สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน

Computer Program For Thermal Process Calculation

T042322

โดย

นายภัทร สุพพัตกุล

นายมนตรี เหลืองอุดมศิลป

นางสาวศุภลักษณ์ เที่ยงชัด

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42322
วัน, เดือน, ปี 17 พ.ค. 2545
b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋อง

ผู้จัดทำ

นายภัทร สุพพัตกุล

นายมนตรี เหลืองอุดมศิลป

นางสาวศุภลักษณ์ เที่ยงชัด

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน

นายภัทร สุพพัตกุล

นายมนตรี เหลืองอุดมศิลป

นางสาวศุภลักษณ์ เที่ยงชัด

ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2543

<u>บทคัดย่อ</u>

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อให้โปรแกรมใช้งานง่าย โปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนแรกของโปรแกรมใช้ในการคำนวณหาค่า F_0 โดยการรับข้อมูลการแทรกผ่านความร้อนในอาหาร ส่วนที่ 2 ของโปรแกรมใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ f_h , i_c , j_h , j_c , $\propto_h$ และ $\propto_c$ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะบอกถึงคุณสมบัติต่างๆ ในการถ่ายโอนความร้อนของผลิตภัณฑ์ และส่วนที่ 3 ใช้ในการคำนวณเพื่อหาเวลาที่แน่นอนในการเปิด-ปิดไอน้ำ โดยในส่วนที่ 3 นี้ยังแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อยอีก คือ การประมาณค่า F_0 เมื่อกำหนดเวลาที่เริ่มปิดไอน้ำ และคำนวณหาเวลาที่เริ่มปิดไอน้ำรวมทั้งเวลาที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมดเมื่อกำหนดค่า F_0 โปรแกรมนี้ ในระหว่างการใช้งานจะมีคำแนะนำทุกขั้นตอน ทำให้สามารถใช้งานได้ง่าย รวมทั้งการคำนวณและการออกแบบที่ได้มีความแม่นยำ ถูกต้องและรวดเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Computer Program For Thermal Process Calculation

Mr. PATARA SUPPATKUL

Mr. MONTREE LUENGUDOMSINLAPA

Miss SUPPALAK TIANGCHAT

Dr. PIMPEN PORNCHLOEMPONG ADVISER

2000

ABSTRACT

The user friendly computer software program for thermal process calculation was developed. The software was divided into 3 main parts. The first part was a program for calculation for F_0 from heat penetration data. The second part was the calculation of heat penetration parameters , such as f_h , f_c , j_h , j_c , $\propto_h$ and $\propto_c$. The parameters were important for indicating how heat was transfered into food product. The third part was the calculation of processing time ; divided into 2 parts : calculation for F_0 when cooling time were given and calculation for cooling time and total process time when F_0 was given. The software facilitates engineers to produce quick and correct designs , prevents calculation errors. In each step has user guide items.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 คำนำ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

บทที่ 2 ตรวจเอกสาร 2

2.1 ผลของความร้อนต่อเชื้อจุลินทรีย์ 2

2.2 การคำนวณการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน 5

1.) General method หรือ Graphical method 5

1.1) Rectangular Method 5

1.2) Trapezoidal Method หรือ Even Time Intervals (Patashnik) 7

1.3) Trapezoidal Method – Uneven Time Intervals 9

1.4) Trapezoidal Integration 10

2.) Formula method 11

2.1) การเขียน Heat Penetration Curve 12

2.2) คำจำกัดความของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ 13

บทที่ 3 การคำนวณและการสร้างโปรแกรม 16

แผนผังการทำงานรวมของโปรแกรม 16

3.1 การรับข้อมูล (Get Time , Temperature Data) 18

3.2 การคำนวณหาค่า Fo (Calculate Fo) 21

3.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (Calculate Heat penetration curve parameter) 24

3.4 Shift Cooling curve 32

3.4.1 การคำนวณหาค่า F_0 เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในกระบวนการ (Fo vs Process Time Plot) 35

3.4.2 การคำนวณหาค่า F_0 เมื่อกำหนดเวลาที่ใช้ในกระบวนการ (Estimate Lethality , Given Time) 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.3 การคำนวณหาค่า Process time กับ Cooling time เมื่อ
กำหนดค่า F_0 (Estimate Time , Given Lethality) 37

บทที่ 4 บทวิจารณ์และสรุป 38

ภาคผนวก 39

ภาคผนวก ก. Bi Section 41

หนังสืออ้างอิง 42

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 แสดงค่า Lethal Rate ที่อุณหภูมิต่าง ๆ 4

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูล heat penetration และการหาค่า F_0 โดย Rectangular Method 6

ตารางที่ 3 แสดงการหาค่า F_0 โดยวิธี Trapezoidal Integration 10

ตารางภาคผนวก 1 แสดงค่า D ของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ 40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 แสดงการหาค่า F_0 โดย General Method – Rectangular Method 7

รูปที่ 2 แสดงการหาค่า F_0 ด้วย Trapezoidal Method-Even Time Intervals. 8

รูปที่ 3 แสดงการหาค่า F_0 ด้วย Trapezoidal Method-Uneven Time Intervals. 9

รูปที่ 4 แสดงการอ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ 14

รูปที่ 5 แสดงเมนูหลักของโปรแกรม 17

รูปที่ 6 แสดงการรับชื่อผลิตภัณฑ์ และขนาดกระป๋อง 19

รูปที่ 7 แสดงการเลือกข้อมูลซึ่งถูกเก็บไว้ใน Text file 19

รูปที่ 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อและอุณหภูมิอาหาร
กระป๋อง กับ เวลา และตารางแสดงข้อมูลดังกล่าว 20

รูปที่ 9 แสดงการกำหนดค่า Z และ Reference temperature 22

รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Lethal rate กับเวลา และค่า F_0 ที่คำนวณได้ 23

รูปที่ 11 Select cooling time start 25

รูปที่ 12 แสดงการกำหนดอุณหภูมิคงที่ของหม้อฆ่าเชื้อ 26

รูปที่ 13 แสดงการเลือกช่วงเวลาและทำการคำนวณค่า f_h และ j_h 27

รูปที่ 14 แสดงการคำนวณหาค่า $\propto_h$ 28

รูปที่ 15 แสดงการกำหนดอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการทำเย็น 29

รูปที่ 16 แสดงการเลือกช่วงเวลาและทำการคำนวณค่า f_c และ j_c 30

รูปที่ 17 แสดงการคำนวณหาค่า $\propto_c$ 31

รูปที่ 18 แสดงกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบต่าง ๆ 34

รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป
ในแต่ละครั้ง เมื่อเวลามีการเปลี่ยนไปในแต่ละครั้ง 34

รูปที่ 20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า F_0 กับเวลาที่ใช้ในกระบวนการ
(Process time) และตารางแสดงผล 35

รูปที่ 21 แสดงการประมาณค่า F_0 เมื่อกำหนดค่า Process time 36

รูปที่ 22 แสดงการประมาณค่า Cooling time และ Process time เมื่อกำหนดค่า F_0 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

1.1 คำนำ

ในอุตสาหกรรมอาหารแปรรูปด้วยความร้อนบรรจุในภาชนะปิดสนิท โดยเฉพาะอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ (Low acid canned food) คือมีค่า pH > 4.6 การกำหนดกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมาก เพราะเกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้บริโภคโดยตรง จุดมุ่งหมายของการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน เพื่อทำให้อาหารนั้นอยู่ในสภาพปลอดเชื้อแบบเชิงการค้า (Commercial Sterility) หมายความว่าทำให้อาหารปราศจากเชื้อโรคที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค และสามารถฆ่าเชื้อในอาหารได้หมด การฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องนี้จะต้องใช้ปริมาณความร้อนที่เพียงพอต่อการทำลายสปอร์ของ *Clostridium botulinum* ซึ่งเป็นเชื้อแบคทีเรียที่เราจะต้องให้ความสำคัญอย่างมากที่สุด ประกอบกับอาหารกระป๋องจะเป็นประเภทกรดต่ำ เนื่องจาก *Clostridium botulinum* เป็นแบคทีเรียที่เจริญได้ในอุณหภูมิปกติ และไม่ต้องการอากาศในการเจริญเติบโต และสร้างสารพิษชนิดที่เป็นอันตราย แม้ว่าเซลล์ *Clostridium botulinum* จะถูกทำลายได้ที่อุณหภูมิไม่สูงนักแต่สปอร์และสารพิษในสปอร์ค่อนข้างทนความร้อนสูง จึงเป็นอันตรายต่อผู้บริโภคหากใช้ความร้อนฆ่าเชื้ออาหารไม่เพียงพอ ดังนั้นในการฆ่าเชื้ออาหารกระป๋องจึงถือเอาอุณหภูมิและเวลาที่ทำลายสปอร์ของ *Clostridium botulinum* เป็นหลัก ถ้าอาหารปลอดภัยจากสปอร์และสารพิษของเชื้อนี้ก็จะปลอดภัยจากเชื้อชนิดอื่นด้วย ซึ่งทำให้สามารถเก็บอาหารภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้องไว้ได้นานโดบไม่เน่าเสียและยังคงรักษาคุณค่าของสารอาหารที่สำคัญไว้ได้ในระดับที่น่าพอใจ

1.2 วัตถุประสงค์

1. คำนวณหาค่า F_0 และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น f_h , f_c , j_h , j_c , $\propto_h$ และ $\propto_c$ จากข้อมูลการแทรกซึมความร้อน (Heat penetration data) ที่ได้จากการทดลอง
2. คำนวณหา Process time เพื่อให้ได้ค่า F_0' ของกระบวนการฆ่าเชื้อเท่ากับค่าที่กำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 ผลของความร้อนต่อเชื้อจุลินทรีย์

ในการคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนมีสัญลักษณ์ที่เกี่ยวข้องกับจุลินทรีย์อยู่ 3 ค่า คือ D , Z , F ตัวแปรเหล่านี้บอกให้ทราบถึงความทนทานต่อความร้อนของแบคทีเรียและประสิทธิภาพของความร้อนที่ใช้ในการทำลายเชื้อจุลินทรีย์เป้าหมาย

1. ค่า D (Decimal Reduction Time หรือ Death Rate Constant)

ความสามารถในการทนทานต่อความร้อนของจุลินทรีย์ถูกกำหนดให้แสดงอยู่ในรูปของค่า "D" (D Value) ซึ่งหมายถึงระยะเวลาเป็นนาทีที่ใช้ในการทำลายจำนวนสปอร์ของจุลินทรีย์ลงร้อยละ 90 ของที่มีอยู่ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีค่า D แตกต่างกัน การหาค่า D ทำได้โดยใส่สปอร์ของจุลินทรีย์ที่ทราบจำนวนแน่นอนลงไปในภาชนะบรรจุขนาดเล็ก แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิคงที่โดยใช้เวลานานต่าง ๆ กัน ข้อมูลที่ได้นำมาแสดงในรูปของ Semilogarithmic Graph ที่เรียกว่า Thermal Death Time Curve (TDT) เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง โดยแนวตั้ง เป็น log-scale แสดงจำนวนสปอร์ที่เหลือรอดอยู่ ส่วนแนวนอน เป็นสเกลปกติแสดงเวลาที่ให้ความร้อน ถ้าเราให้ความร้อนแก่สปอร์จำนวน 10,000 สปอร์ ที่อุณหภูมิ 240 $^{\circ}$F และพบว่าต้องใช้เวลา 10 นาที เพื่อลดจำนวนสปอร์จาก 10,000 ให้เหลือ 1,000 หรือลดลง 90 % (1 log cycle) นั้นคือ ค่า D_{240} = 10 นาที ตัว Subscript ที่อยู่ข้างล่างตัว D บอกอุณหภูมิที่ใช้ในการหาค่า D ปัจจัยที่มีผลต่อค่า D คือ ชนิดของสปอร์ ชนิดของอาหารที่สปอร์แขวนลอยอยู่ เป็นต้น ค่า D ของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ถูกแสดงไว้ใน ตารางภาคผนวก 1

2. ค่า Z (Z Value)

ถ้าเราหาค่า D ของสปอร์ตัวเดียวกันที่หลายอุณหภูมิ แล้วแสดงข้อมูลที่ได้ในรูปของกราฟระหว่าง log ของค่า D กับอุณหภูมิที่ใช้ในการหาค่า D แต่ละค่า เราจะได้ Thermal Death Time Curve (TDT) ค่า Z คือ จำนวนองศาฟาเรนไฮต์หรือองศาเซลเซียสที่ต้องการเพื่อเปลี่ยน TDT Curve ไป 1 log Cycle หรือคืออุณหภูมิที่ทำให้ค่า D เปลี่ยนไป 10 เท่า ถ้าค่าการเปลี่ยนแปลงไป 1 log cycle มีค่าเท่ากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการฆ่าเชื้อไป 20 $^{\circ}$F นั่นก็คือ ค่า Z = 20 $^{\circ}$F ซึ่งเป็นตัวบอกว่า ถ้าอุณหภูมิในการฆ่าเชื้อเพิ่มขึ้น 20 $^{\circ}$F เวลาในการฆ่าเชื้อสามารถลดลงมา 10 เท่า (1 log

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cycle) เช่น ถ้าใช้อุณหภูมิ 240 °F จะใช้เวลาฆ่าเชื้อ 10 นาที แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิเข้าไปอีก 20 °F เป็น 260 °F เวลาที่ใช้จะลดลง 10 เท่าเป็นเหลือ 1 นาที โดยยังคงให้ผลในการฆ่าเชื้อได้เท่าเดิม

3. ค่า F (Sterilizing Value) คือจำนวนนาทีที่อุณหภูมิหนึ่งซึ่งใช้เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่ทราบจำนวนในอาหารภายใต้สภาวะที่กำหนด ในการกล่าวถึงค่า F นั้นต้องบอกอุณหภูมิอ้างอิงและบอกค่า Z ของจุลินทรีย์ที่เป็นเป้าหมายด้วยเสมอ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ F_T^Z ถ้าค่าอุณหภูมิอ้างอิงเป็น 250 °F และค่าจุลินทรีย์เป้าหมายมีค่า Z = 18 °F จะได้ F_{250}^{18} ซึ่งจะเขียนแทนด้วย F_0 ซึ่งคือจำนวนนาทีที่ 250 °F ที่ใช้เพื่อที่จะทำลายจุลินทรีย์ดังกล่าวลงจำนวนหนึ่ง

ในอุตสาหกรรมอาหารเราพูดถึง “กระบวนการ 12D” หมายถึง การลดจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้นลง 90 % เป็นจำนวน 12 ครั้ง นั่นก็คือจุลินทรีย์ที่เหลืออยู่มีจำนวน 10^{-12} เท่าของจำนวนแบคทีเรียเริ่มต้น ดังนั้นถ้าปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นมี 10^6 เมื่อผ่านกระบวนการ 12D เหลือจำนวนจุลินทรีย์สุดท้ายเป็น 10^{-6} (หรือ 1 ตัวในล้านกระป๋อง) ในทางทฤษฎี เราไม่สามารถทำลายแบคทีเรียให้เหลือศูนย์ได้เลย ที่เราทำได้ก็เพียงทำลายให้มันเหลือจำนวนใกล้ศูนย์มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้

ในการกำหนดค่า F_0 ที่เหมาะสมนั้น สามารถคำนวณได้ดังนี้ เช่น เมื่อเราต้องการผ่านกระบวนการ 12D เพื่อให้รอดพ้นจากการเสื่อมเสียของอาหารจาก C. botulinum ซึ่งมีค่า D เท่ากับ 0.5 (จากตารางภาคผนวก1) ดังนั้นค่า F_0 ที่เหมาะสมเท่ากับ $12\times0.5 = 6$ นาที

ค่า F_0 เป็นค่าที่สำคัญมาก มักเรียกว่า Process Lethality ในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบกระบวนการให้ความร้อนที่แตกต่างกัน เราอาจแสดงค่า F_0 หรือค่า Lethality (L) ที่อุณหภูมิอื่น ซึ่งค่านี้สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$L = 10^{(T-T_{ref})/Z} \qquad (1)$$

ค่า Lethal Rate คือค่า F_0ต่อนาที ดังนั้นเราสามารถเปลี่ยน 1 นาทีที่อุณหภูมิอื่นมาเทียบเท่ากับ F_0 โดยคำจำกัดความแล้ว $F_0 = 1$ เมื่อ T = 250 °F ซึ่งทดสอบได้โดยการแทนค่าในสูตร (1) lethal rate มีประโยชน์ในการเปลี่ยนเวลาในการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิต่าง ๆ ให้เป็นเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อที่ 250 °F ซึ่งเป็นพื้นฐานในการหาเวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อโดยวิธี General Method

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงค่า Lethal Rate ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°F)	อุณหภูมิ (°C)	Lethal Rate (F_0/นาที)
212	100	0.008
221	105	0.024
230	110	0.077
239	115	0.246
248	120	0.774
250	121.1	1.000
257	125	2.45
260	127	3.60

จากตารางที่ 1 นี้เห็นได้ชัดว่า อัตราการตายเพิ่มขึ้นอย่างเร็วที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างที่ 260 °F แต่ละนาทีที่ให้ความร้อนจะมีค่าเท่ากับ 3.6 นาทีที่ 250 °F และแต่ละนาทีที่ 212 °F จะมีค่าเท่ากับ 0.008 นาทีที่ 250 °F นั่นก็คือที่อุณหภูมิน้ำเดือด (212 °F) จะต้องใช้เวลา 1/0.008 นาที เท่ากับ 125 นาที เพื่อให้มี Lethality (ผลในการฆ่า) เท่ากับ 1 นาทีที่ 250 °F ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 200 °F ไม่มีผลในการฆ่า

ในระหว่างขั้นตอนการทำลายจุลินทรีย์ในอาหารบรรจุกระป๋อง อุณหภูมิภายในกระป๋องซึ่งนิยมวัดจากจุดที่เย็นที่สุดจะมีการเปลี่ยนไป ตั้งแต่เริ่มให้ความร้อนจนกระทั่งการทำให้เย็นลงรวมเรียกว่า Thermal Process Cycle ซึ่งเราสามารถวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่เพิ่มขึ้นจากนั้นนำมาคำนวนหาค่า F_0 ของ Process ได้โดยใช้สูตร

$$F_0 = \int_0^t L_t dt \qquad (2)$$

เมื่อ L_t คือ Lethality ที่เวลาต่าง ๆ

T คือ อุณหภูมิที่จุดที่ร้อนช้าที่สุดในภาชนะบรรจุ

T_{ref} คือ Reference Temperature (250 °F)

t คือ เวลา (s)

F_0 คือ Process Lethality

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน (Thermal Process Calculation)

กระบวนการให้ความร้อนในการฆ่าเชื้อขึ้นกับข้อมูลการแทรกผ่านความร้อนในอาหาร (Heat penetration data) ซึ่งเมื่อนำมาเชื่อมโยงโดยทางคณิตศาสตร์กับข้อมูลความทนทานต่อความร้อนของจุลินทรีย์ (Thermal death time data) จะให้เวลาในการฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิจำเพาะหนึ่ง ๆ วิธีการที่ใช้มักเรียกกันว่า "Process calculation methods"

วิธีที่นิยมใช้มี 2 วิธี คือ

1. General หรือ Graphical method
2. Formula method

1.) General method หรือ Graphical method

เป็นการหาค่า Lethality ของกระบวนการฆ่าเชื้อที่สภาวะหนึ่ง ๆ ทำได้ หลายวิธีโดยมีหลักการเดียวกัน คือ วัดอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าที่สุดของอาหารในกระป๋องที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาที่ฆ่าเชื้อ ตลอดช่วงเวลาการให้ความร้อนและช่วงต้นของการทำให้เย็น นั่นคือ จนอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าลดลงมาถึง 200 $^{\circ}$F (เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200 $^{\circ}$F จะไม่มีผลในการฆ่าเชื้อ) โดยปกติมักวัดทุก ๆ 1 นาที แล้วนำค่าอุณหภูมิที่วัดได้มาคำนวณจากสูตรในสมการที่ 1

จากข้อมูลของ Lethal Rate กับเวลาที่ได้นำมาจัดเป็นตาราง หรือเขียนเป็นกราฟ (Lethal Rate Curve) เพื่อหาค่า F_0 ได้ตามวิธีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1.1) Rectangular Method

<u>หลักการ</u>

เป็นการคำนวณหาเวลาในการฆ่าเชื้อแบบ General Method วิธีหนึ่ง โดยบวกรวมค่า Lethality ที่ได้เข้าด้วยกันทั้งช่วงการให้ความร้อนและ การทำเย็นเป็นค่า total lethality หรือ F_0 ของ Process นับเป็นวิธีง่าย ๆ ในการหา ค่า F_0 โดยคิดว่าในช่วงเวลาการวัดอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ที่เลือกใช้ อุณหภูมิในช่วงเวลานั้นจะเท่ากันตลอด ส่วนในช่วงที่อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ยังร้อนไม่ถึง 200 $^{\circ}$F และช่วงที่เย็นลงต่ำกว่า 200 $^{\circ}$F มาไม่มีค่า lethal rate เนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 200 $^{\circ}$F ไม่มีผลในการฆ่าเชื้อ

<u>หมายเหตุ</u> ในกรณีที่ใช้ช่วงเวลาในการบันทึกอุณหภูมินานกว่า 1 นาที เช่น 2 นาที ในการคิด lethality ต้องนำ 2 ไปคูณกับค่า lethal rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 ตัวอย่างข้อมูล heat penetration และการหาค่า F_0 โดย Rectangular Method

Z = 18 °F reference temperature = 250 °F

Time (min)	Temperature °F	Lethal rate	Lethality (min)
0	80.0	0.0	0.0
1	242.8	0.4	0.4
2	248.3	0.8	0.8
3	250.0	1.0	1.0
4	250.0	1.0	1.0
5	250.0	-	-
6	248.3	0.8	0.8
7	242.8	0.4	0.4

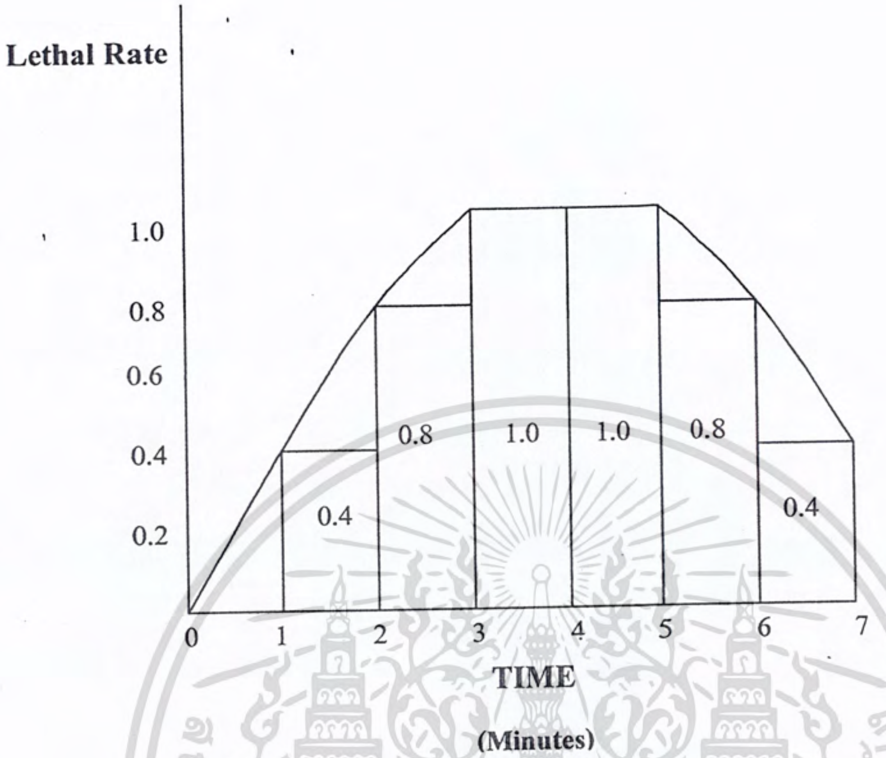
Total lethality = 4.4

ในตารางที่ 2 สองคอลัมน์แรกเป็นข้อมูลเวลา และอุณหภูมิที่ได้จาก heat penetration measurements ซึ่งเป็นการวัดอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าที่สุดทุก ๆ ช่วงเวลา 1 นาที คอลัมน์ที่สามเป็นค่า lethal rate หรือ L value ซึ่งคำนวณจากสูตรหรือเปิดจากตารางซึ่งจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าที่สุด คอลัมน์สุดท้าย คือ ค่า lethality ซึ่งได้จาก

$$\text{lethality (min)} = \text{lethal rate} \times \text{time (min)} \quad (3)$$

ค่า F_0 ของ Process ได้จากการรวมค่า lethality ทั้งหมดเข้าด้วยกัน ยกเว้นค่าที่ได้จากการให้ความร้อนสุดท้ายไม่ให้นำเข้ามารวมด้วย ในตารางที่ 2 คือ ค่า lethal rate ที่เวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 แสดงการหาค่า F_0 โดย General Method – Rectangular Method

จากรูปที่ 1 สามารถคำนวณหาค่า F_0 โดยเอาพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าเล็กทั้งหมด ภายในรูปกราฟที่ได้จากการ plot ค่า lethal rate กับเวลา มารวมเข้าด้วยกัน

$$F_0 = 0.4 + 0.8 + 1.0 + 1.0 + 0.8 + 0.4 = 4.4 \text{ นาที}$$

ในการคำนวณค่า F_0 ให้ใช้เฉพาะสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีเนื้อที่อยู่ภายในกราฟเท่านั้น ห้ามใช้ค่าอุณหภูมิในการให้ความร้อนสุดท้ายมาคำนวณ (จากตารางและจากรูปกราฟ ค่านี้คือ ค่าอุณหภูมิที่เวลา 5 นาที) เนื่องจากค่านี้จะไปสร้างรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีส่วนยื่นออกไปนอกรูปกราฟ

วิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ค่าน้อยกว่าความเป็นจริง (conservative) เนื่องจากมีส่วนเล็ก ๆ หลายส่วนของ lethality ที่อยู่ใน heat penetration data ที่ไม่ได้ถูกนำมารวมด้วยวิธีนี้

1.2) Trapezoidal Method หรือ Even Time Intervals (Patashnik)

จะเห็นว่าในวิธี Rectangular Method ค่า F_0 ที่คำนวณได้จะน้อยกว่าที่ควรเป็น (ค่าที่ควรเป็นคือ พื้นที่ใต้ Curve ทั้งหมด) ดังนั้น Patashnik จึงได้คิดสูตรขึ้นมาโดยพยายามให้ครอบคลุมพื้นที่ใต้

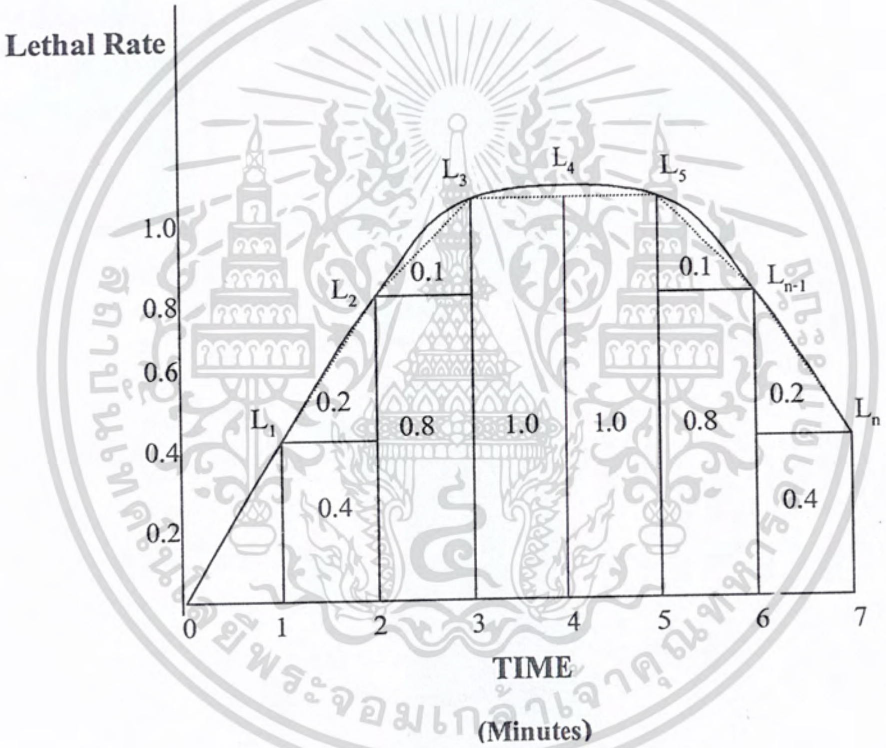
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Curve ให้มากที่สุด วิธีนี้การบันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลาจะต้องบันทึกข้อมูลทุกช่วงเวลาที่เท่ากันตลอด เช่น ทุก ๆ 1 นาที ทุก ๆ ครึ่งนาที หรือทุก ๆ 2 นาที เป็นต้น

สูตร $$F = t\left[\frac{(L_1+L_2)}{2} + \frac{(L_2+L_3)}{2} + \ldots\ldots\ldots + \frac{(L_{n-1}+L_n)}{2}\right] \quad (4)$$

เมื่อ t คือ ช่วงห่างของเวลา (Time interval) เป็นนาที

L คือ ค่า Lethal Rate ของแต่ละอุณหภูมิที่เวลานั้น ๆ



รูปที่ 2 แสดงการหาค่า F_0 ด้วย Trapezoidal Method-Even Time Intervals.

<u>ที่มาของสูตร</u> ในกรณีที่ไม่ต้องการจำสูตร เราสามารถคำนวณหาจากรูปสี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปแล้วนำมารวมกัน

จากรูป F_0 = 1.0 [{(0.4+0.8)/2} + {(0.8+1.0)/2} + {(1.0+1.0)/2} + {(1.0+1.0)/2} + {(1.0+0.8)/2} + {(0.8+0.4)/2}]

= 5.0 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีนี้ให้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำกว่า Rectangular method เพราะว่าได้มีการนำค่า lethality ที่ไม่ได้คิดรวมไว้ใน Rectangular method มาเพิ่มเข้าไว้

1.3) Trapezoidal Method – Uneven Time Intervals

ถ้าข้อมูลเวลาและอุณหภูมิที่จุดร้อนช้าที่สุดที่ได้มาเป็นการบันทึกในช่วงเวลาที่ไม่เท่ากัน วิธีการก็จะซับซ้อนขึ้น จึงเลือกใช้สูตรที่สามารถใช้ได้ทั้งกับ Even และ Uneven time intervals นั่นก็คือ

$$A = \frac{(t_2-t_1)(L_2-L_1)}{2} + L_1(t_2 - t_1) \quad (5)$$

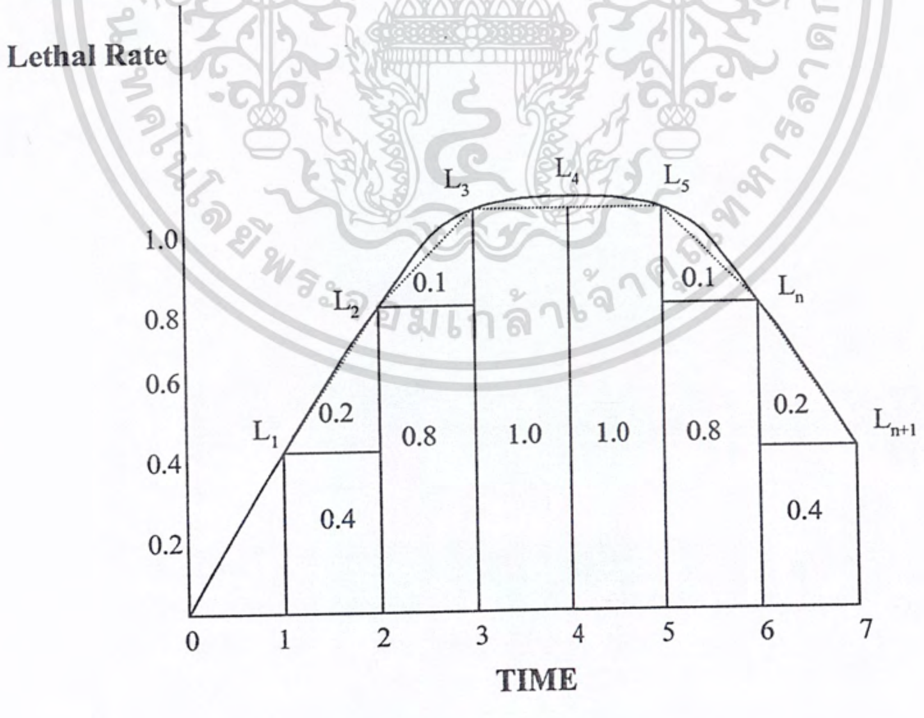
$$B = \frac{(t_3-t_2)(L_3-L_2)}{2} + L_2(t_3 - t_2) \quad (6)$$

$$H = \frac{(t_{n+1}-t_n)(L_{n+1}-L_n)}{2} + L_n(t_{n+1} - t_n) \quad (7)$$

โดย $F_0 = A+B+\ldots+H$ (8)

t = time (min)

L = Lethal rate



รูปที่ 3 แสดงการหาค่า F_0 ด้วย Trapezoidal Method-Uneven Time Intervals.

Total F_0 Value = 5.0 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>ที่มาของสูตร</u> - เป็นการรวมพื้นที่สามเหลี่ยม และสี่เหลี่ยมผืนผ้าเข้าด้วยกันในแต่ละช่วงเวลา โดยส่วนแรกของสูตรเป็นพื้นที่สามเหลี่ยม และส่วนหลังของสูตรเป็นพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า

- เช่นเดียวกับ Even Time Intervals เราสามารถใช้สูตรหาพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูแต่ละรูปแล้วนำมารวมกัน โดยไม่ต้องจำสูตรก็ได้

วิธีนี้เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมี flexibility มากที่สุด ในการใช้ทั้ง Even และ Uneven Time Intervals

1.4) Trapezoidal Integration

เป็นวิธีทางคณิตศาสตร์ง่าย ๆ เพื่อใช้คำนวณหาพื้นที่ใต้ Curve วิธีนี้มีประโยชน์ใช้ในการหาค่า F_0 โดยไม่จำเป็นต้องเขียนกราฟระหว่างค่า lethal rate กับ เวลา ซึ่งถ้าทำด้วยความระมัดระวังจะให้ค่า F_0 ที่ดี

กฎของ Trapezoidal Integration กล่าวไว้ว่า “เพื่อหาพื้นที่ใต้ Curve ให้แบ่งฐาน (เวลา) ออกเป็นส่วน ๆ เท่า ๆ กัน จำนวนเท่าใดก็ได้และลากเส้นตรงตั้งฉากจากฐานขึ้นไปพบกับเส้น Curve และแบ่งครึ่งส่วนแรกและส่วนสุดท้ายของเส้นตั้งฉากนั้นนำไปรวมกับผลบวกของเส้นที่เหลือ แล้วคูณผลรวมที่ได้ด้วยระยะห่างที่แบ่งฐานออกเท่า ๆ กัน จะได้พื้นที่”

ตารางที่ 3 แสดงการหาค่า F_0 โดยวิธี Trapezoidal Integration

Time (min)	Temperature (°F)	Lethal Rate	Lethality	Accumulated Lethality
0	80.0	0.0	0.0	0.0
1	242.8	0.4	0.4	0.4
2	248.3	0.8	0.8	1.2
3	250.0	1	1	2.2
4	250.0	1	1	3.2
5	250.0	1	1	4.2
6	248.3	0.8	0.8	5.0
7	242.8	0.4	0.2	5.2
				F_0 = 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3 เป็นการแสดงนำ Trapezoidal Integration Method มาใช้ในสองคอลัมน์แรกเป็นข้อมูลเวลา และอุณหภูมิที่ได้จากการทำ Heat Penetration Test คอลัมน์ที่สามเป็นค่า Lethal rate ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ค่าของ Process หาได้โดยนำค่า Lethal rate ที่เวลา 0 นาที (ค่าแรก) และ 7 นาที (ค่าสุดท้าย) ซึ่งคือ 0 และ 0.4 รวมกันแล้วหารด้วย 2 นำค่าที่ได้ (0.2) ไปรวมกับค่า Lethal rate ทั้งหมดของทุกช่วงเวลา 1 นาที ที่เหลือตั้งแต่เวลา 1 นาทีถึง 6 นาที ได้ค่าเป็น 5.2 ซึ่งเมื่อคูณกับ 1 (time interval) ได้เป็น 5.2 นาที ดังนั้น ค่า F_0 = 5.2 นาที

ข้อดีของวิธี General Method

- ให้ค่าอ้างอิงเมื่อทำการวิเคราะห์ heat penetration data สำหรับข้อมูลกลุ่มเดียวกัน ค่า F ที่คำนวณได้โดยวิธี Formula method จะไม่มีทางให้ค่าสูงกว่าค่าที่คำนวณได้โดยวิธี General method
- สามารถใช้ General method เพื่อลด process time (เวลาที่ใช้ในการฆ่าเชื้อ) โดยการรวมเอาค่า lethality ที่ไม่ได้คิดรวมไว้ในวิธี formula method มาบวกเพิ่ม นั่นคือ คิดช่วง Come-up time ทั้งหมดที่มีผลในการฆ่าเชื้อ คิดในช่วงทำเย็นทั้งหมดที่ให้ผลในการฆ่าเชื้อ
- อาจนำมาใช้ในสถานการณ์ (unique situations) ซึ่งไม่สามารถใช้ Formula method ได้

ข้อเสียของวิธี General Method

- Process ที่ตั้งไว้สำหรับสภาวะหนึ่งจำกัดใช้ได้เพียงสภาวะนั้น ๆ เท่านั้น
- จำเป็นต้องมี critical factors (ปัจจัยวิกฤต) เข้ามาร่วมด้วยทำให้เพิ่มความซับซ้อนของ process มากขึ้น

2.) Formula method

Formula method เป็นวิธีใช้หา Process time (B_B) ที่ภาวะอุณหภูมิของ Retort (RT) และอุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารกระป๋อง (IT) การหาระยะเวลาในการฆ่าเชื้อวิธีนี้จะอาศัยการคำนวณ โดยข้อมูลที่ได้ จะถูกนำมาพลอตบนกระดาษ semilogarithmic โดยเริ่มต้นตั้งแต่เวลาที่เปิดไอน้ำเป็นต้นไปจนสิ้นสุดการทำให้เย็น เวลาที่อุณหภูมิของ Retort ขึ้นถึงอุณหภูมิที่ต้องการจะเรียกว่า "Come-up Time"

แรกเริ่มพัฒนามาใช้โดย C.O. Ball ในปี 1923 และเป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างมาก ต่อมาได้มีการปรับปรุงดัดแปลงวิธีการของ Ball โดย Stumbo และ Hayakawa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1) การเขียน Heat Penetration Curve

จะเป็นการพลอตข้อมูลบนกระดาษ 3-Cycle semilogarithmic โดยพลอตข้อมูลอุณหภูมิบนสเกล logarithmic และเวลาบนสเกลปกติ หลักการของวิธี คือ การหา Heating Curve จากสมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ คือ

$$\log(RT - CT) = -t/f_h + \log(j(RT - IT)) \quad (9)$$

เมื่อ CT คือ อุณหภูมิภายในกระป๋องที่จุดที่ร้อนช้าที่สุด (°F)

RT คือ อุณหภูมิของหม้อฆ่าเชื้อ (°F)

IT คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารกระป๋อง (°F)

เมื่อพลอตระหว่าง log (RT – CT) กับเวลา จะได้กราฟเส้นตรงที่มี slope เท่ากับ $-t/f_h$ ซึ่งก็คือเวลาที่ Heating Curve เปลี่ยนไป 1 log cycle หรือ 90 % นั่นเอง

สำหรับการพลอตกราฟ เราสามารถพลอตค่า CT โดยตรงได้ โดยกลับหัวท้ายของกระดาษกราฟ 180 องศา และให้กำหนดค่าบนบรรทัดบนสุดของ cycle บนสุดด้วยค่า (RT – 1) และบรรทัดแรกสุดของ cycle ถัดลงมาเป็น (RT – 10) และ (RT – 100) ตามลำดับ แล้วพลอตอุณหภูมิบนสเกล logarithmic นี้ ส่วนเวลาจะเริ่มจากซ้ายไปขวาคือตั้งแต่เริ่มทำการเปิดไอน้ำจนกระทั่งสิ้นสุดการให้ความร้อน ลากเส้นตรงผ่านข้อมูลที่มีอุณหภูมิตั้งแต่ 212 °F เป็นต้นไป ซึ่งจะพบว่าในช่วงแรกอุณหภูมิจะเพิ่มอย่างช้า ๆ ช่วงนี้คือ “lag” (j)ที่อาหารที่ cold point มีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ lag นี้จะมากหรือน้อยขึ้นกับลักษณะการถ่ายโอนความร้อน ถ้าถ่ายโอนได้ช้า เช่น ในการนำความร้อน เราจะพบว่าส่วนโค้งนี้จะกว้างและกางออก ถ้าอาหารสามารถถ่ายโอนความร้อน ได้เร็วแบบการพาความร้อน ส่วนที่เป็นเส้นโค้งจะสั้น Heating Curve ที่มีส่วนที่เป็นเส้นตรงเส้นเดียวนี้เรียกว่า “simple heating curve”

ในบางกรณีเราจะพบว่าอาหารนั้นมี Heating Curve ส่วนที่เป็นเส้นตรงมากกว่า 1 เส้น ซึ่งจะเรียกว่า “broken heating curve” ตัวอย่างอาหารแบบนี้ เช่นอาหารที่มีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนแบบผสม (Complex Heating)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2) คำจำกัดความของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

1.) ค่า f_h และ f_c หมายถึง เวลาที่ต้องการสำหรับส่วนของกราฟที่เป็นเส้นตรงของ Heating Curve และ Cooling curve เปลี่ยนไป 1 log cycle หรือ 90% โดยค่า f_h และ f_c นี้จะบอกถึงความเร็วในการเพิ่มหรือลดของอุณหภูมิที่จุด cold point ตัวอย่างเช่น กระป๋อง 2 กระป๋องซึ่งมีขนาดต่างกันภายในบรรจุวัสดุชนิดเดียวกัน ค่า f_h ของกระป๋องขนาดเล็กจะมีค่าน้อยกว่าค่า f_h ของกระป๋องขนาดใหญ่ หมายถึง การถ่ายเทความร้อนไปยังจุด cold point ของกระป๋องขนาดเล็กจะดีกว่ากระป๋องขนาดใหญ่ ในกรณีที่ไม่ได้สร้าง Cooling curve อาจประมาณค่า $f_c = f_h$

2.) ค่า I'T' หมายถึง pseudo – initial temperature ซึ่งหมายถึงจุดตัดของส่วนที่เป็นเส้นตรงกับแกนอุณหภูมิที่เวลา corrected zero

3.) IT คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของกระป๋อง

4.) ค่า j_h และ j_c คือ lag factor สำหรับ Heating curve และ Cooling curve เป็น lag time ก่อนที่ผลต่างของ (RT – CT) จะเป็นเส้นตรงคำนวณจาก

$$j = (RT - I'T')/(RT - IT) \qquad (10)$$

j = 1 จะมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบการพาความร้อน (Pure Convection)

j = 2 จะมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบการนำความร้อน (Pure Conduction)

j มีค่าอยู่ระหว่าง 1-2 จะมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนเป็นแบบผสมระหว่างการพาความร้อนและการนำความร้อน

โดยค่า j_h และ j_c จะบอกถึงลักษณะการถ่ายโอนความร้อน

5.) CZ (corrected zero) คือ เวลาที่เริ่มต้น process ที่แก้ไขแล้ว จะคิดจาก 60% ของ come-up time (CUT)

6.) Thermal diffusivity คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อน ($\propto$) มีหน่วยเป็น (m^2/s) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\propto_h = 0.398/((1/R^2) + (0.427/H^2))\, f_h \qquad (11)$$

$$\propto_c = 0.398/((1/R^2) + (0.427/H^2))\, f_c \qquad (12)$$

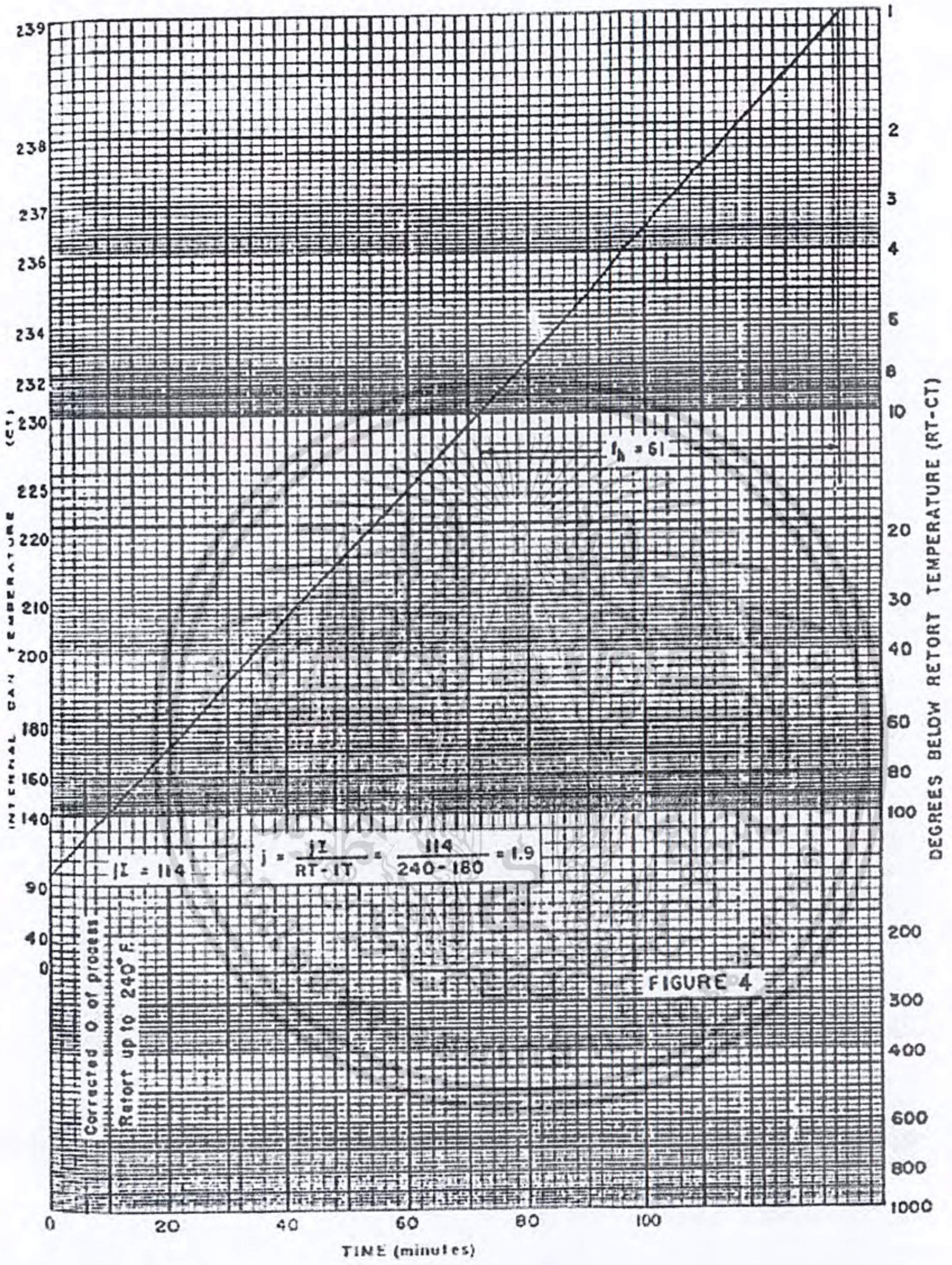
เมื่อ $\propto_h$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนในช่วงของการให้ความร้อน (m^2/s)

$\propto_c$ คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนในช่วงของการ Cooling (m^2/s)

R คือ รัศมีของกระป๋อง (m)

H คือ ความสูงของกระป๋อง (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 แสดงการอ่านค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง ในการทดลองเก็บข้อมูลทาง Heat penetration ของอาหารในกระป๋องขนาด 303×406 อุณหภูมิเริ่มต้นของอาหารเท่ากับ 180 องศาฟาเรนไฮต์ อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อเท่ากับ 240 องศาฟาเรนไฮต์ CUT เท่ากับ 10 นาที

$$CZ = 0.6\times10 = 6 \text{ นาที}$$

จากรูปที่ 4 อ่านค่าที่ CZ = 6 นาที ได้ I'T' = 126

$$j = (RT-I'T')/(RT-IT) = 114/(240-180) = 1.9$$

$$f_h = 61$$

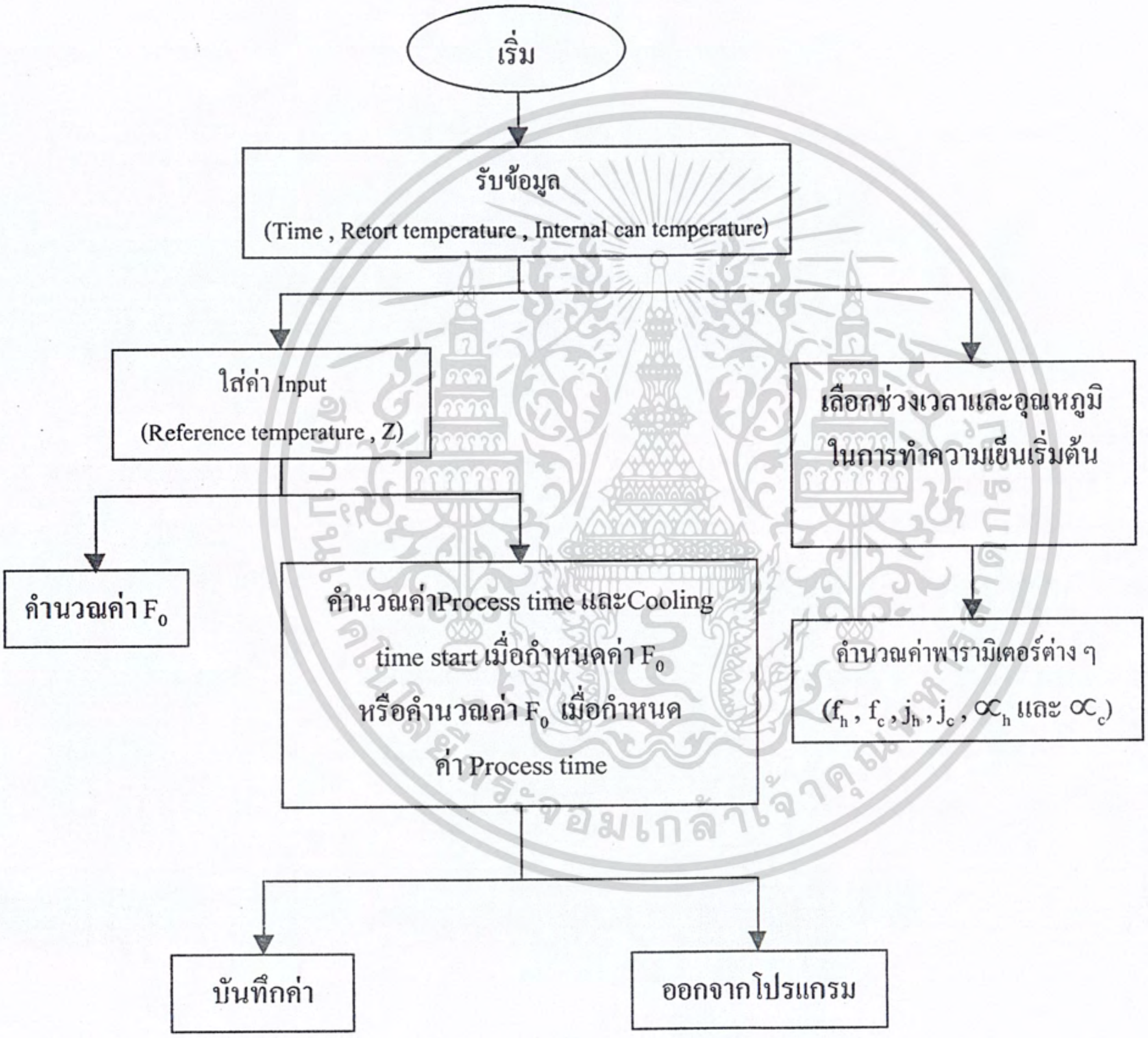
วิธี Formula method นี้มีข้อดี คือ สามารถใช้ประมาณค่า หรือ B_B หรือ F_0 ได้ในกรณีที่มีการเปลี่ยนค่า RT และ IT แต่มีข้อเสียคือจะต้องอยู่ภายใต้สมมุติฐานของ Ball Formula method ซึ่งเป็นข้อจำกัดของวิธีนี้ ได้แก่

- Come-up time (CUT) สม่ำเสมอ นั่นคือ อุณหภูมิควรจะเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ
- อุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อคงที่
- น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิคงที่
- j_c มีค่าเท่ากับ 1.41
- อุณหภูมิน้ำเย็นที่ใช้ควรจะเป็น 180 °F ต่ำกว่า RT สำหรับกระป๋อง และ 130 °F ต่ำกว่า RT สำหรับขวดแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การคำนวณและการสร้างโปรแกรม

แผนผังการทำงานรวมของโปรแกรม

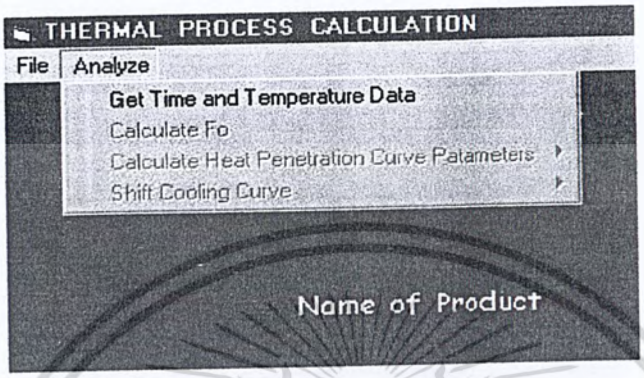


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำงานของโปรแกรม

ประกอบด้วยเมนูหลัก 2 เมนู คือ File และ Analyze ในเมนู Analyze ยังแบ่งออกเป็นเมนูย่อยอีกดังนี้



รูปที่ 5 แสดงเมนูหลักของโปรแกรม

จากรูปที่ 5 เป็นเมนูที่ใช้คำนวณและออกแบบการทำเย็น (Cooling) ซึ่งเป็นเมนูหลักที่ใช้ปฏิบัติการในโปรแกรม ประกอบด้วยเมนูย่อย 4 เมนู คือ

1. Get Time , Temperature Data มีหน้าที่รับข้อมูลประกอบด้วยชนิดของผลิตภัณฑ์อาหาร , ขนาดกระป๋อง รวมทั้งเวลา , อุณหภูมิอาหารกระป๋องที่จุดร้อนช้าที่สุด , อุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อจาก Text file เพื่อเก็บค่าไว้และแสดงค่าข้อมูลลงในตารางข้อมูลซึ่งนำไปใช้ในการวิเคราะห์
2. Calculate Fo ใช้คำนวณหาค่า Fo จากชุดข้อมูลที่รับค่ามา , ค่าอุณหภูมิอ้างอิง และ ค่า Z ของเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งได้มาจากการป้อนค่า
3. Calculate Heat penetration curve parameter คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น f_h , j_h , f_c , j_c , α_h และ α_c
4. Shift Cooling Curve ใช้ในการคำนวณหา

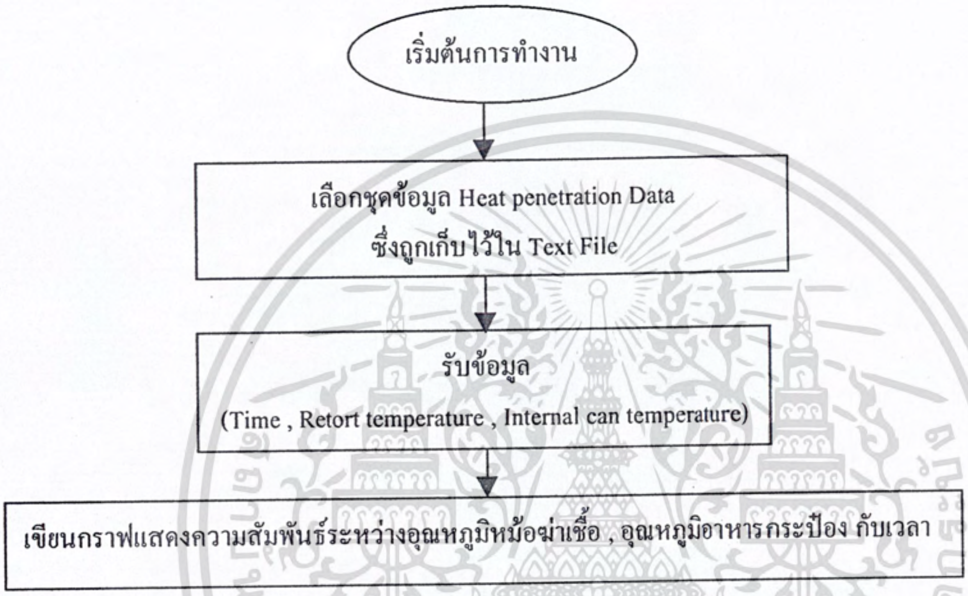
- การใช้โปรแกรมเพื่อหาค่า F_0 เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า Cooling time
- การคำนวณหาค่าเวลาในการฆ่าเชื้อ(F_0) เมื่อกำหนดค่าเวลาในการทำความเย็น (Cooling time)
- การคำนวณหาค่า Process time กับ Cooling time เมื่อกำหนดค่า F_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

42322

3.1 การรับข้อมูล (Get Time and Temperature Data)

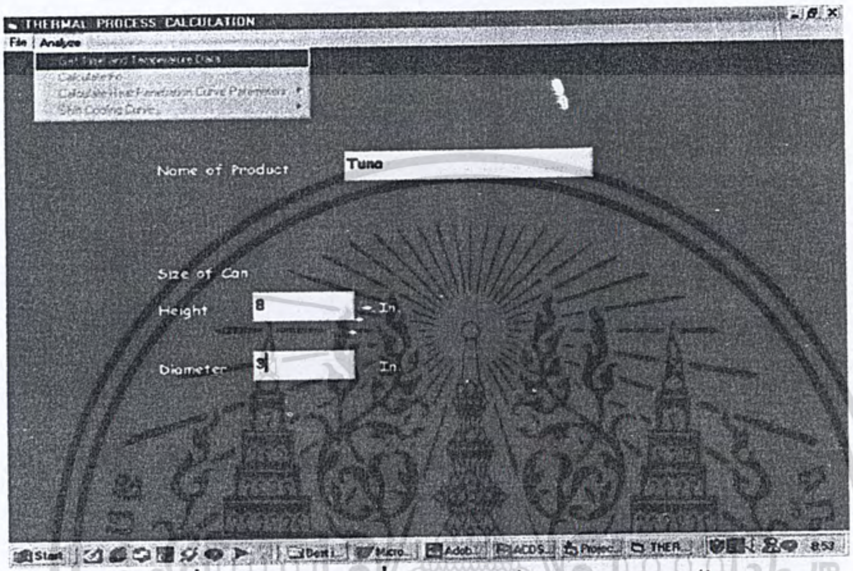
แผนผังการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

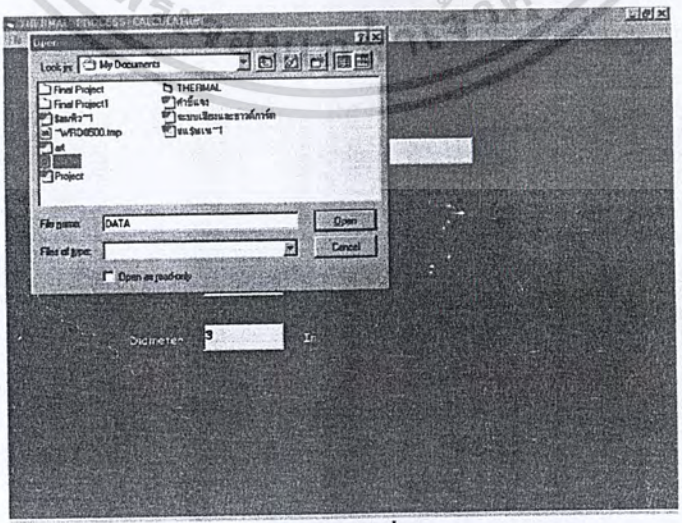
ขั้นตอนการทำงาน

เมื่อผู้เข้าสู่โปรแกรม จะปรากฏหน้าจอย่อยให้ผู้ใช้ใส่ชื่อของผลิตภัณฑ์ , ขนาดของกระป๋อง ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการรับชื่อผลิตภัณฑ์ และ ขนาดกระป๋อง

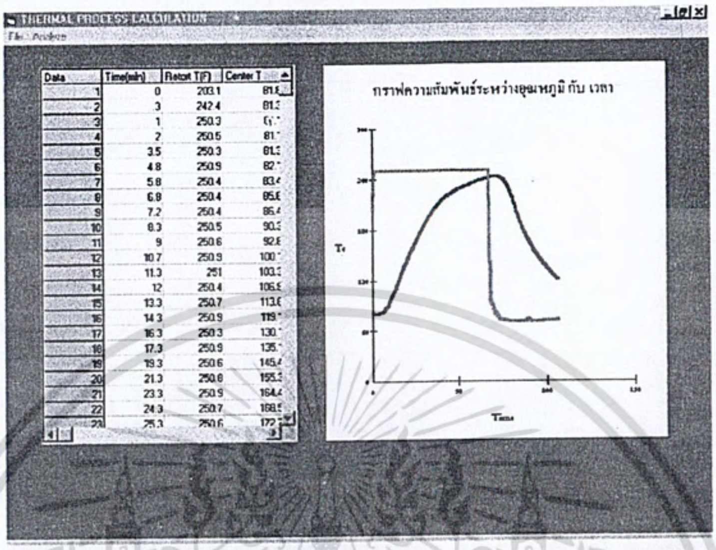
เมื่อผู้ใช้เลือกไปที่เมนูย่อย Get Time , Temperature Data โปรแกรมจะเรียกให้ผู้ใช้ใส่ข้อมูลเวลา , อุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อและอุณหภูมิอาหารกระป๋องที่ได้จากการทดลองซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกเก็บไว้ใน Text file ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงการเลือกข้อมูลซึ่งถูกเก็บไว้ใน Text file

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมจะทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อและอุณหภูมิอาหารกระป๋อง กับ เวลา รวมทั้งแสดงค่าไว้ในตารางดังรูปที่ 8

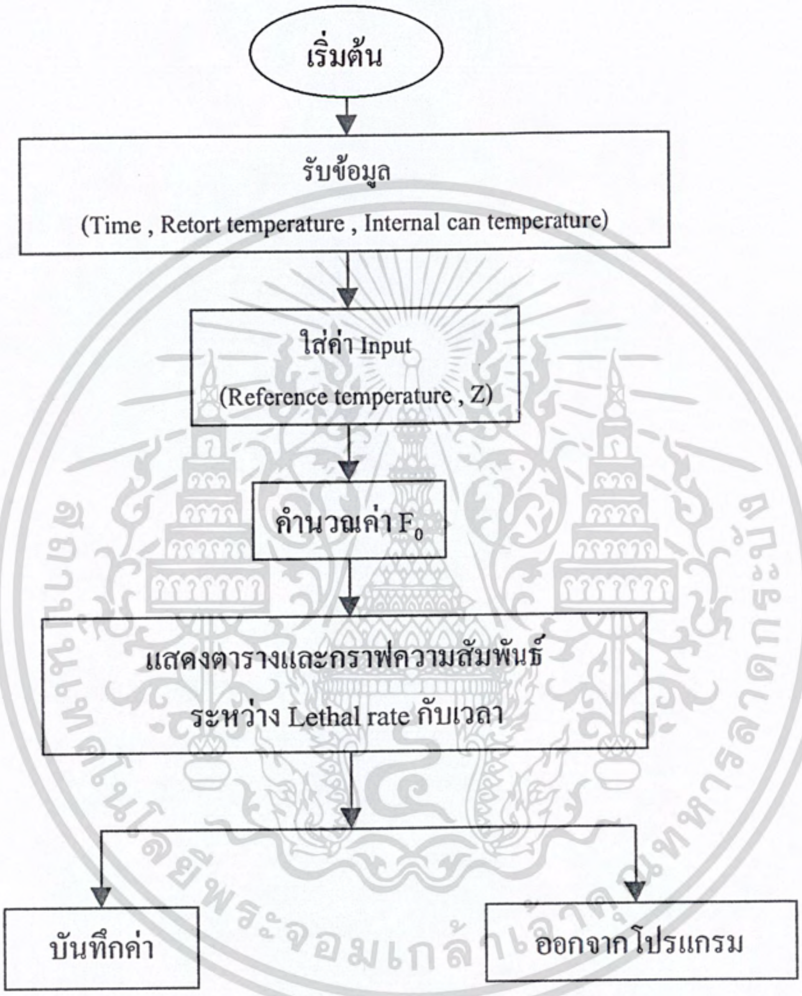


รูปที่ 8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อและอุณหภูมิอาหารกระป๋อง กับ เวลา และตารางแสดงข้อมูลดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การคำนวณหาค่า Fo (Calculate Fo)

แผนผังการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทำงาน

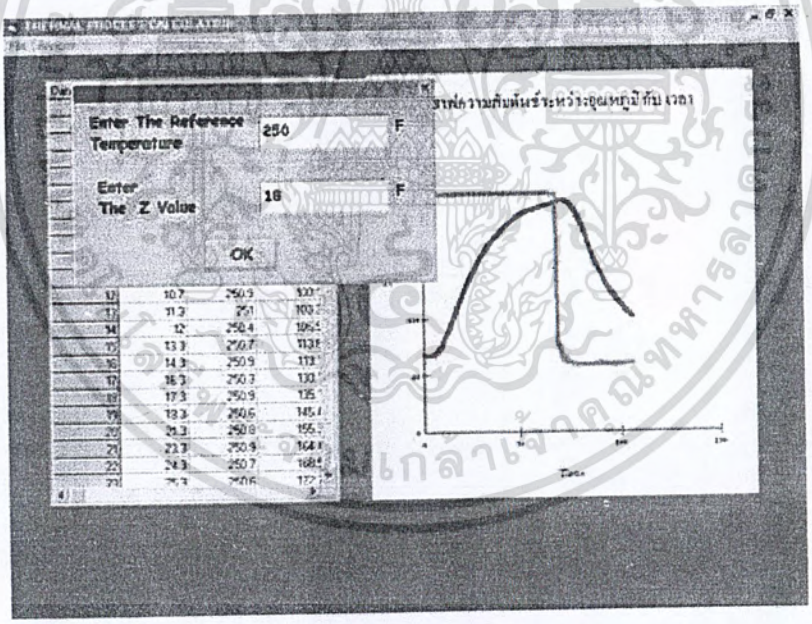
เมื่อผู้ใช้เลือกเมนู Analyze แล้วไปที่เมนูย่อย calculate Fo จะปรากฏหน้าจอย่อยให้ผู้ใช้ใส่ค่า Z ของจุลินทรีย์และ อุณหภูมิอ้างอิง แล้วกดปุ่ม OK โปรแกรมจะคำนวณค่าดังสมการ

$$\text{Lethal rate} = 10^{(T-Tref)/z}$$

$$\text{Lethality} = {}_{t}10^{(T-Tref)/z}\Delta T$$

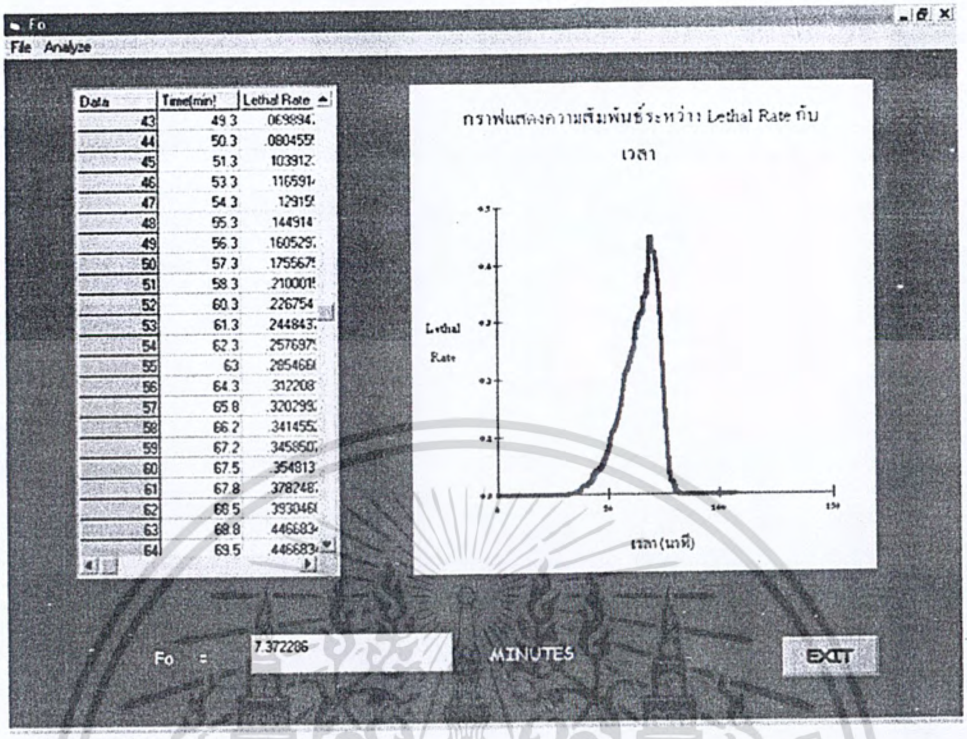
$$\text{Total Lethality} = \int_{o} 10^{(T-Tref)/z}$$

แล้วแสดงค่าที่คำนวณได้ในตาราง พร้อมทั้งทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Lethal rate กับ เวลา รวมทั้งคำนวณค่า Total Lethality (Fo) เช่น ค่า Z = 18 °F , อุณหภูมิอ้างอิง = 250°F ดังแสดงในรูปที่ 9 และรูปที่ 10



รูปที่ 9 แสดงการกำหนดค่า Z และ Reference temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



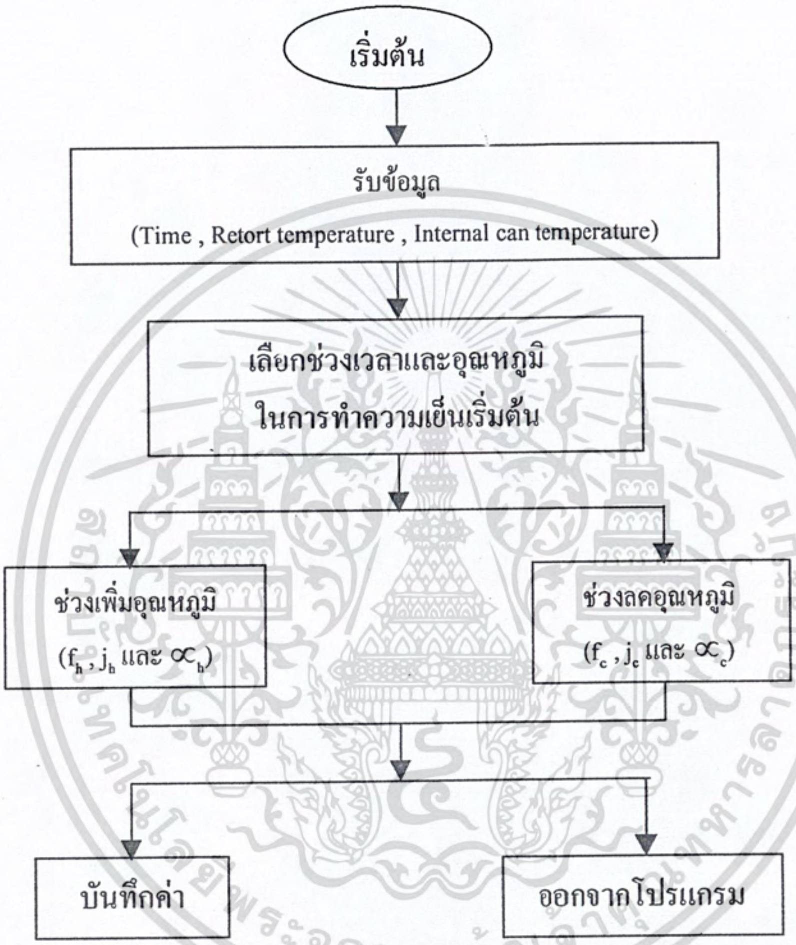
รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Lethal rate กับเวลา และค่า F_0 ที่คำนวณได้

จากรูปที่ 10 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Lethal rate กับเวลา และอ่านค่า F_0 ได้ = 7.372286 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ (Calculate Heat penetration curve parameter)

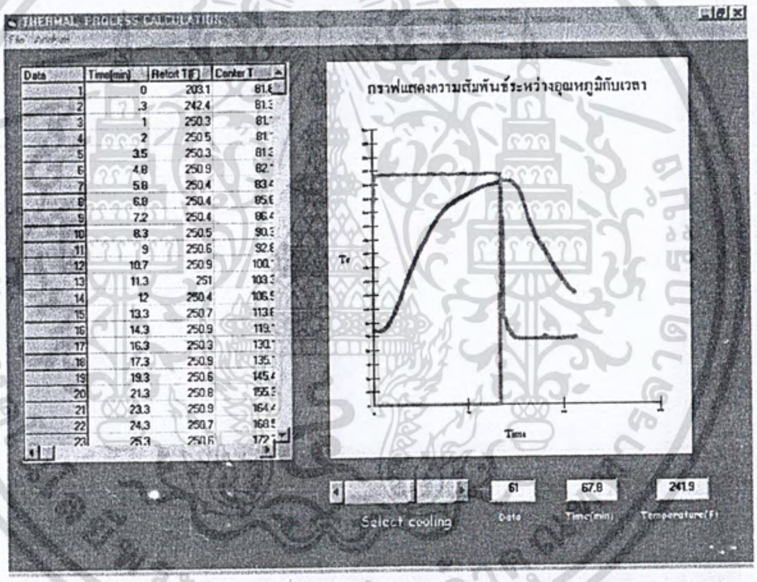
แผนผังการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทำงาน

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูไปที่ Analyze แล้วไปที่เมนูย่อย Calculate Heat penetration curve parameters และ Select Cooling Time Start ตามลำดับ โปรแกรมจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิภายในกระป๋องที่จุดที่ร้อนช้าที่สุด และอุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อ รวมทั้งแสดงค่าในตาราง แล้วให้ผู้ใช้เลือกเวลาที่เริ่มต้นในการทำความเย็น (Cooling) ได้โดยเลื่อน Hscroll bar ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ เช่น ชุดข้อมูลที่ 61 , เวลา 67.8 นาที , อุณหภูมิอาหารกระป๋อง 241.9 °F ซึ่งโปรแกรมจะทำการแบ่งชุดข้อมูลเป็นช่วงของการเพิ่มและลดอุณหภูมิเพื่อใช้ในการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ (f_h , f_c , j_h , j_c , α_h และα_c) ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 11

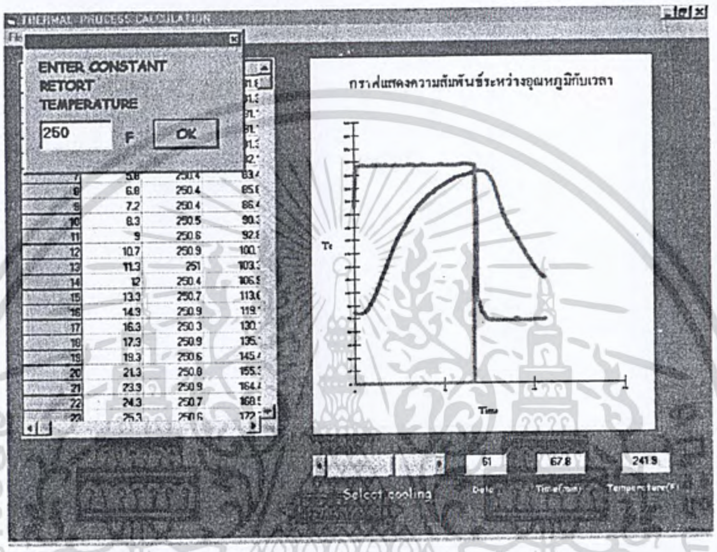


รูปที่ 11 Select cooling time start

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า f_h , j_h และ $\propto_h$

ผู้ใช้จะต้องไปเลือกเมนูที่ Analyze แล้วไปที่เมนูย่อย Calculate Heat penetration curve parameter และ Fh_Jh_Alpha ตามลำดับ จะปรากฏหน้าจอย่อยเพื่อให้ผู้ใช้ใส่ค่าอุณหภูมิคงที่ของหม้อฆ่าเชื้อ (ENTER CONSTANT RETORT TEMPERATURE) เช่น 250 °F ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงการกำหนดอุณหภูมิคงที่ของหม้อฆ่าเชื้อ

เมื่อกดปุ่ม OK โปรแกรมจะทำการคำนวณค่า log(RT – T) เพื่อให้ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง และแสดงค่าที่ได้ในตาราง พร้อมทั้งทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log (RT–T) กับเวลา ซึ่งถูกแสดงในรูปที่ 13 หลังจากนั้นผู้ใช้สามารถเลือกช่วงเวลาได้จากการเลื่อน Hscroll bar ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ และเมื่อกดปุ่ม calculate โปรแกรมก็จะคำนวณค่า f_h , j_h และ R^2 เช่น จากกราฟที่ได้ ทำการเลือกช่วงเวลาที่ 23.3-42.3 นาที และ log(RT-T) เท่ากับ 1.932474-1.501059 สามารถคำนวณหาค่า f_h ซึ่งคือ -1/slope ของกราฟได้เท่ากับ 43.94847 , ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9999751 และคำนวณหา j_h ได้เท่ากับ 2.263649 จากสูตร

$$Sxx = \sum (X^2) - ((\sum X)^2 / n)$$

$$Sxy = \sum XY - ((\sum X) * (\sum Y)) / n$$

$$Syy = \sum Y^2 - (\sum Y)^2) / n$$

$$slope = \left| (Sxy / Sxx) \right|$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

intercept = $\sum y / n - (slope * (\sum x / n))$

เมื่อ X คือ เวลา (นาที)

Y คือ Log(RT –T)

n คือ จำนวนชุดข้อมูล

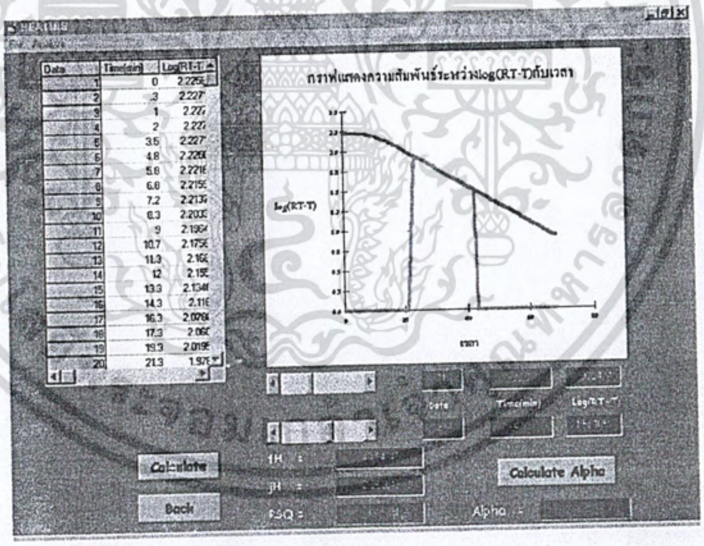
w_h คือ ค่าแรกของ Log(RT –T) เมื่อหาค่า j_h

$$f_h = 1 / slope$$

$$j_h = w_h / intercept$$

$$R^2 = slope * ((Sxx / Syy)^{1/2})$$

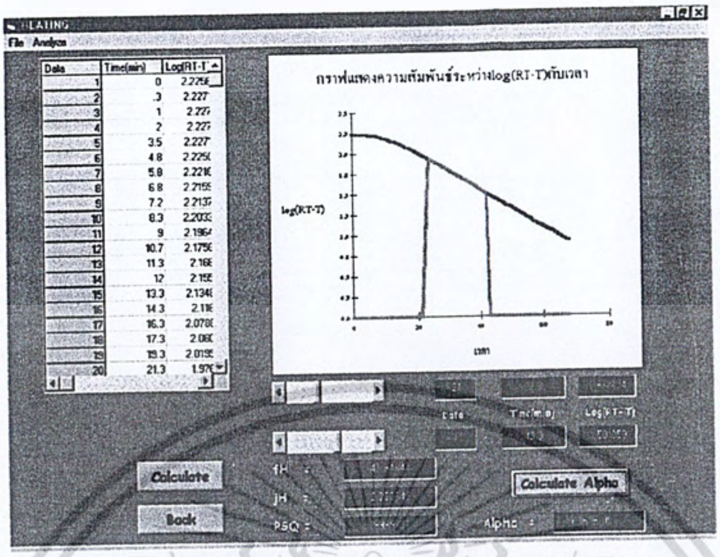
<u>หมายเหตุ</u> ถ้าค่า $R^2 = 1$ จะเป็นเส้นตรง ควรเลือกช่วงที่มีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากที่สุด จะได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 13 แสดงการเลือกช่วงเวลาและทำการคำนวณค่า f_h และ j_h

เมื่อผู้ใช้จะทำการคำนวณค่า Thermal diffusivity (α_h) สามารถทำได้โดยกดปุ่ม Calculate Alpha ดังรูปที่ 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 14 แสดงการคำนวณหาค่า $\propto_h$

จากรูปที่ 14 สามารถคำนวณหาค่า $\propto_h$ ได้เท่ากับ 4.751161×10^{-5} m^2/s โดยคำนวณค่า $\propto_h$ นี้ได้จากสูตร

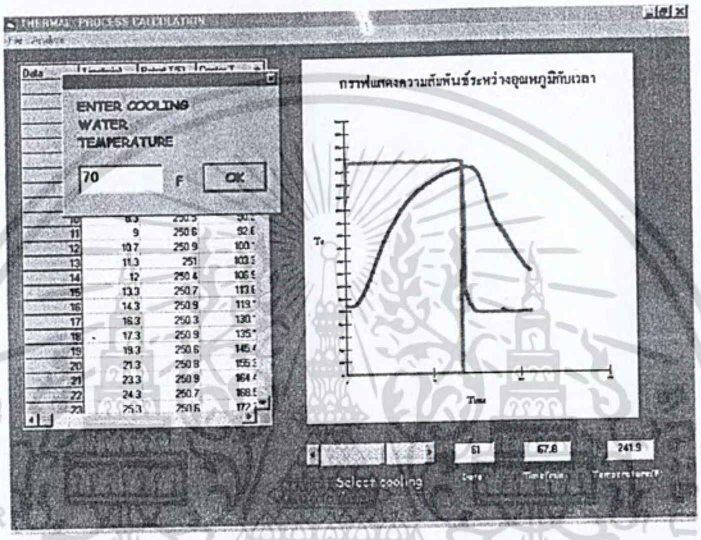
$$\propto_h = 0.398/((1/R^2) + (0.427/H^2))\, f_h$$

ซึ่งเมื่อขั้นต้นเราได้ป้อนชื่อของผลิตภัณฑ์คือปลาทูน่า , ความสูงกระป๋อง 6 นิ้ว , เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว และ f_h ซึ่งได้จากการคำนวณเท่ากับ 43.94847 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่า f_c , j_c และ $\propto_c$

ผู้ใช้จะต้องไปเลือกเมนูที่ Analyze แล้วไปที่เมนูย่อย Calculate Heat penetration curve parameter และ Fc_Jc_Alpha ตามลำดับ จะปรากฏหน้าจอย่อยเพื่อให้ผู้ใช้ใส่ค่าอุณหภูมิของน้ำใช้ที่ทำเย็น (ENTER COOLING WATER TEMPERATURE) เช่น 70 °F ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 15 แสดงการกำหนดอุณหภูมิน้ำที่ใช้ในการทำเย็น

เมื่อกดปุ่ม OK โปรแกรมจะทำการคำนวณค่า log(RT – T) เพื่อให้ได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง และแสดงค่าที่ได้ในตาราง พร้อมทั้งทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log(RT–T) กับเวลา ซึ่งถูกแสดงไว้ในรูปที่ 16 หลังจากนั้นผู้ใช้สามารถเลือกช่วงเวลาได้จากการเลื่อน Hscroll bar ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ และเมื่อกดปุ่ม calculate โปรแกรมก็จะคำนวณค่า f_c , j_c และ R^2 เช่น จากกราฟที่ได้ ทำการเลือกช่วงเวลาที่ 74-83 นาที และ log(T-RT) เท่ากับ 2.123198 –2.235781 สามารถคำนวณหาค่า f_c ซึ่งคือ 1/slope ของกราฟได้เท่ากับ 79.3499 , ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.9810095 และคำนวณหา j_c ได้เท่ากับ 1.867216 จากสูตร

$$Sxx = \sum (X^2) - ((\sum X)^2 / n)$$

$$Sxy = \sum XY - ((\sum X) * (\sum Y)) / n$$

$$Syy = \sum Y^2 - (\sum Y)^2) / n$$

$$slope = \left| (Sxy / Sxx) \right|$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

intercept = $\sum y / n - (slope * (\sum x / n))$

เมื่อ X คือ เวลา (นาที)

Y คือ Log(RT –T)

n คือ จำนวนครั้ง

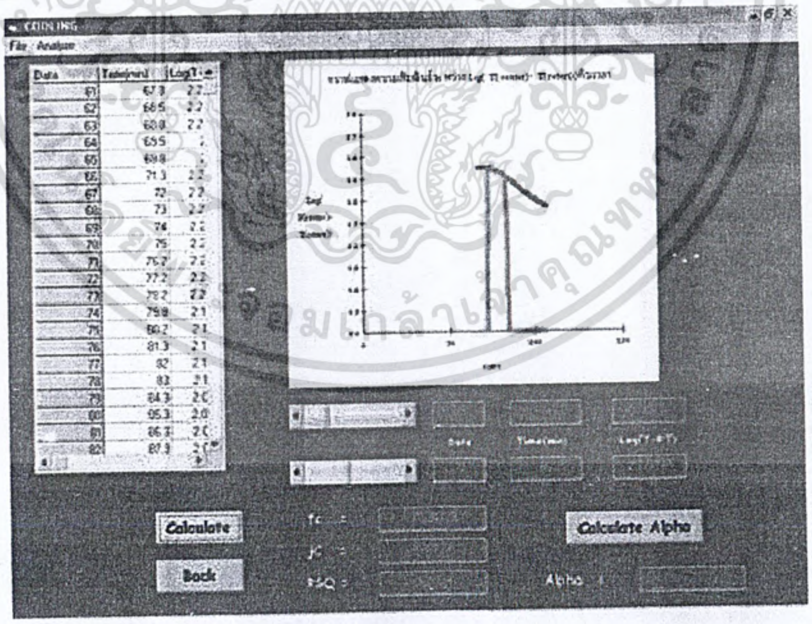
w_c คือ ค่า Log(RT –T) ตรงจุดที่เริ่มทำความเย็น (Cooling) เมื่อหาค่า j_c

$$f_c = 1 / slope$$

$$j_c = w_c / intercept$$

$$R^2 = slope * ((Sxx / Syy)^{1/2})$$

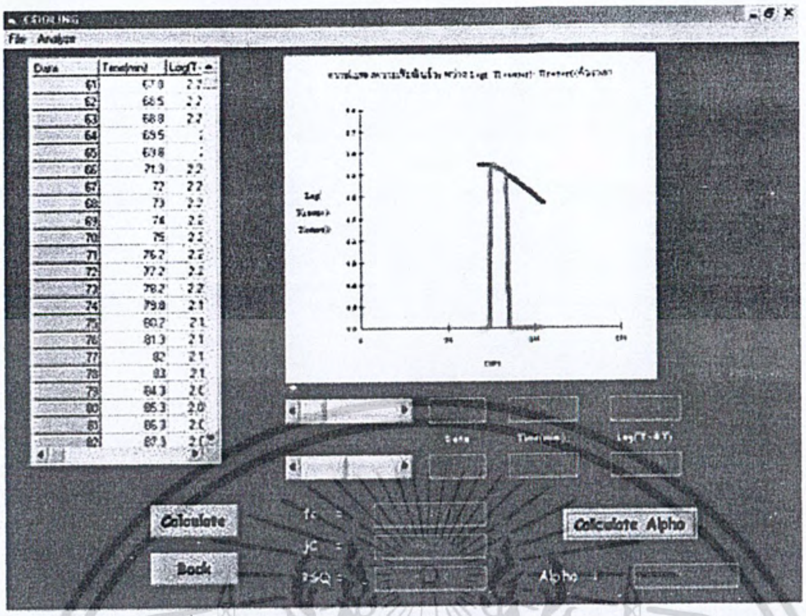
<u>หมายเหตุ</u> ถ้าค่า R^2 = 1 จะเป็นเส้นตรง ควรเลือกช่วงที่มีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 มากที่สุด จะได้ค่าที่ถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 16 แสดงการเลือกช่วงเวลาและทำการคำนวณค่า f_c และ j_c

เมื่อผู้ใช้จะทำการคำนวณค่า Thermal diffusivity (α_h) สามารถทำได้โดยกดปุ่ม Calculate Alpha ดังรูปที่ 17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 แสดงการคำนวณหาค่า $\propto_c$

จากรูปที่ 17 สามารถคำนวณหาค่า $\propto_c$ ได้เท่ากับ 2.631625×10^{-5} โดยคำนวณค่า $\propto_c$ นี้ได้จากสูตร

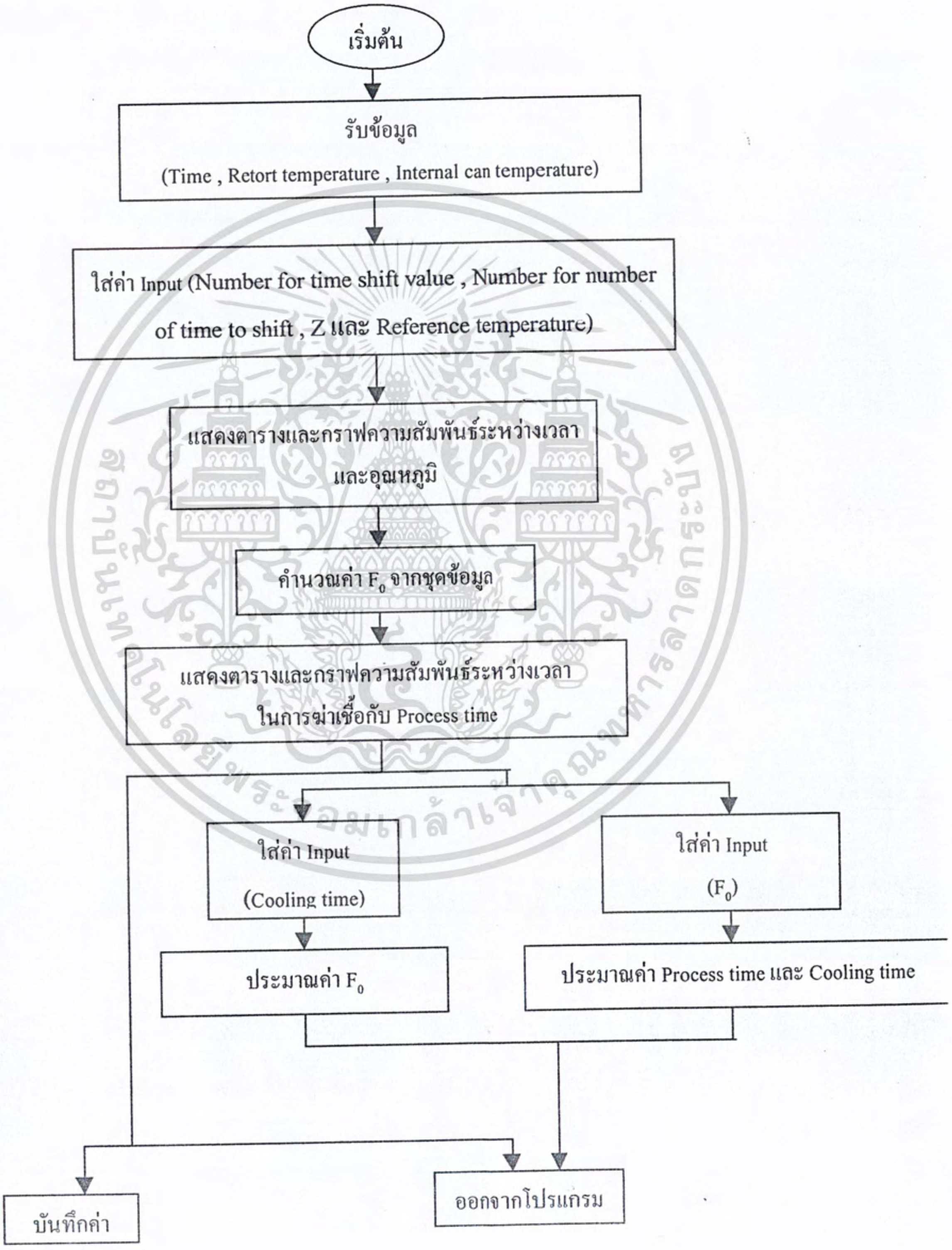
$$\propto_c = 0.398/((1/R^2) + (0.427/H^2))\, f_c$$

ซึ่งเมื่อขั้นต้นเราได้ป้อนชื่อของผลิตภัณฑ์คือปลาทูน่า , ความสูงกระป๋อง 6 นิ้ว , เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว และ f_c ซึ่งได้จากการคำนวณเท่ากับ 79.3499 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 Shift Cooling Curve

แผนผังการทำงาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

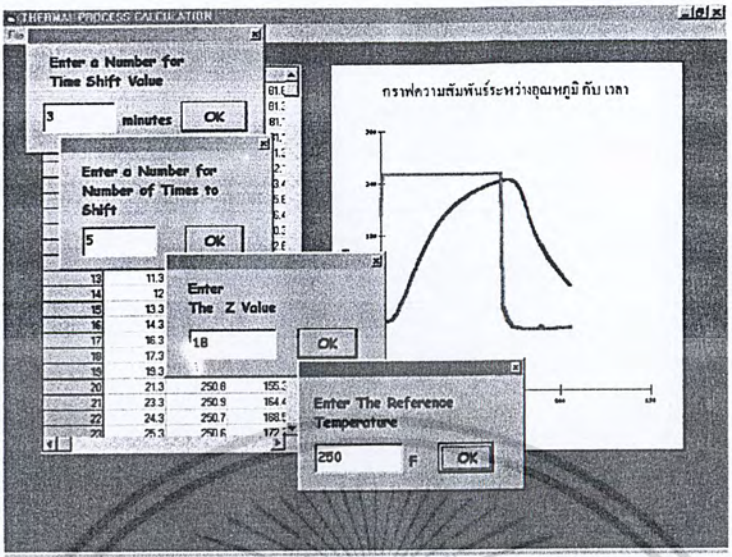
ขั้นตอนการทำงาน

เมื่อผู้ใช้เลือกเมนูไปที่ Analyze แล้วไปที่เมนูย่อย shift cooling curve ก็จะปรากฏหน้าจอให้ผู้ใช้ใส่ค่าไปเรื่อยๆ ได้แก่

- เวลาที่ถูกเปลี่ยนไปในแต่ละครั้ง (Number for time shift value) คือ เวลาที่เปลี่ยนไปจากเวลาที่ใช้เริ่มต้นการทำความเย็นเดิม เช่น เดิมเริ่มต้นCooling ที่นาทีที่ 61 หากเวลาถูกทำให้เปลี่ยนไป 3 นาที จะได้เวลาที่เริ่มต้นทำการ Cooling ใหม่เป็น 61-3 = นาทีที่ 58 , ครั้งถัดไปเวลาที่เริ่มต้น Cooling จะเปลี่ยนเป็น 58-3 = นาทีที่ 55 เป็นต้น ซึ่งค่า Number for time shift value นี้ไม่ควรมีค่ามากเกิน 5 เพราะจะทำให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาดมาก
- จำนวนครั้งของเวลาที่ถูกเปลี่ยนไป (Number for number of time to shift) คือ จำนวนครั้งที่เราได้ทำการเปลี่ยนแปลงเวลาที่เริ่มต้น Cooling เช่น ถ้า Number for number of time to shift = 5 ครั้ง , Number for time shift value = 3 นาที และเดิมเริ่มต้นCooling ที่นาทีที่ 61 ดังนั้น ในครั้งที่ 5 นี้เราจะเริ่มต้น Cooling ที่ 61-(3×5) = นาทีที่ 46 เป็นต้น ค่า Number for number of time to shift นี้ เมื่อเราจะทำการใส่ข้อมูลลงไป หากใส่ค่าที่มากเกินไปอาจทำให้ได้เวลาที่เริ่มต้นทำการ Cooling ที่มีค่าติดลบซึ่งโปรแกรมไม่สามารถคำนวณได้ เนื่องจากเวลาที่เริ่มต้นทำการ Cooling นี้ไม่สามารถมีค่าเป็นลบได้ เช่น ถ้า Number for number of time to shift = 21 ครั้ง , Number for time shift value = 3 นาที และเดิมเริ่มต้นCooling ที่นาทีที่ 61 ดังนั้น ในครั้งที่ 21 นี้เราจะเริ่มต้น Cooling ที่ 61-(3×21) = นาทีที่ -2 ซึ่งเราไม่สามารถทำได้ เป็นต้น
- ค่า Z ของจุลินทรีย์
- อุณหภูมิอ้างอิง

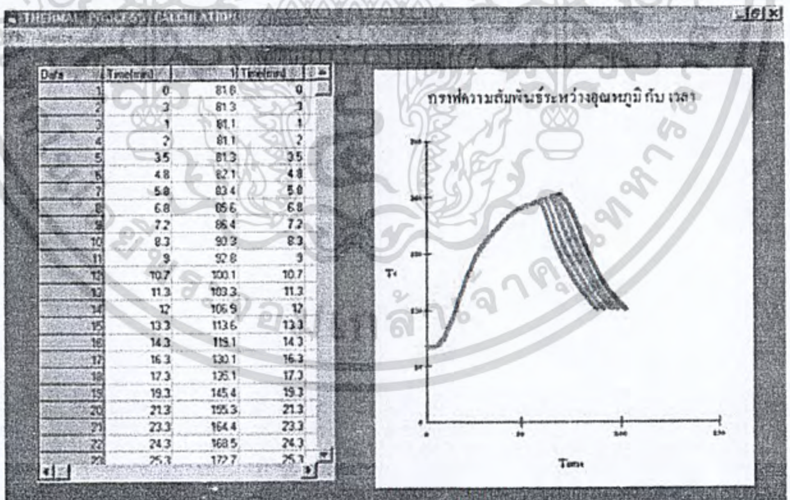
ตัวอย่างการใส่ข้อมูลต่างๆ ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 แสดงการกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบต่าง ๆ

เมื่อใส่ข้อมูลจนครบแล้ว กดปุ่ม OK โปรแกรมจะเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิอาหารกระป๋องที่จุดที่ร้อนช้าที่สุด กับเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงการเริ่มต้น Cooling ในแต่ละครั้ง รวมทั้งแสดงค่าไว้ในตารางด้วย ดังแสดงในรูปที่ 19

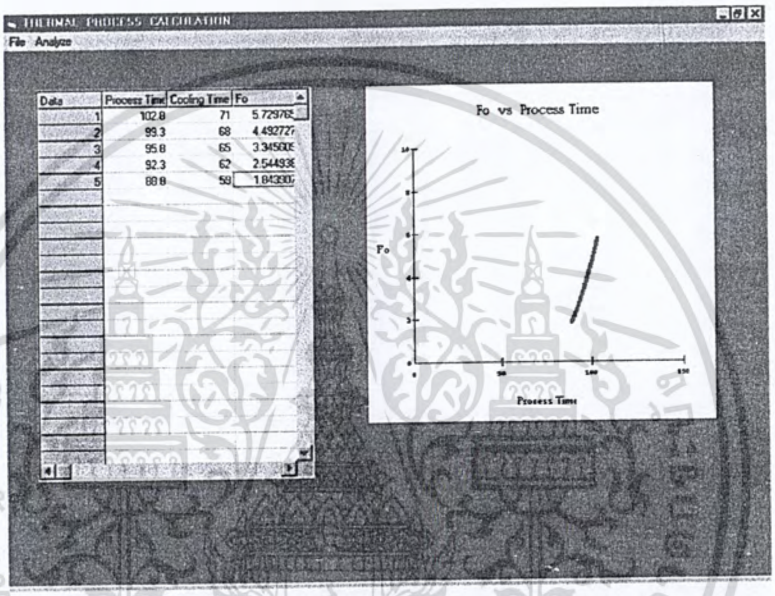


รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่เปลี่ยนไปกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในแต่ละครั้ง เมื่อเวลามีการเปลี่ยนไปในแต่ละครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1) การคำนวณหาค่า F_0 เมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในกระบวนการ (Fo vs Process Time Plot)

หลังจากกระทำตามขั้นตอนตามขั้นต้นแล้ว เมื่อเลือกเมนูไปที่ Analyze แล้วไปที่เมนูย่อย Shift Cooling Curve และ Fo vs Process Time ตามลำดับ โปรแกรมจะทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการฆ่าเชื้อ(Fo) กับเวลาในขบวนการ (Process Time) รวมทั้งแสดงค่าในตาราง ดังแสดงในรูปที่ 20



รูปที่ 20 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F_0 กับเวลาที่ใช้ในกระบวนการ (Process Time) และตารางแสดงผล

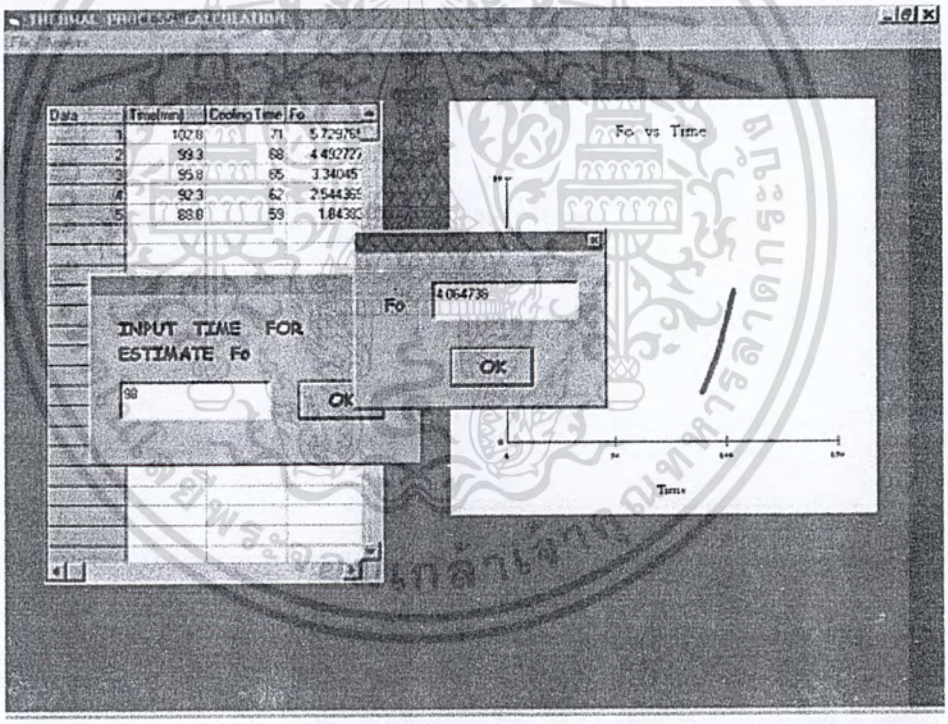
จากรูปที่ 20 แสดงผลการคำนวณค่า F_0 ในแต่ละครั้งที่มีการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำความเย็น (Cooling) ทุก ๆ 3 นาที จำนวน 5 ครั้ง คือ เมื่อเราทำการเปลี่ยนแปลงเวลาในการทำความเย็นแต่ละครั้ง ค่า F_0 ซึ่งได้มาจากการอินทิเกรตเพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟจะเปลี่ยนไป ซึ่งเราได้นำมาเขียนแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาในการฆ่าเชื้อ (F_0) กับเวลาในขบวนการ (Process Time) เพื่อแสดงถึงแนวโน้มของผลของการฆ่าเชื้อต่อเวลาที่ให้ความร้อน คือเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ผลของการฆ่าเชื้อมากขึ้นด้วย ซึ่งจะได้นำไปใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาค่า F_0 เมื่อกำหนดค่าเวลาในการทำความเย็น หรือหาค่า Process time กับ Cooling time เมื่อกำหนดค่า F_0 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การคำนวณหาค่า F_0 เมื่อกำหนดเวลาที่ใช้ในกระบวนการ (Estimate Lethality , Given Time)

เมื่อเลือกเมนูไปที่ Analyze แล้วไปที่เมนูย่อย Shift Cooling Curve และ Estimate Lethality , Given Time ตามลำดับ จะปรากฏหน้าจอย่อยให้ใส่ค่า Process time และเมื่อทำการกดปุ่ม OK โปรแกรมจะคำนวณค่าเวลาในการฆ่าเชื้อ(Fo)

ค่า Process time นี้ หากเรากำหนดให้มีค่ามาก คือ ใช้เวลานานในการฆ่าเชื้อซึ่งจะทำให้ได้ค่า Fo มากด้วย ตรงกันข้าม หากเรากำหนดค่า Process time นี้ให้มีค่าน้อยก็จะทำให้ได้ค่า Fo น้อยด้วย ตัวอย่างการใช้งานของโปรแกรมถูกแสดงดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 แสดงการประมาณค่า F_0 เมื่อกำหนดค่า Process Time

จากรูปที่ 21 ต้องการใช้เวลาในกระบวนการการฆ่าเชื้อด้วยความร้อนทั้งหมดเป็นเวลา 98 นาที ซึ่งได้ค่า Fo เท่ากับ 4.064738 นาที

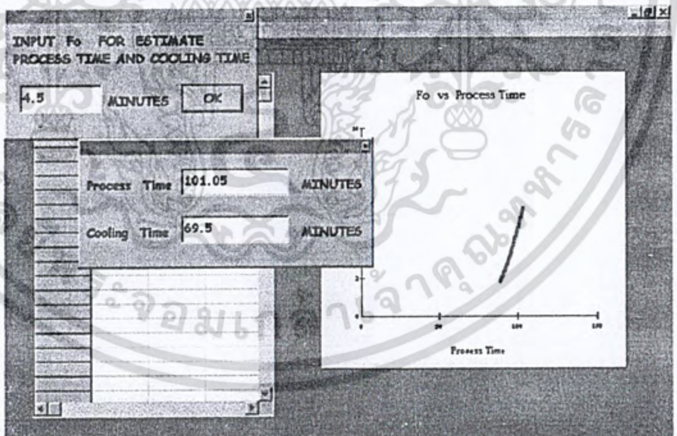
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การคำนวณหาค่า Process time กับ Cooling time เมื่อกำหนดค่า F_0 (Estimate Time , Given Lethality)

เมื่อเลือกเมนูไปที่ Analyze แล้วไปที่เมนูย่อย Shift Cooling Curve และ Estimate Time , Given Lethality ตามลำดับ จะปรากฏหน้าจอย่อยให้ป้อน ค่า Fo ในการกำหนดค่า F_0 ที่เหมาะสมนั้น สามารถคำนวณได้ดังนี้ เช่น เมื่อเราต้องการผ่านกระบวนการ 12D เพื่อให้รอดพ้นจากการเสื่อมเสียของอาหารจาก C. botulinum ซึ่งมีค่า D เท่ากับ 0.5 (จากตารางภาคผนวก1) ดังนั้นค่า F_0 ที่เหมาะสมเท่ากับ $12 \times 0.5 = 6$ นาที เป็นต้น

เมื่อทำการกดปุ่ม OK โปรแกรมจะคำนวณค่าเวลาในขบวนการ (Process Time) และ เวลาในการทำเย็น (Cooling Time) เช่น ใส่ค่า Fo เท่ากับ 4.5 นาที จะได้ค่าเวลาในขบวนการ (Process Time) เท่ากับ 101.05 นาที และเริ่มต้นทำการ Cooling ที่นาทีที่ 69.5 ดังแสดงในรูปที่ 22

<u>**หมายเหตุ**</u> การกำหนดค่า Fo ต้องอยู่ในช่วงของค่าที่มีอยู่ในตาราง



รูปที่ 22 แสดงการประมาณค่าเวลาการทำความเย็น(Cooling time) และเวลาในขบวนการ(Process time) เมื่อกำหนดค่า F_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
บทวิจารณ์และสรุป

โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณเวลาในการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน เป็นโปรแกรมสำหรับคำนวณหาค่า F_o และค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น f_h , f_c , j_h , j_c , $\propto_h$ และ $\propto_c$ จากข้อมูลการแทรกซึมความร้อน (Heat penetration data) ที่ได้จากการทดลอง และคำนวณหา Process time เพื่อให้ได้ค่า F_0 ของกระบวนการฆ่าเชื้อเท่ากับค่าที่กำหนด ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นบนโปรแกรม Microsoft Visual Basic 6.0

โปรแกรมประกอบด้วย 3 ส่วนหลักโดย ส่วนแรกเป็นการคำนวณหาค่า F_o จากข้อมูลการแทรกซึมความร้อนที่ได้จากการทดลองประกอบด้วย เวลา อุณหภูมิหม้อฆ่าเชื้อ และอุณหภูมิภายในกระป๋องที่จุดร้อนช้าที่สุด ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกเก็บไว้ใน Text file เพื่อให้สะดวกในการเรียกชุดข้อมูลมาใช้งาน

ส่วนที่ 2 เป็นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ เช่น f_h , f_c , j_h , j_c , $\propto_h$ และ $\propto_c$ ซึ่งตัวแปรเหล่านี้จะบอกถึงคุณสมบัติต่างๆ ในการถ่ายโอนความร้อนของผลิตภัณฑ์ เช่น ลักษณะการถ่ายเทความร้อน และความเร็วในการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

ส่วนที่ 3 จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนย่อย คือ การประมาณค่า F_0 เมื่อกำหนดเวลาที่เริ่มปิดไอน้ำ และคำนวณหาเวลาที่เริ่มปิดไอน้ำรวมทั้งเวลาที่ใช้ในกระบวนการทั้งหมดเมื่อกำหนดค่า F_0 ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการออกแบบกระบวนการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน

โปรแกรมนี้มีข้อจำกัดบางประการในการใช้งาน อาทิ การประมาณเวลาที่เริ่มปิดไอน้ำ เนื่องจาก ในการทดลอง เมื่อเราเริ่มทำการปิดไอน้ำ อุณหภูมิจะยังไม่ลดลงมาทันที แต่จะค่อยๆ ลดลงหลังจากนั้น ซึ่งในโปรแกรมนี้จะนับเวลาที่เริ่มปิดไอน้ำเมื่ออุณหภูมิได้เริ่มลดลงมาแล้ว ทำให้เราได้เวลาที่ควรจะเริ่มปิดไอน้ำช้ากว่าความเป็นจริง และในการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ความร้อนนั้นสามารถใช้หาได้สำหรับภาชนะบรรจุอาหารซึ่งเป็นรูปทรงกระบอกเท่านั้น ซึ่งควรจะได้รับการพัฒนาต่อไปให้สามารถคำนวณได้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางภาคผนวก 1 แสดงค่า D ของเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ

ชื่อจุลินทรีย์	ค่า D (min)	เป้าหมาย
B. subtilis	< 0.1	< 1/50,000
B. licheniformis	0.1	< 1/50,000
B. coagulans/ B. macerans	0.1-1.0	1/1,000
B.stearothermophilus	2.0-2.5	น้อยกว่า 3-4 D
C. sporogenes , C. botulinum	0.1-1.0	< 1/50,000
C. thermosaccarolyticum	2.0	< 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bi-Section

การคำนวณด้วยวิธี Bi-Section

กรณีต้องการหาค่า Process Time โดยกำหนด Fo ที่ต้องการ โดยค่า Fo ที่ต้องการจะอยู่ระหว่าง ค่า Fo สองค่า ซึ่งได้ทำการคำนวณมาแล้ว โดยกำหนดเป็น ค่า Fo(1) จาก Process Time1 และ Temperature1 ส่วน Fo(2) จาก Process Time2 และ Temperature2 จากนั้นคำนวณ

(Process Time1 + Process Time2) / 2 = Process Time3

(Temperature1 + Temperature2) / 2 = Temperature3

จากนั้นนำค่า Process Time3 และ Temperature3 มาคำนวณจากสมการ

$$\int_{o}^{\text{Processtime3}} 10^{(T-Tref)/z} = Fo3$$

จะได้ค่า Fo3 ออกมา แล้วนำ Fo3 มาเปรียบเทียบกับค่า Fo ที่ต้องการ

- ถ้าค่า Fo3 มีค่ามากกว่าค่า Fo ที่ต้องการ จะต้องทำการคำนวณ โดย

(Process Time1 + Process Time3) / 2 = Process Time4

(Temperature1 + Temperature3) / 2 = Temperature4

- ถ้าค่า Fo3 มีค่าน้อยกว่าค่า Fo ที่ต้องการ จะต้องทำการคำนวณ โดย

(Process Time2 + Process Time3) / 2 = Process Time5

(Temperature2 + Temperature3) / 2 = Temperature5

จากนั้นนำค่า Process Time4 และ Temperature4 หรือ Process Time5 และ Temperature5 มาคำนวณหาค่า Fo จากสมการ

$$\int_{o}^{\text{Processtime3}} 10^{(T-Tref)/z} = Fo'$$

จะได้ค่า Fo' ออกมาแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่า Fo ที่ต้องการทำการคำนวณซ้ำๆ ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง

$$Fo' \cong Fo \text{ ที่ต้องการ}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. ทิพาพร อยู่วิทยา . "Thermal Process Calculations (General Method)" , ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

2. วราวุฒิ ครูส่ง . "การถนอมและการแปรรูปอาหาร Food Preservation and Processing" , สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช , หน้า 87-142 , 2539.

3. เอกสารประกอบการสัมมนา-อบรมวิชาการด้านอุตสาหกรรมอาหาร "โครงการร่วมการฝึกอบรมวิชาการด้านอุตสาหกรรมอาหารการกำหนดกระบวนการการให้ความร้อนในการฆ่าเชื้อในอาหารกระป๋องที่มีความเป็นกรดต่ำ" , สถาบันอาหาร ศูนย์พันธุวิศวกรรมและเทคโนโลยีชีวภาพแห่งชาติ.

4. OTT , R.L. , "An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis" , Duxbury Press Belmont , California , pp. 441 - 442 , 1992 .

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้