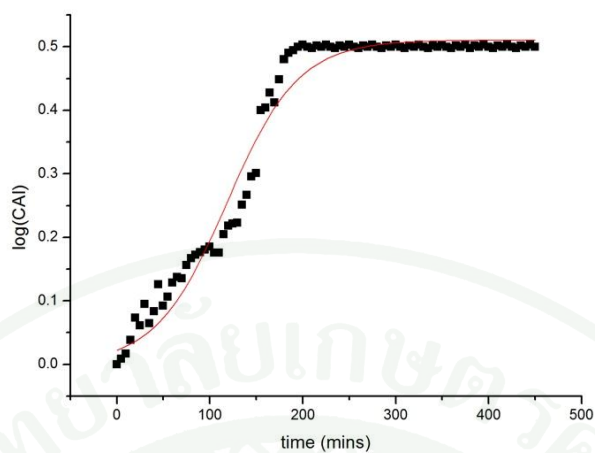
ภาพที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาในช่วงนาที่ที่ 130-220 โดยมีลักษณะสอดคล้องกับฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล

4.2 ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการอธิบายการเจริญเติบโตของยีสต์

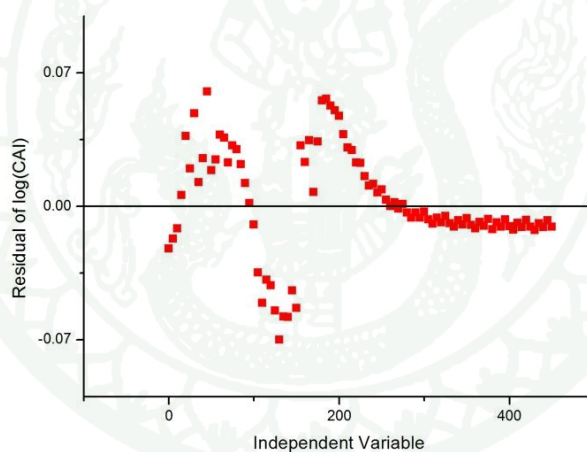
พิจารณารูปการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับฟังก์ชันที่นิยมในการใช้ศึกษาเป็นโมเดลในการเจริญเติบโตกล่าวคือ ฟังก์ชันลอจิสติกส์ ฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ และฟังก์ชันริชาร์ด จากนั้นพิจารณาหาค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือ (RSS) เพื่อหาฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการอธิบายการเจริญเติบโตของยีสต์ต่อไป

4.2.1 ฟังก์ชันลอจิสติกส์

พิจารณารูปการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับฟังก์ชันดังกล่าว ได้ว่ามีค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือเป็น 0.06822



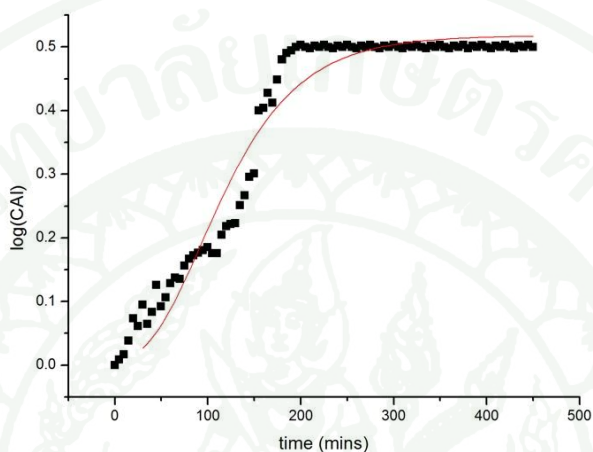
ภาพที่ 43 กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันลอจิสติกส์ (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา



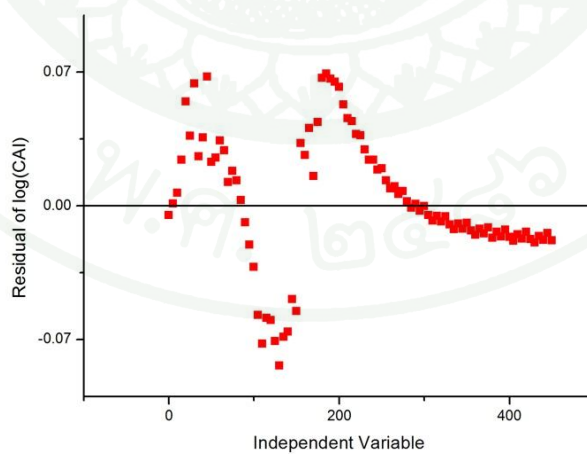
ภาพที่ 44 กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น

4.2.2 ฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์

พิจารณากราฟการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับฟังก์ชันดังกล่าว พบว่ามีค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือเป็น 0.10859



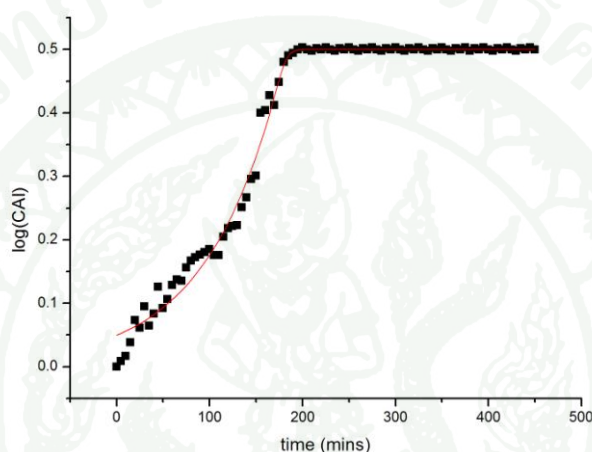
ภาพที่ 45 กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์(เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา



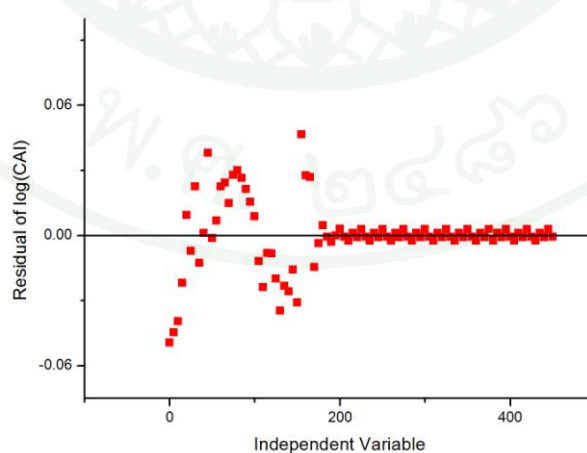
ภาพที่ 46 กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น

4.2.3 ฟังก์ชันริชาร์ด

พิจารณากราฟการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับฟังก์ชันดังกล่าว ได้ว่ามีค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือเป็น 0.02219 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดหมายความว่าฟังก์ชันริชาร์ดเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นโมเดลของการศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้คิมจับเชิงแสงนี้



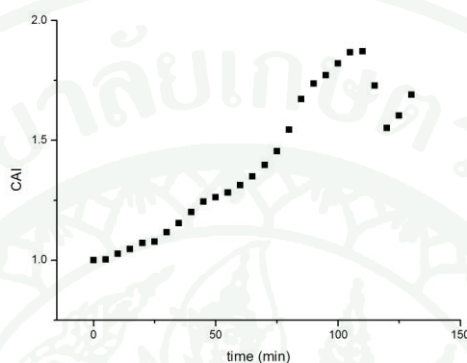
ภาพที่ 47 กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันริชาร์ด (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนในพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา



ภาพที่ 48 กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น

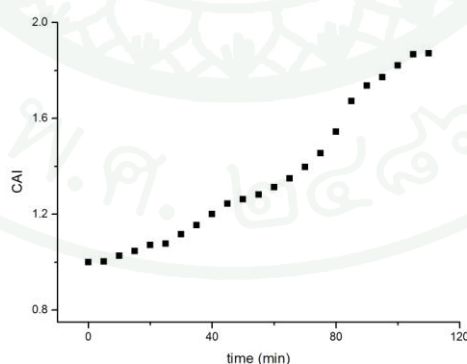
5. ศึกษาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เกิดขึ้นจากรูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้เลเซอร์รูปวงกลม

5.1 กราฟการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้เลเซอร์รูปวงกลม



ภาพที่ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลา

นำผลที่ได้มาบันทึกเป็นกราฟและพิจารณากราฟการเจริญเติบโตของยีสต์พบว่าค่าครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ตั้งแต่ช่วงนาทีที่ 115 มีค่าลดลงเนื่องจากการซ้อนทับกันของยีสต์ ดังนั้นในการพิจารณาฟังก์ชันการเจริญเติบโตจึงพิจารณาในช่วงเวลาน้อยกว่า 115 นาทีดังกราฟที่แสดงในภาพที่ 50



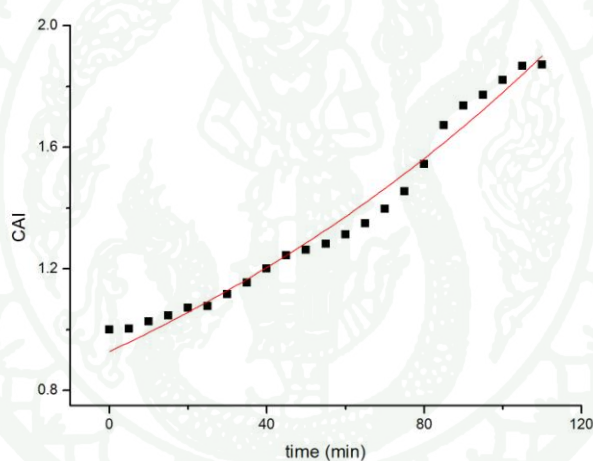
ภาพที่ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาในช่วงนาทีที่ 0-110

5.2 ฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการอธิบายการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้เลเซอร์รูปร่างกลม

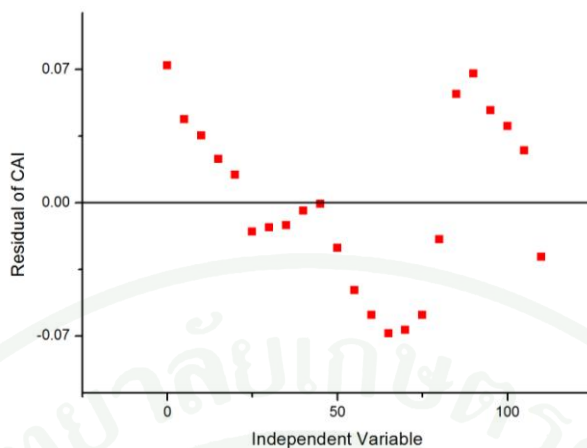
พิจารณารูปการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับฟังก์ชันที่นิยมในการใช้ศึกษาเป็นโมเดลในการเจริญเติบโตกล่าวคือ ฟังก์ชันลอจิสติกส์ ฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ และฟังก์ชันริชาร์ด จากนั้นพิจารณาหาค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือ (RSS) เพื่อหาฟังก์ชันที่เหมาะสมกับการอธิบายการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้เลเซอร์รูปร่างกลม

5.2.1 ฟังก์ชันลอจิสติกส์

พิจารณารูปการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับฟังก์ชันดังกล่าว ได้ว่ามีค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือเป็น 0.04224



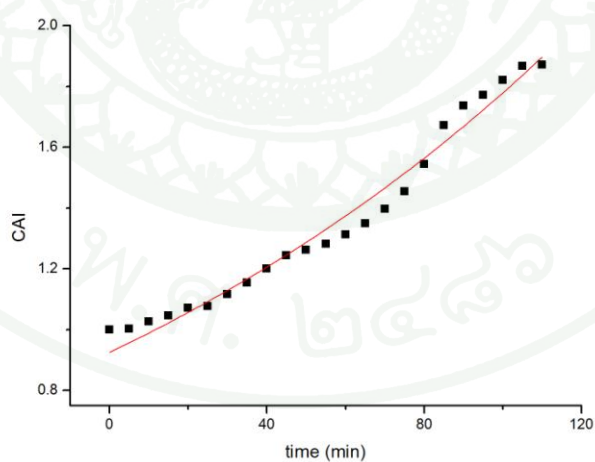
ภาพที่ 51 กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันลอจิสติกส์ (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของดรรรชนีพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา



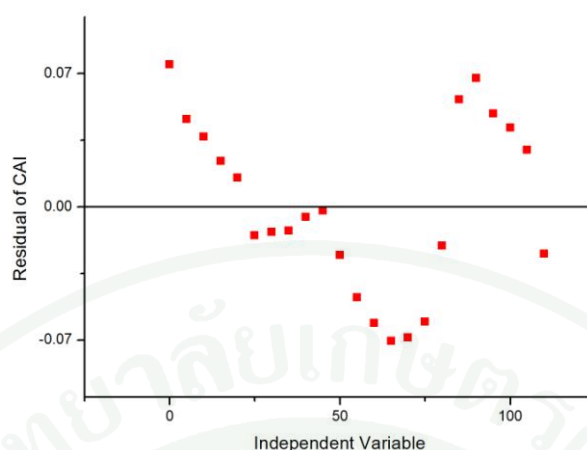
ภาพที่ 52 กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น

5.2.2 ฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์

พิจารณากราฟการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับฟังก์ชันดังกล่าว พบว่ามีค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือเป็น 0.04427



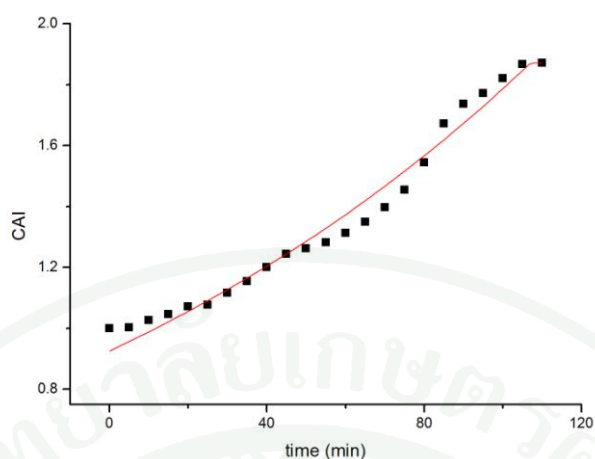
ภาพที่ 53 กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์(เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา



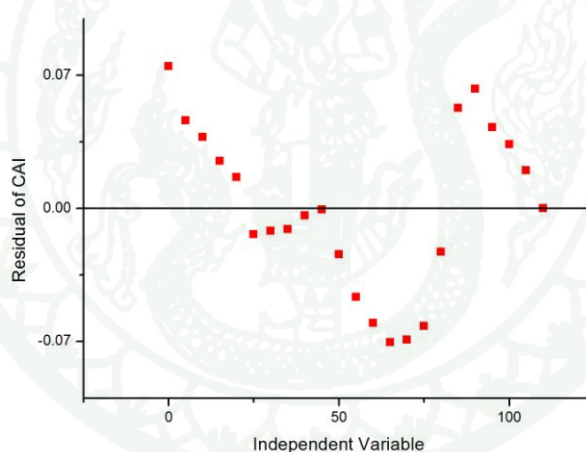
ภาพที่ 54 กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น

5.2.3 ฟังก์ชันริชาร์ด

พิจารณากราฟการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับฟังก์ชันดังกล่าว ได้ว่ามีค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือเป็น 0.04117 ซึ่งมีค่าน้อยที่สุดหมายความว่าฟังก์ชันริชาร์ดเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้เป็นโมเดลของการศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้คิมจับเชิงแสงรูปแบบเลเซอร์วงกลม อีกทั้งฟังก์ชันริชาร์ดยังเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมกับโมเดลของการศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้คิมจับเชิงแสงรูปแบบเลเซอร์เส้นตรง ดังนั้นฟังก์ชันริชาร์ดจึงเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมที่สุดในการอธิบายการเจริญเติบโตของยีสต์ในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 55 กราฟแสดงแนวโน้มของฟังก์ชันรีซิดิว (เส้นสีแดง) บนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมของครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีกับเวลา

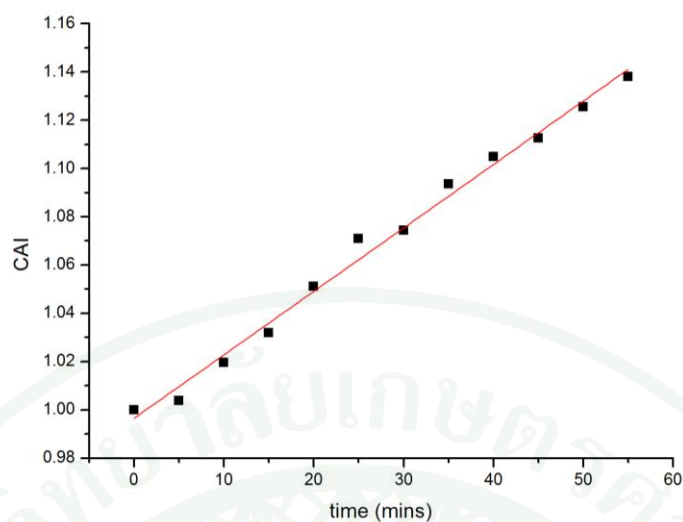


ภาพที่ 56 กราฟแสดงค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่สอดคล้องกับกราฟข้างต้น

6. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้อาหารและอัตราการเจริญเติบโตของยีสต์

6.1 อัตราการให้อาหารทุกๆ 48 ชั่วโมง

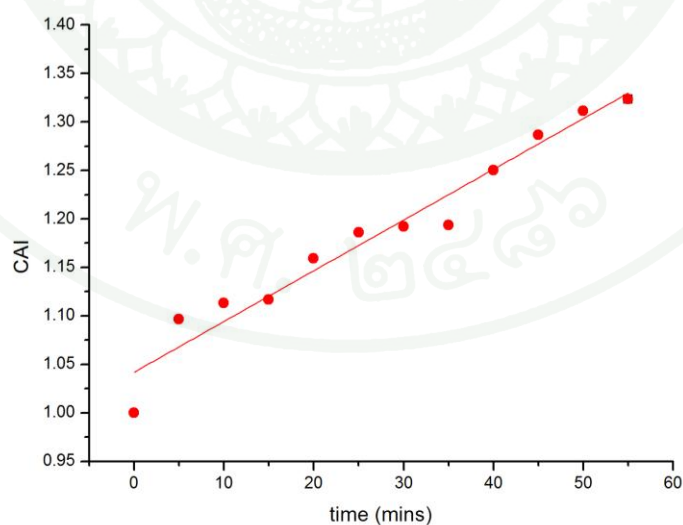
เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของยีสต์ที่ทำการเปลี่ยนอาหารใหม่ทุกๆ 48 ชั่วโมงเทียบกับเวลาได้ดังภาพที่ 57 โดยจากกราฟดังกล่าวคำนวณความชันเป็น 0.00263



ภาพที่ 57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาของการให้อาหารทุกๆ 48 ชั่วโมง

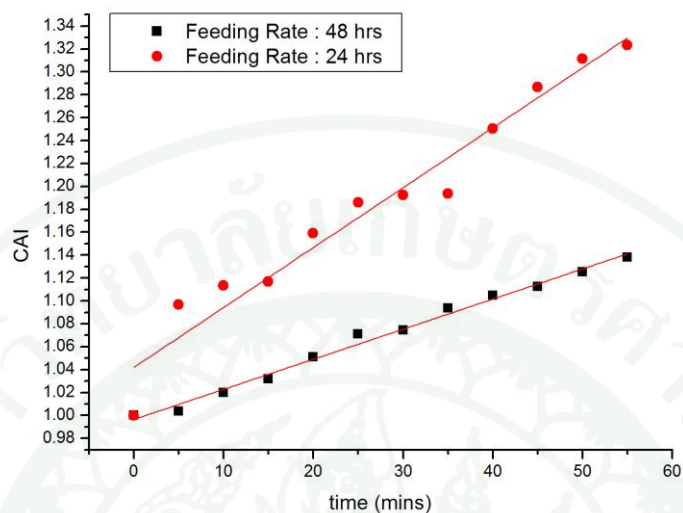
6.2 อัตราการให้อาหารทุกๆ 24 ชั่วโมง

เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของยีสต์ที่ทำการเปลี่ยนอาหารใหม่ทุกๆ 24 ชั่วโมงเทียบกับเวลา โดยจากกราฟดังกล่าวพบว่ามีค่าความชันเป็น 0.00523 ดังภาพที่ 58



ภาพที่ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างครรชนิพื้นที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาของการให้อาหารทุกๆ 24 ชั่วโมง

4.3 เปรียบเทียบการเจริญเติบโตของยีสต์กับอัตราการให้อาหารทุกๆ 24 และ 48 ชั่วโมง



ภาพที่ 59 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของครรชนิพันธ์ที่เซลล์ยีสต์ที่มีการเจริญเติบโตกับเวลาของการให้อาหารทุกๆ 24 และ 48 ชั่วโมง

วิจารณ์

1. การศึกษารูปแบบของแสงเลเซอร์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสง

ในการศึกษารูปแบบของแสงเลเซอร์ที่สามารถเกิดขึ้นได้โดยการใช้ชุดอุปกรณ์ปรับเปลี่ยนรูปแบบแสงนั้นพบว่ารูปแบบที่ได้มีความงดงาม เพียงแต่ถ้าเมื่อรูปแบบดังกล่าวมีขนาดใหญ่มากจะทำให้ลักษณะความเข้มของแสงเลเซอร์มีความชัดเจนน้อยลง ดังนั้นรูปแบบที่เหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาการจับเซลล์ยีสต์จะต้องมีขนาดที่ไม่ใหญ่และไม่เล็กจนเกินไปเพื่อที่จะได้มีเสถียรภาพในการจับ ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบเส้นตรงในแนวตั้ง วงกลม และสี่เหลี่ยมที่มีขนาดเหมาะสมในการทดลองต่อไป

นอกจากนั้นในรูปแบบการปรับเปลี่ยนแสงเลเซอร์ให้เป็นตัวอักษรนั้นพบว่า มีความซับซ้อนมากกว่าการทำให้เป็นรูปเรขาคณิต โดยทั่วไป และเมื่อตัวอักษรมีความซับซ้อนมากขึ้นเท่าไรเสถียรภาพของแสงเลเซอร์ที่ได้จะมีค่าน้อยลงเท่านั้น ดังนั้นจึงทำการเลือกตัวอักษรรูปแบบตัวอักษรแอลพิมพ์ใหญ่มาใช้ในการทดลองต่อไป เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยจึงทำให้มีเสถียรภาพสูงและเหมาะในการใช้ศึกษาการเจริญเติบโตของยีสต์

2. การศึกษายีสต์ที่ถูกจับด้วยด้วยกิมจับเชิงแสงภายใต้เลเซอร์รูปเส้นตรงที่มีทิศทางมุมแตกต่างกัน ครั้งละ 30 องศา

ในการศึกษารูปแบบของยีสต์ที่ถูกจับด้วยกิมจับเชิงแสงภายใต้แสงเลเซอร์รูปแบบเส้นตรง ความยาวเหมาะสมโดยกำหนดเป็นมุมต่างๆกล่าวคือ 0, 30, 60, 90, 120, 150 องศา กับแนวอ้างอิงตามลำดับ พบว่าสามารถควบคุมรูปแบบของยีสต์ให้อยู่ในทิศทางของมุมที่กำหนดได้เป็นอย่างดี

แสดงให้เห็นว่าสามารถกำหนดตำแหน่งและรูปแบบแนวการวางตัวของยีสต์ให้เป็นไปตามต้องการได้โดยไม่มีการทำลายเซลล์ของสิ่งมีชีวิตจึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการศึกษาเพื่อต่อยอดงานวิจัยทางชีวภาพในอนาคต

3. การศึกษารูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ที่ถูกจับด้วยคิมจับเชิงแสงภายใต้เลเซอร์รูปแบบต่างๆ

จากผลการทดลองที่ได้พบว่ายีสต์มีการเจริญเติบโตภายใต้รูปแบบของแสงเลเซอร์ที่กำหนดไว้ จากการทดลองจะพบว่าฟลักซ์ไอโอที่ได้อัตราของรูปแบบของแสงเลเซอร์ตัวอักษรแอลและแบบเส้นตรง จะมีฟลักซ์ไอโอที่มีระยะเวลานานเนื่องจากรูปแบบเลเซอร์ดังกล่าวมีเสถียรภาพสูงกว่ารูปแบบแสงเลเซอร์สี่เหลี่ยมและวงกลม

นอกจากนั้นในรูปแบบแสงเลเซอร์สี่เหลี่ยมจะพบว่าความสม่ำเสมอของความเข้มของแสงเลเซอร์นั้นไม่เท่ากันตลอดทั้งรูปสี่เหลี่ยม โดยจะพบว่ายีสต์พยายามที่จะถูกจับด้วยคิมจับเชิงแสงภายใต้บริเวณที่มีความเข้มของแสงเลเซอร์สูงกว่า

4. ศึกษาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการอธิบายรูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบเลเซอร์เส้นตรง

จากการพิจารณารูปการเจริญเติบโตของยีสต์เทียบกับฟังก์ชันที่นิยมในการใช้ศึกษาเป็นโมเดลในการเจริญเติบโตกล่าวคือ ฟังก์ชันลอจิสติกส์ ฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ และฟังก์ชันริชาร์ด นั้นพบว่า ค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่น้อยที่สุดเป็นของฟังก์ชันริชาร์ด หมายความว่า ฟังก์ชันริชาร์ดเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมในการอธิบายการเจริญเติบโตตลอดทั้งการทดลอง

$$\log(CAT) = 0.50033(1 + (21.01482)e^{-0.26646(x-171.0468)})^{-\frac{1}{21.01482}} \quad (23)$$

โดยสามารถพิจารณาเทียบค่ากับตัวแปรทางชีววิทยาได้ว่า อัตราการเจริญเติบโตสูงสุดในแกน Y มีค่าเป็น 0.50033 อัตราการเจริญเติบโตสูงสุดในช่วงระยะพักคือ 0.00523 และช่วงเวลาของระยะพักคือ 88.42719 นาที

นอกจากนั้นในภาคผนวกยังได้พิจารณาหาค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือของกราฟในช่วงอื่นๆอีกด้วยและพบว่า เมื่อเวลาในการทดลองผ่านไป 100 นาที ฟังก์ชันที่เหมาะสมที่ใช้ในการอธิบายการเจริญเติบโตของยีสต์คือ ฟังก์ชันลอจิสติกส์ ฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ ตามลำดับ

5. ศึกษาโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับการอธิบายรูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้รูปแบบเลเซอร์วงกลม

จากการพิจารณารูปการเจริญเติบโตของยีสต์พบว่าตั้งแต่หน้าที่ที่ 115 เป็นต้นไป ค่าครรชนิพินที่เซลล์ยีสต์มีค่าลดลงเนื่องจากการช้อนทับกันของยีสต์ เนื่องจากการเจริญเติบโตภายใต้เลเซอร์รูปแบบวงกลมนั้นยีสต์มีพื้นที่ในการพลิกตัวเพื่อให้เกิดความสมดุลเมื่อถูกจับด้วยเข็มจับเชิงแสงน้อยกว่าการเจริญเติบโตภายใต้เลเซอร์รูปแบบเส้นตรง ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าเลเซอร์รูปแบบเส้นตรงมีความเหมาะสมสำหรับการศึกษาโมเดลทางคณิตศาสตร์ของการเจริญเติบโตของยีสต์มากกว่าเลเซอร์รูปแบบวงกลม

ผลจากการพิจารณารูปการเจริญเติบโตของยีสต์ในช่วงเวลาที่ไม่มีการทับซ้อนกันของยีสต์ เทียบกับฟังก์ชันที่นิยมในการใช้ศึกษาเป็น โมเดลในการเจริญเติบโตกล่าวคือ ฟังก์ชันลอจิสติกส์ ฟังก์ชันกอมเพิร์ตซ์ และฟังก์ชันริชาร์ด นั้นพบว่า ค่าผลบวกกำลังสองของส่วนที่เหลือที่น้อยที่สุดเป็นของฟังก์ชันริชาร์ด หมายความว่า ฟังก์ชันริชาร์ดเป็นฟังก์ชันที่เหมาะสมในการอธิบายการเจริญเติบโตตลอดทั้งการทดลอง

6. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการให้อาหารและอัตราการเจริญเติบโตของยีสต์

จากการพิจารณารูปแสดงความสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของยีสต์ที่ทำการเปลี่ยนอาหารใหม่ทุกๆ 24 และ 48 ชั่วโมงเทียบกับเวลาพบว่า ยีสต์ที่ทำการเปลี่ยนอาหารใหม่ทุกๆ 24 ชั่วโมง จะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่า ยีสต์ที่ทำการเปลี่ยนอาหารใหม่ทุกๆ 48 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการให้อาหารมีผลต่อการเจริญเติบโตของยีสต์ โดยการให้อาหารที่บ่อยกว่า ทำให้ความหนาแน่นสภาพแวดล้อมของยีสต์น้อยกว่าจึงมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตมากกว่านั่นเอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

รูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์สามารถถูกกำหนดให้เป็นไปตามรูปแบบของแสงเลเซอร์ภายใต้คีมจับเชิงแสงได้ โดยจากการทดลองพบว่าการกำหนดรูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ในรูปแบบเส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม และตัวอักษรแอลนั้นประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุดที่ในการอธิบายการทดลองนี้ทั้งการทดลองคือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สอดคล้องกับฟังก์ชันริชาร์ด นอกจากนี้จากการทดลองยังพบอีกว่า อัตราการให้อาหารมีความสำคัญต่ออัตราการเจริญเติบโตของยีสต์อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาในรูปแบบการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้คีมจับเชิงแสงนั้นเป็นการทดลองที่น่าสนใจเพราะสามารถเลือกศึกษาสิ่งมีชีวิตที่มีขนาดเล็ก โดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่เซลล์และยังสามารถระบุเฉพาะเจาะจงศึกษาในแต่ละตัว ซึ่งแตกต่างจากการทดลองในทางชีววิทยาส่วนใหญ่ที่เมื่อสิ่งมีชีวิตมีขนาดเล็กมากๆมักจะใช้การพิจารณาเป็นกลุ่มก้อน จึงเป็นการทดลองที่น่าศึกษาต่อยอดเป็นอย่างยิ่ง โดยผลที่ได้จากการทดลองจะเป็นการผสมผสานระหว่างศาสตร์ทางด้านฟิสิกส์ คณิตศาสตร์ และชีววิทยาอีกด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- Aabo, T., I.R. Pech-Nielsen, J.S. Dam, D.Z. Palima, H. Siegumfeldt, J. Gluckstad and N. Arneborg. 2009. Inhibition of Yeast Growth During Long Term Exposure to Laser Light Around 1064 nm. **Proceeding of SPIE 7227**.
- Albrecht-Buehler, G. 1991. Surface Extensions of 3t3 Cells Towards Distant Infrared Light Sources. **Journal of Cell Biology** 114: 493-502.
- Ashkin, A. 1970. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. **Physical Review Letters** 24 (4).
- Ashkin, A. 2000. History of Optical Trapping and Manipulation of Small-Neutral Particle, Atom and Molecules. **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics** 6 (6): 841.
- Ashkin, A. and J.M. Dziedzic. 1987. Optical Trapping and Manipulation of Single Cells Using Infrared Laser Beams. **Nature** 330: 769-771.
- Ashkin, A. and J.M. Dziedzic. 1987. Optical Trapping and Manipulation of Viruses and Bacteria. **Science** 235
- Ashkin, A. and J.M. Dziedzic. 1989. Internal Cell Manipulation Using Infrared Laser Traps. **Proceeding of the National Academy of Science** 86: 7914.
- Ashkin A., J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm and S. Chu. 1986. Observation of a Single-Beam Gradient Force Optical Trap for Dielectric Particles. **Optics Letters** 11 (5).
- Ehrlicher, A., T. Betz, B. Stuhmann, D. Koch, V. Milner, M. G. Raizen and J. Kas. 2002. Guiding Neuronal Growth with Light. **Proceeding of National Academy of Sciences** 99.

- Ethier C.R. and C.A. Simmons. 2007. **Introductory Biomechanics: From Cells to Organisms**. Cambridge, New York.
- Grier, D.G. 2003. A Revolution in Optical Manipulation. **Nature** 424: 810-816.
- Gordon, J.P. 1973. Radiation Forces and Momenta in Dielectric Media. **Physical Review A** 8 (1).
- Harada Y. and T. Asakura. 1996. Radiation Forces on a Dielectric Sphere in the Rayleigh Scattering Regime. **Optics Communications** 124.
- Matthew, J.L. and S.M. Block. 2003. Resource Letter: Lbot-1: Laser-Based Optical Tweezers. **American Journal of Physics** 71 (3): 201.
- Murray, C.A. 1962. When Like Charges Attract. **Nature** 15: 1088.
- Neuman, K.C. and S.M. Block. 2004. Optical Trapping. **Review of Scientific Instruments** 75 (9).
- Naumov, G.I., E.S. Naumova, N.N. Martynenko and I.M. Pomarede. 2011. Taxonomy, Ecology, and Genetics of the Yeast *Saccharomyces bayanus*: A New Object for Science and Practice. **Microbiology** 80 (6): 735-742.
- Rohrbach, A. 2005. Stiffness of Optical Traps: Quantitative Agreement between Experiment and Electromagnetic Theory. **Physical Review Letters** 95 (16).
- Smith, S.B., Y. Cui and C. Bustamante. 1996. Overstretching of B-DNA: The Elastic Response of Individual Double-Stranded and Single-Stranded DNA Molecules. **Science** 271: 795.
- Svoboda, K. and S.M. Block. 1994. Optically Trapping of Metallic Rayleigh Particles. **Optical Letters** 19: 930.

Zwietering, M.H., I. Jongenburger, F.M. Rombouts and K.V. Riet. 1990. Modeling of the Bacterial Growth Curve. **Applied and Environmental Microbiology** 56 (6): 1875-1881.



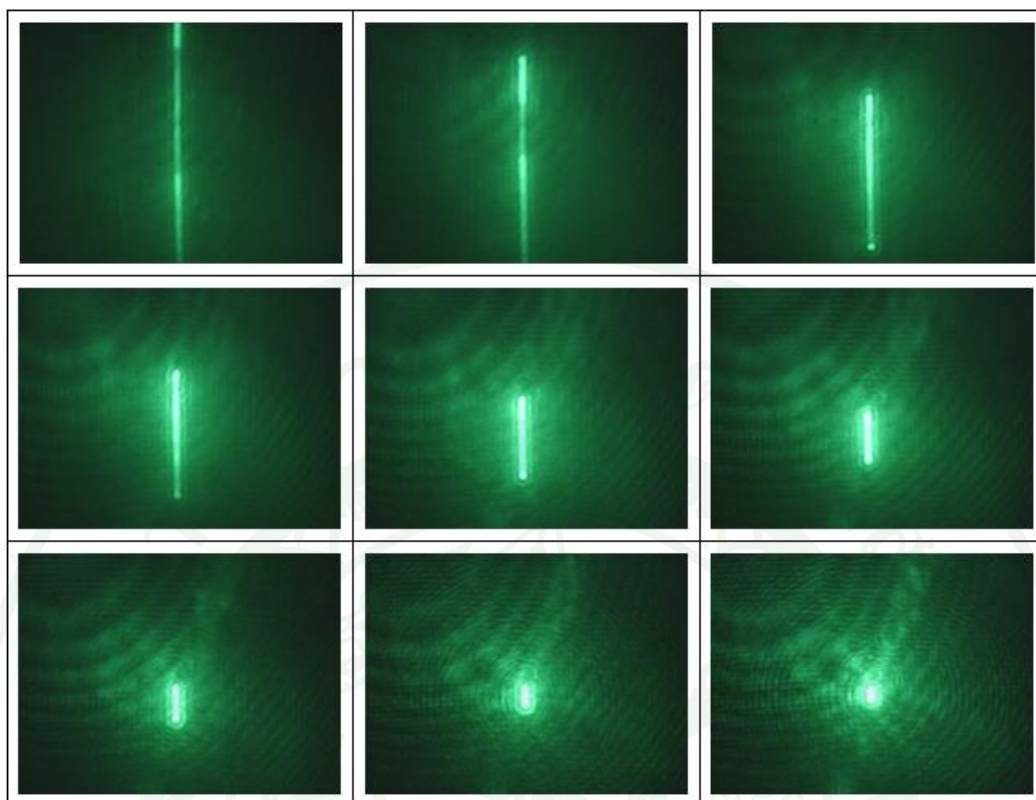


ภาคผนวก

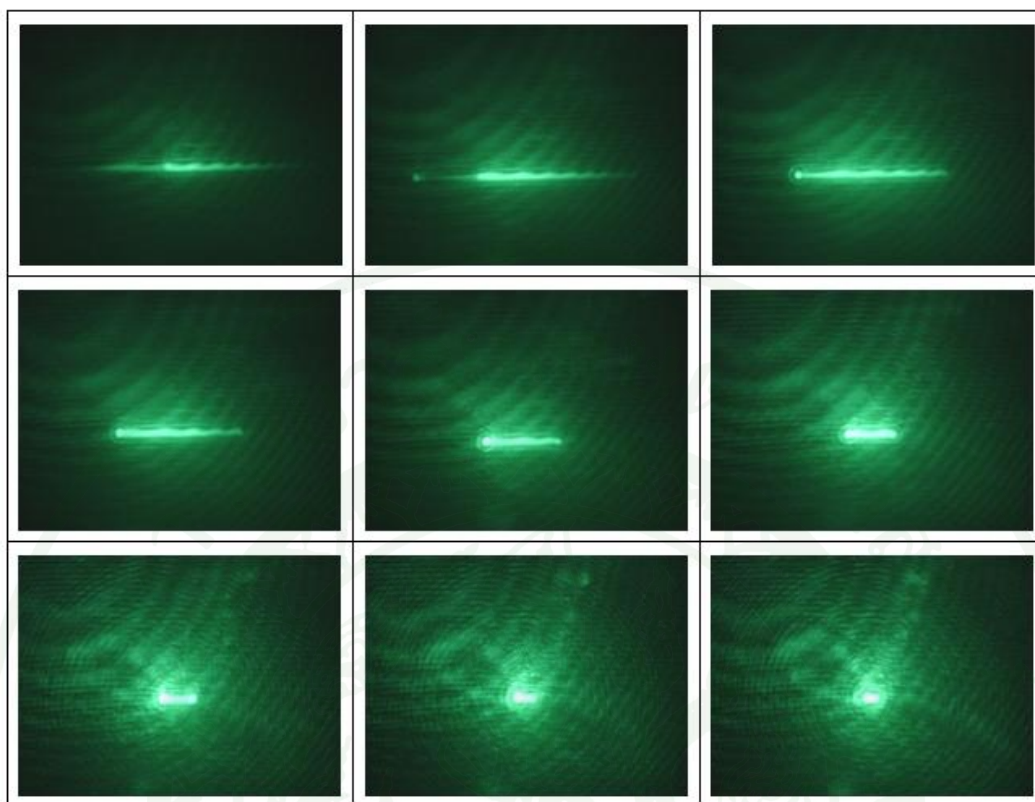


ภาคผนวก ก

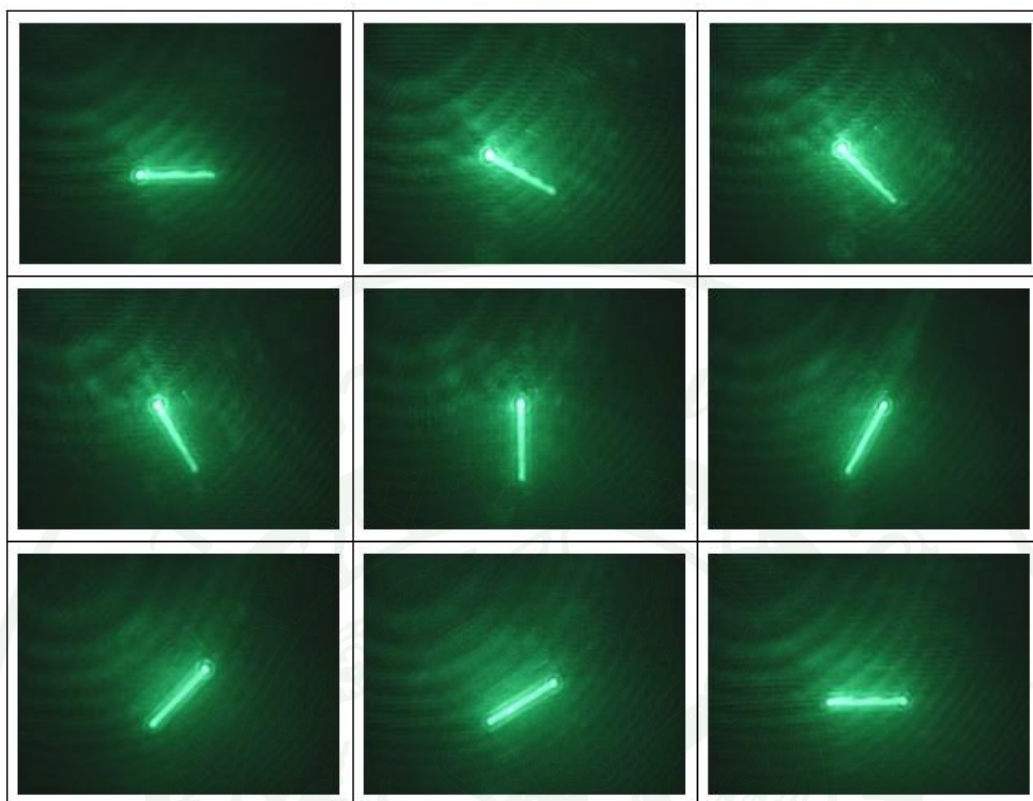
ภาพแสดงการศึกษารูปแบบของแสงเลเซอร์ที่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยชุดปรับเปลี่ยนรูปแบบแสง



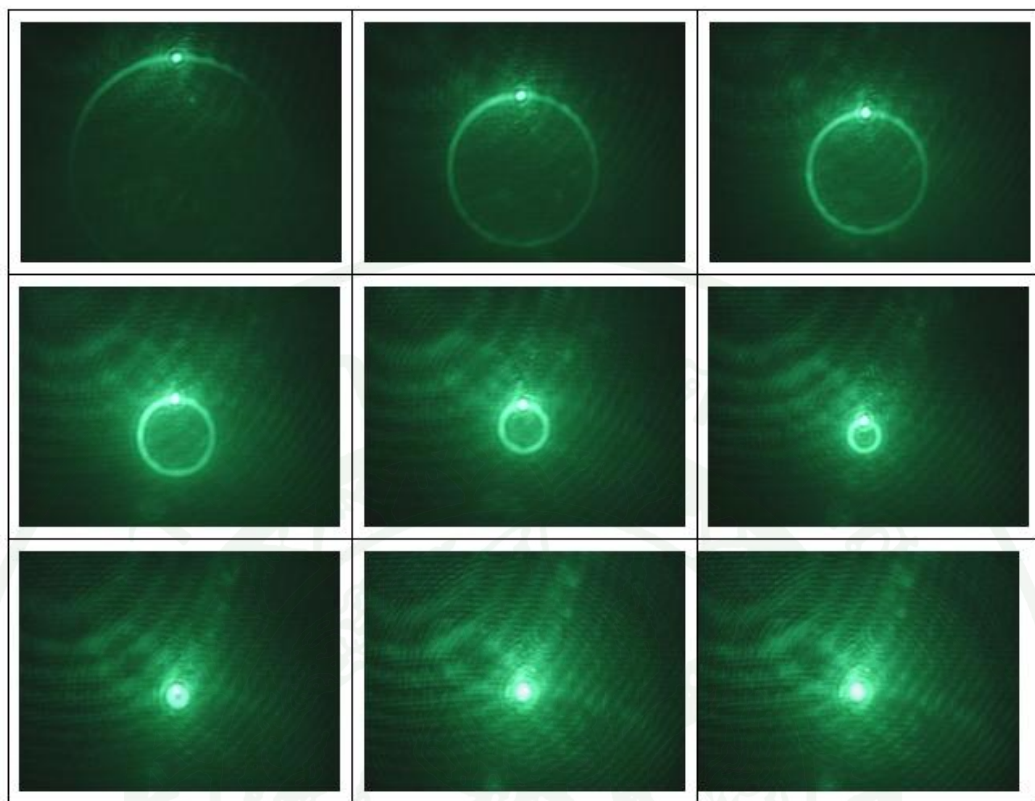
ภาพผนวกที่ ก1 ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นเส้นตรงในแนวตั้งที่มีความยาวแตกต่างกัน



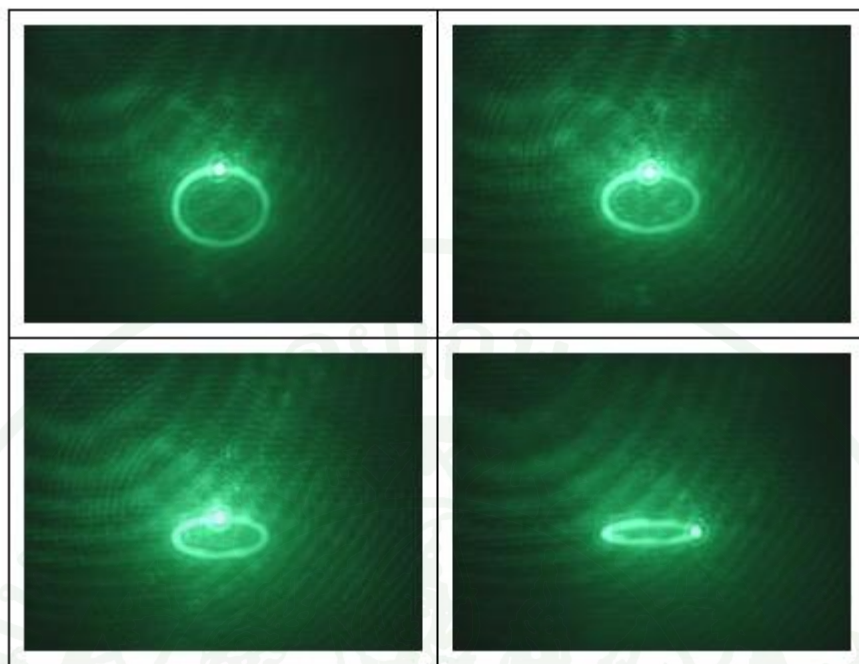
ภาพผนวกที่ ก1 ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นเส้นตรงในแนวนอนที่มีความยาวแตกต่างกัน



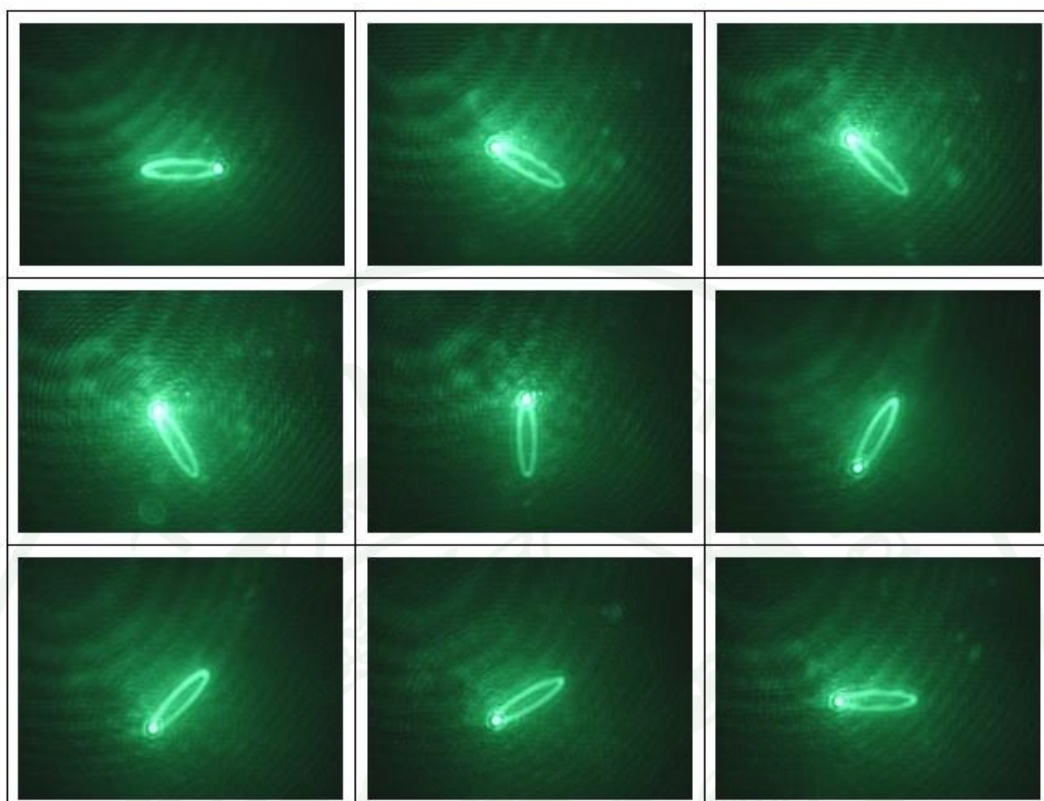
ภาพผนวกที่ ก2 ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นเส้นตรงในทิศทางมุมที่ต่างกัน



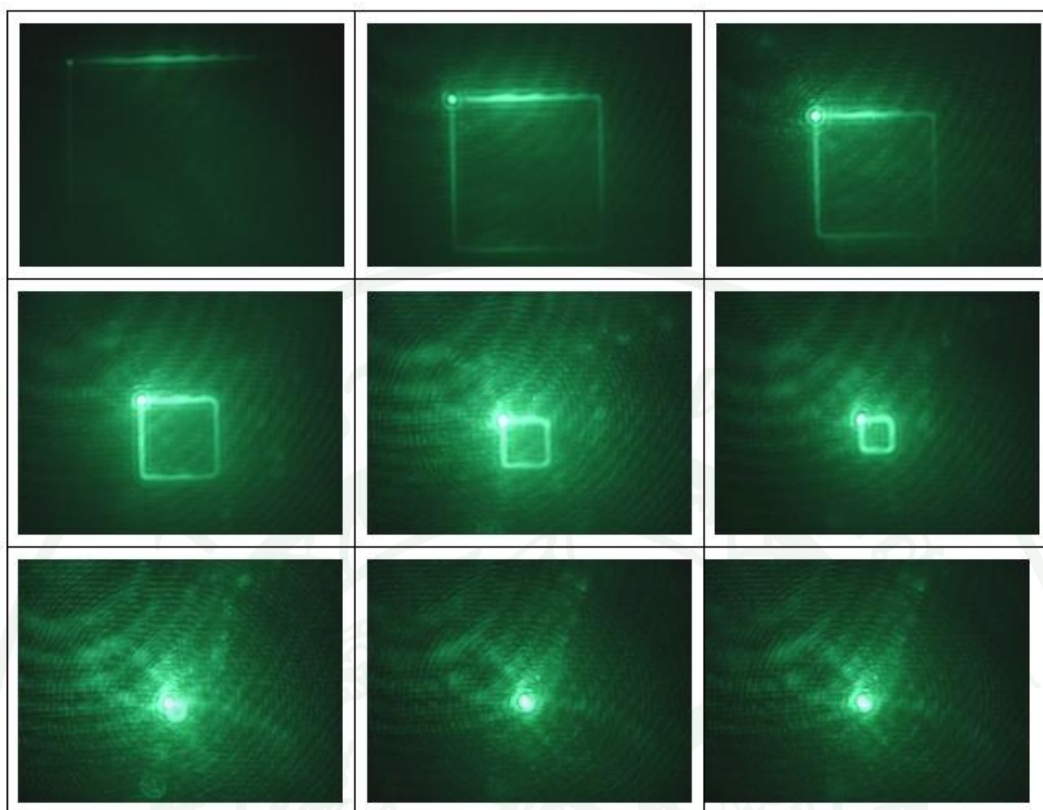
ภาพผนวกที่ ก3 ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นวงกลมที่มีขนาดแตกต่างกัน



ภาพผนวกที่ ก4 ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นวงรีที่มีขนาดแตกต่างกัน

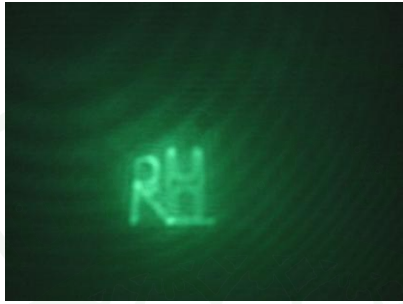
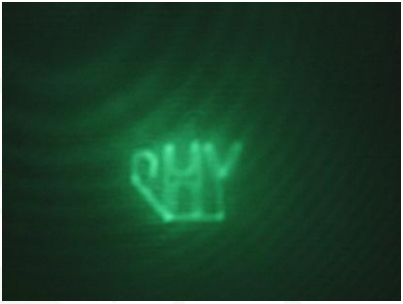
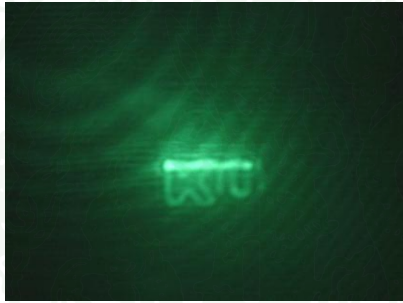
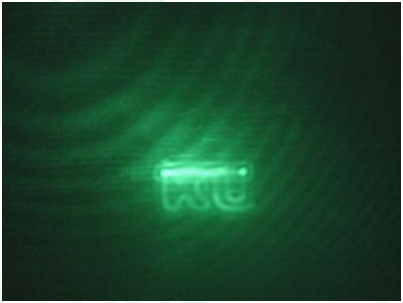


ภาพผนวกที่ ก5 ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นวงรีในทิศทางมุมที่ต่างกัน



ภาพผนวกที่ 6 ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นสี่เหลี่ยมที่มีขนาดแตกต่างกัน

ตารางผนวกที่ ก1 ลักษณะแสงเลเซอร์เป็นตัวอักษรต่างๆ

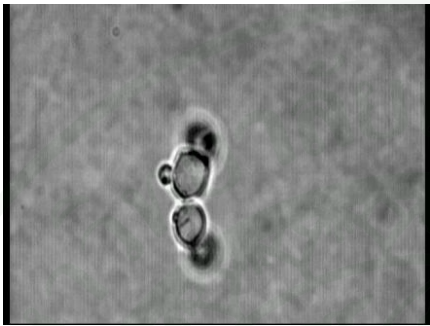
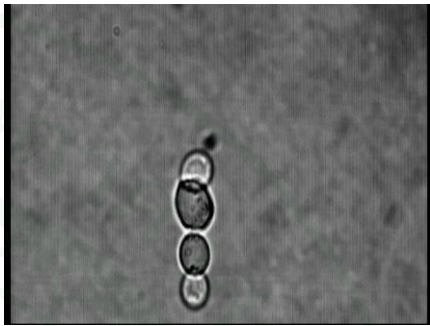

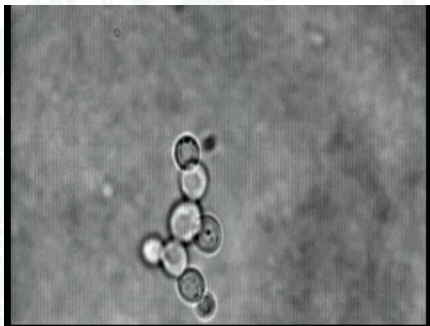

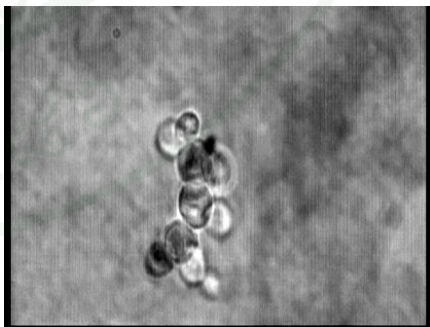
รูปแบบตัวอักษร	ผลที่ได้	
PHYS		
KU		




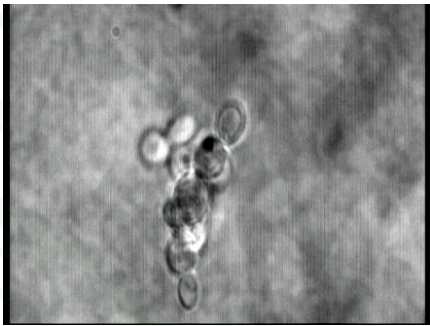
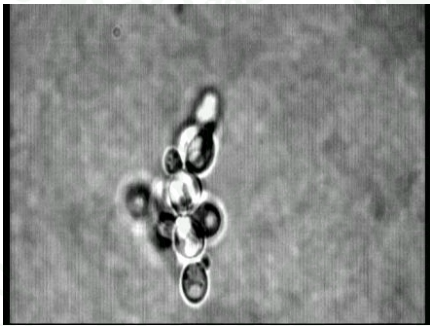


ภาคผนวก ข

ภาพแสดงการศึกษากาการเจริญเติบโตของยีสต์ภายใต้คิมจับเชิงแสง


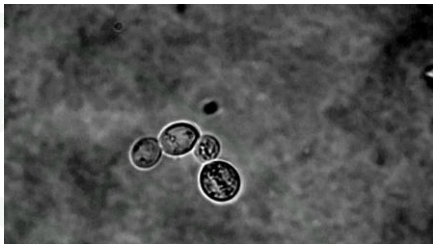






ตารางผนวกที่ ข1 ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปเส้นตรง ในช่วงเวลา 0:01-6:41 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์	เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์
0:01		2:24	
3:04		4:06	
4:44		6:41	




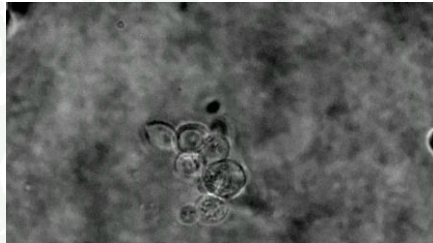
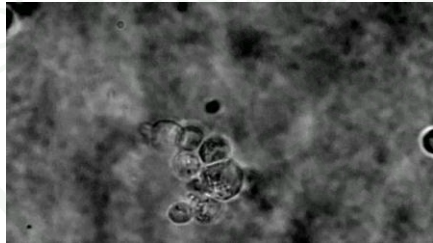
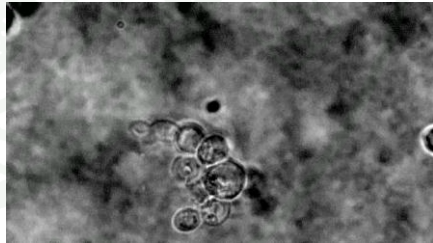
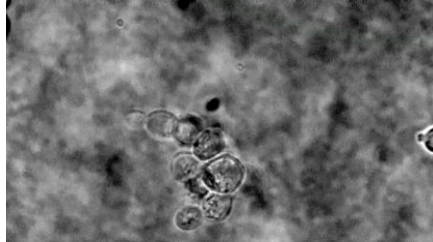
ตารางผนวกที่ ข2 ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปเส้นตรง ในช่วงเวลา 6:43 - 8:02 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์	เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์
6:43		7:09	
7:33		7:41	
8:02			









ตารางผนวกที่ ข3 ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปวงกลม ในช่วงเวลา 0:01-1:22 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์	เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์
0:01		0:20	
0:34		0:42	
0:50		1:04	
1:09		1:22	

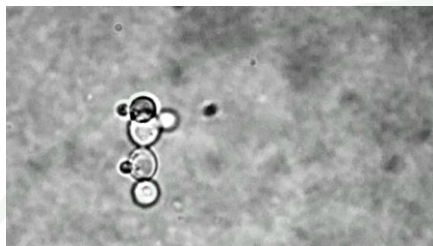

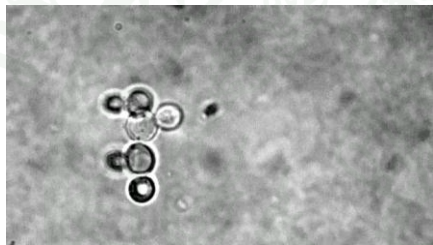



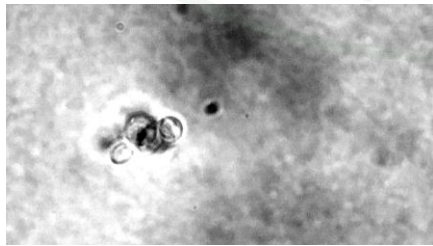
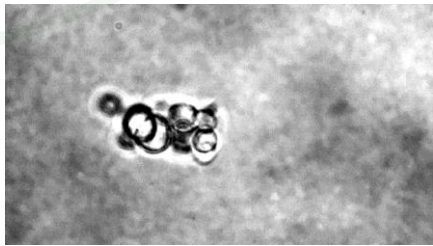
ตารางผนวกที่ ข4 ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปวงกลม ในช่วงเวลา 1:39-2:20 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์	เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์
1:39		1:44	
1:51		1:54	
2:05		2:14	
2:20			

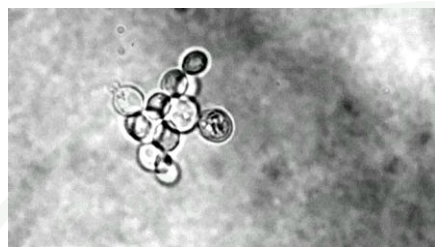


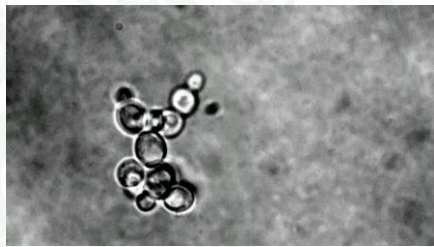
ตารางผนวกที่ ข5 ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในช่วงเวลา 0:01-1:50 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์	เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์
0:01		0:03	
0:24		0:51	
1:04		1:09	
1:16		1:50	


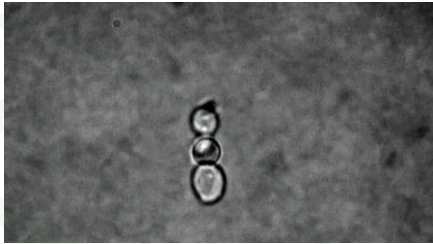
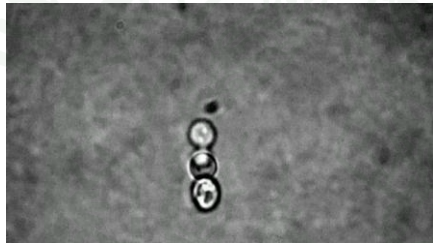
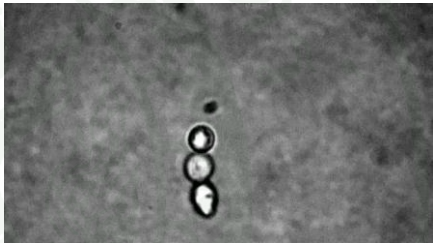




ตารางผนวกที่ ข6 ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในช่วงเวลา 1:58-4:20 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์	เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์
1:58		2:08	
2:41		3:05	
3:10		3:30	
3:49		4:20	

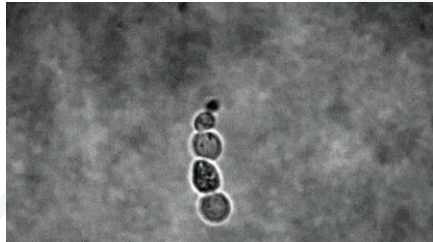
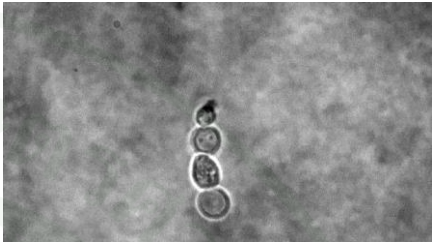
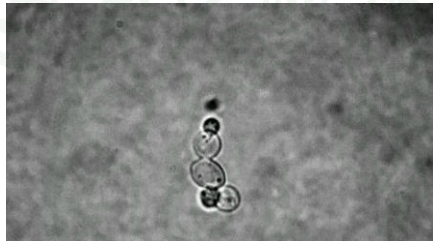
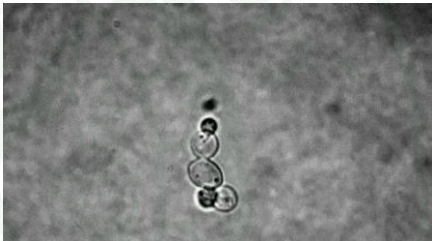
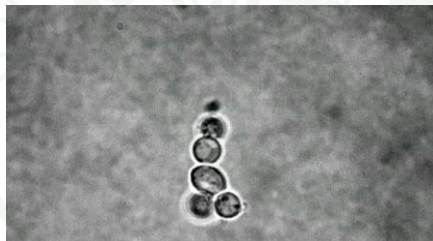
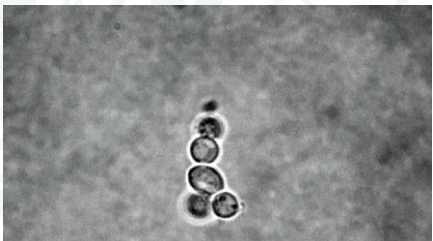

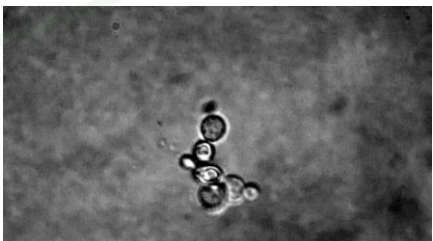
ตารางผนวกที่ ข7 ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปสี่เหลี่ยม ในช่วงเวลา 4:25-5:35 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์	เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์
4:25		5:03	
5:26		5:35	

ตารางผนวกที่ ข8 ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปตัว L ในช่วงเวลา 0:01-3:49 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์	เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์
0:01		0:16	
0:36		1:04	
1:32		2:00	
2:40		3:49	

ตารางผนวกที่ ๗๑ ผลการทดลองจับยีสต์เป็นรูปตัว L ในช่วงเวลา 3:56-9:30 ชั่วโมง

เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์	เวลา (ชม.)	ลักษณะยีสต์
3:56		4:31	
4:50		5:24	
6:27		7:03	
8:52		9:30	

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวสุขพิชญา จรรย์ชล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	2 กรกฎาคม พ.ศ. 2531
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (พ.ศ. 2553)
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทาง วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.)