Advance Meat Safety

เจาะลึกกลไกความปลอดภัยเนื้อสัตว์ ด้วยแบบจำลองจลนพลศาสตร์



รศ.ดร.รชา เทพษร (Dr.sc.agr.)

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

วิวัฒนาการระบบตรวจสอบความปลอดภัยเนื้อสัตว์

จากการตรวจเชิงรับ สู่การป้องกันตามความเสี่ยง

Reactive

สุ่มตรวจชากและใช้ Culture-based
ใช้เวลานาน
ตอบสนองหลังตรวจพบปัญหา

Risk-Based

ประเมินความเสี่ยงและใช้ HACCP
คาดการณ์ด้วย Predictive Microbiology
เฝ้าระวังต่อเนื่องด้วย AI และ Rapid Detection



ครอบคลุมอันตรายชีวภาพ เคมี และกายภาพ
ตรวจยืนยันระบบด้วย Verification & Validation

ควบคุมอันตรายก่อนส่งถึงผู้บริโภค

อันตรายในกระบวนการแปรรูปเนื้อสัตว์



อันตรายทางชีวภาพ

เชื้อก่อโรคและเชื้อทำให้อาหารเน่าเสีย
รวมถึงไวรัส ปรสิต และสารพิษจากแบคทีเรีย

Salmonella
L. monocytogenes
E. coli O157:H7



อันตรายทางเคมี

สารพิษจากเชื้อรา
สารเคมีตกค้าง
มลพิษในสิ่งแวดล้อม



อันตรายทางกายภาพ

กระดูกและโลหะ
พลาสติกและไม้

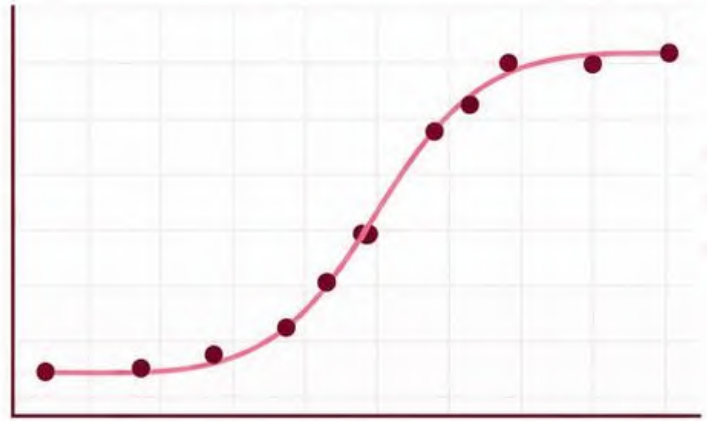
ป้องกัน ตรวจหา และควบคุมอันตรายตลอดกระบวนการผลิต

หลักการพื้นฐาน ของจุลชีววิทยาเชิงคาดการณ์

ข้อมูลทดลอง
ทดลองในสภาวะควบคุม



แบบจำลองคณิตศาสตร์และสถิติ
สมการอธิบายอัตราการเปลี่ยนแปลง



คาดการณ์พฤติกรรม



การเจริญเติบโต

การรอดชีวิต

การตาย

อุณหภูมิ ความเป็นกรด–ด่าง แอกทิวิตีของน้ำ และสารอาหาร

สนับสนุนการประเมินความเสี่ยงและการควบคุมอันตราย

ต้องยืนยันความใช้ได้กับอาหารและสภาวะเป้าหมายก่อนใช้

แบบจำลองจลนพลศาสตร์ ยกระดับความปลอดภัยอาหาร



ยกระดับการควบคุมอันตราย

กำหนดขีดจำกัดของจดวิกฤต
และเงื่อนไขกระบวนการที่เหมาะสม



ลดต้นทุนการทดสอบ

คัดเลือกสภาวะสำคัญ
ลดการทดลองซ้ำที่ไม่จำเป็น

คาดการณ์จำนวนจุลินทรีย์





ประเมินความเสี่ยงจุลินทรีย์เชิงปริมาณ

ใช้จำนวนจุลินทรีย์เป็นข้อมูลนำเข้า
เพื่อประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพ



ลดขยะอาหาร

คาดการณ์อายุการเก็บ
วางแผนการเก็บและการกระจายสินค้า

ใช้แบบจำลองที่ผ่านการยืนยันความใช้ได้ ร่วมกับการทดสอบจริง

แบบจำลองจลนพลศาสตร์

คาดการณ์จำนวนจุลินทรีย์
ประเมินผลของเวลาและอุณหภูมิ





ความปลอดภัย
เนื้อสัตว์เชิงรุก





เทคโนโลยีการทำลายเชื้อขั้นสูง

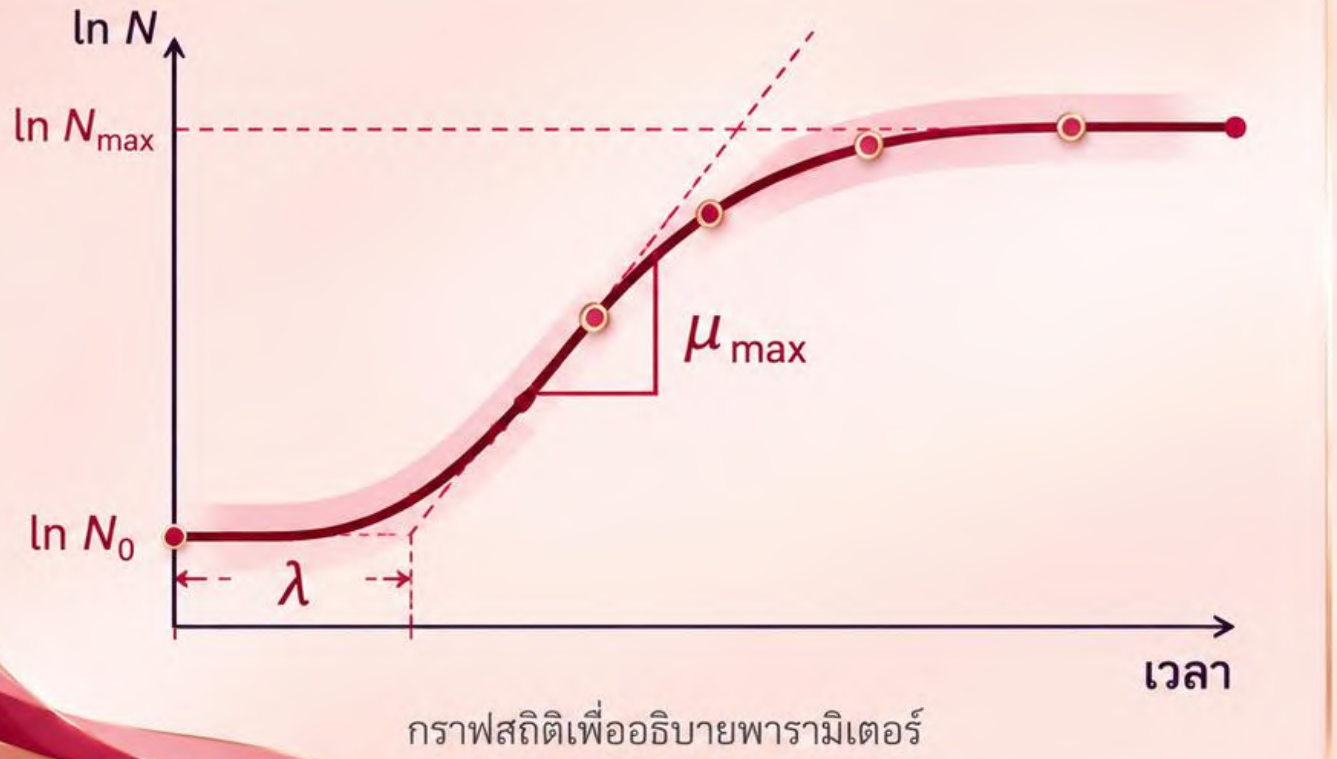
ควบคุมเชื้อและคำนึงถึงคุณภาพ
เลือกสภาวะและยืนยันประสิทธิผล

อุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ยุค 5.0

คนทำงานร่วมกับระบบอัตโนมัติ
ใช้ข้อมูลจริงเฝ้าระวังและปรับการควบคุม

พารามิเตอร์ชีวภาพในแบบจำลองการเจริญปฐมภูมิ

4 พารามิเตอร์สำคัญจากกราฟการเจริญ



กราฟสถิติเพื่ออธิบายพารามิเตอร์

λ ระยะเวลาปรับตัว (λ)
ช่วงปรับตัวก่อนเพิ่มจำนวนชัดเจน
สะท้อนความพร้อมของเซลล์ในสภาพแวดล้อมใหม่

μ_{max} อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (μ_{max})
อัตราการเจริญในระยะทวีคูณ
แสดงความสามารถในการเพิ่มจำนวนของเซลล์

N_0 จำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น (N_0)
ความหนาแน่นประชากร ณ เวลาเริ่มต้น
มีผลต่อระยะเวลาที่เข้าสู่การเจริญ

N_{max} จำนวนจุลินทรีย์สูงสุด (N_{max})
ขีดจำกัดความหนาแน่นในระยะคงที่
สะท้อนข้อจำกัดของสภาพแวดล้อมและสารอาหาร

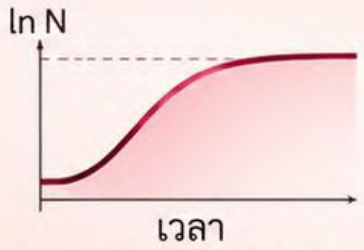
แนวทางชะลอการเจริญ: · ยืดระยะปรับตัว (λ) · ลดอัตราการเจริญ (μ_{max}) · จำกัดค่าจำนวนสูงสุด (N_{max})

สมการการเจริญรูปตัวเอส

ดูรูปทรงกราฟ แล้วเชื่อมความหมายกับสมการปฐมภูมิ



Modified Gompertz

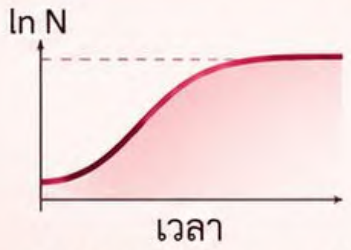


$$y(t) = y_0 + A e^{-e^{u_G}}$$

$$u_G = 1 + \frac{\mu_{max} e}{A}(\lambda - t)$$

ฟิตรูปทรงโค้งไม่สมมาตร

Baranyi & Roberts

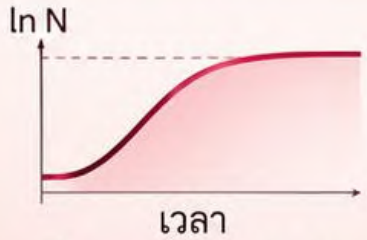


$$\frac{dy}{dt} = \mu_{max}\,\alpha(t)\,g(y)$$

$$\alpha(t) = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + (1-\alpha_0)e^{-\mu_{max}t}}$$

คำนึงถึงความพร้อมเริ่มต้นของเซลล์

Huang

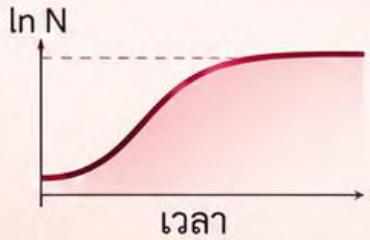


$$\frac{dy}{dt} = \mu_{max}\,s(t)\,g(y)$$

$$s(t) = \frac{1}{1 + e^{-k(t-\lambda)}}$$

เชื่อมระยะปรับตัวกับการเจริญ

Logistic



$$y(t) = y_0 + \frac{A}{1 + e^{u_L}}$$

$$u_L = 2 + \frac{4\mu_{max}}{A}(\lambda - t)$$

โค้งสมมาตรรอบจุดเปลี่ยนโค้ง

กำหนด
กราฟสถิติในสภาวะคงที่

$y = \ln N$
N: จำนวนจุลินทรีย์

$A = y_{max} - y_0$
ความสูงของช่วงเปลี่ยนผ่าน

$g(y) = 1 - e^{y - y_{max}}$
องค์ประกอบการยับยั้ง

ใช้สมการให้เหมาะสมกับข้อมูล
เพื่อประมาณค่า μ_{max}, λ และลักษณะการเจริญ

จลนพลศาสตร์การตายและการรอดชีวิต

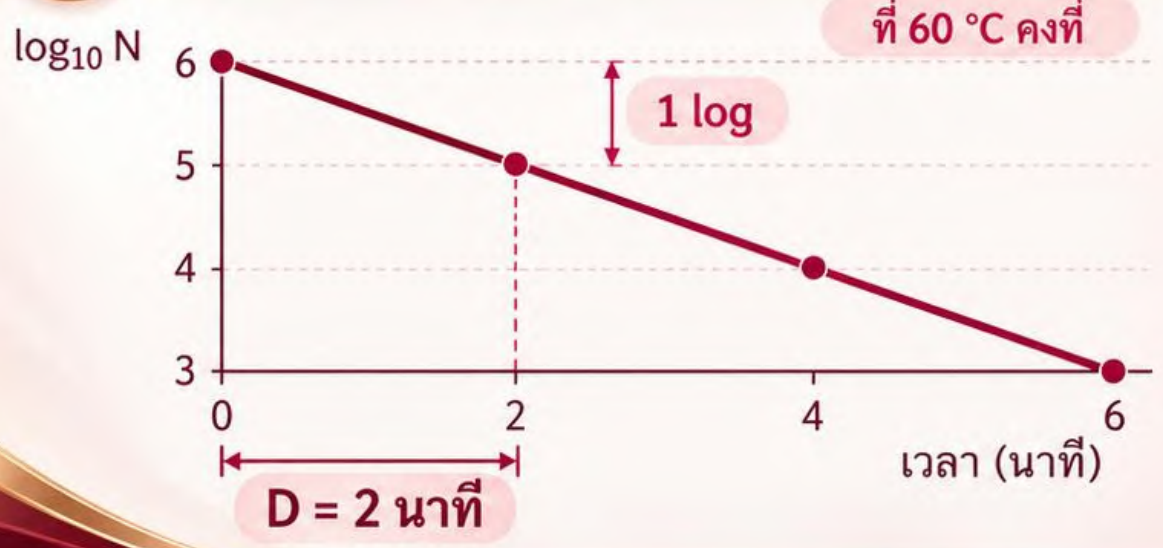
สมการอันดับหนึ่งกับความหมายของ D-value และ z-value



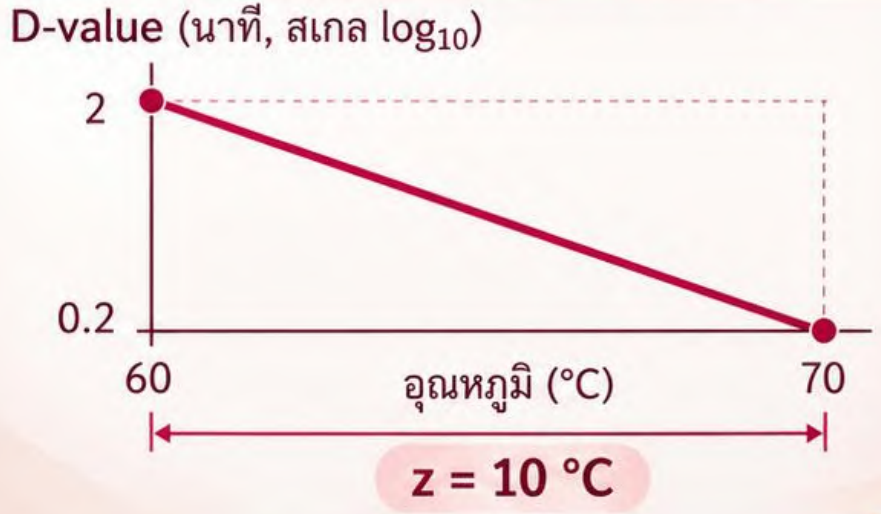
สมการอันดับหนึ่ง

$$\log_{10}\left(\frac{N_t}{N_0}\right) = -\frac{t}{D_T}$$

D-value: เวลาลดจำนวนจุลินทรีย์ลง 90% (1 log)



z-value เพิ่มอุณหภูมิ z °C ทำให้ D-value ลดลง 10 เท่า



ตัวอย่างสมมติ N_0 = จำนวนเริ่มต้น N_t = จำนวนที่รอดชีวิต ณ เวลา t

D และ z ขึ้นกับชนิดจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ และสภาวะการให้ความร้อน

อ้างอิง: USDA–ARS, PMP

แบบจำลองทุติยภูมิ

ปัจจัยแวดล้อมกับอัตราการเจริญและระยะเวลาปรับตัว



1 ปัจจัยแวดล้อม

- อุณหภูมิ (T)
- ค่า pH
- วอเตอร์แอกทิวิตี a_w
- ความเข้มข้นเกลือ (NaCl)
- สารต้านจุลินทรีย์ ความเข้มข้น

2 คำนวณพารามิเตอร์

μ_{max}

อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด

λ

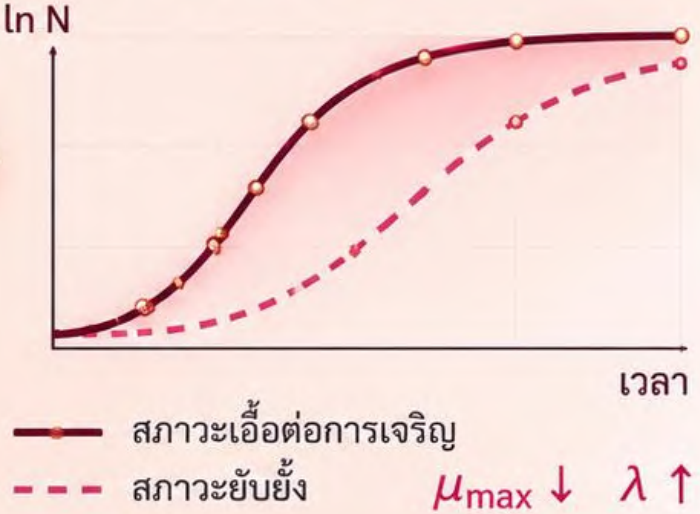
ระยะเวลาปรับตัว

พิจารณาอิทธิพลร่วมของปัจจัย

3 กราฟการเจริญ

แบบจำลองปฐมภูมิ

กราฟสาธิตสองสภาวะ



ทุติยภูมิ: พารามิเตอร์ตามสภาวะ

λ ขึ้นกับประวัติของเซลล์ และควรใช้แบบจำลองในขอบเขตที่ตรวจสอบแล้ว

ปฐมภูมิ: จำนวนจุลินทรีย์ตามเวลา

ประเมินผลจาก μ_{max} และ λ

อ้างอิง: USDA-ARS / ComBase

สมการของแบบจำลองทุติยภูมิ

เชื่อมปัจจัยแวดล้อมกับพารามิเตอร์การเจริญ

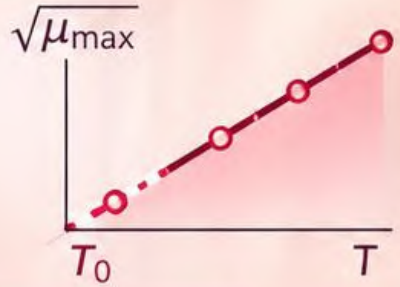


1 Ratkowsky (รากที่สอง)

$$\sqrt{\mu_{max}} = b(T - T_0)$$

ใช้ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า T_{opt}

T_0 เป็นจุดตัดแกนจากการฟิตเส้น



2 Arrhenius

$$k(T) = A\,e^{-E_a/(RT)}$$

E_a: พลังงานกระตุ้น

T ต้องใช้หน่วยเคลวิน (K)

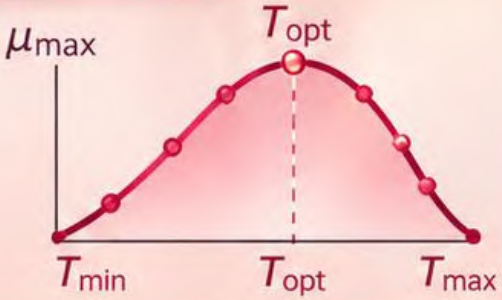


3 Cardinal Parameter Models (CPM)

$$\mu_{max}(T) = \mu_{opt}\,\gamma(T)$$

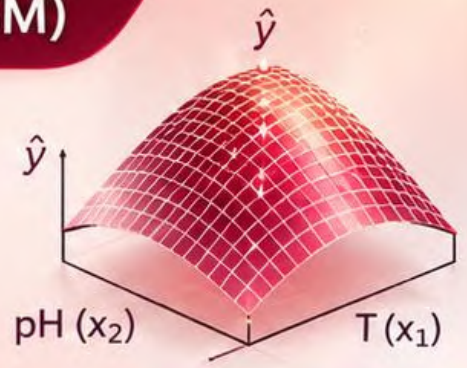
ค่าสุด-เหมาะสม-สูงสุดที่เจริญได้

μ_{opt}: อัตราการเจริญที่ T_{opt}



4 พื้นผิวตอบสนอง (RSM)

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2$$



กราฟสรุป b: ความชัน A: สัมประสิทธิ์ก่อนเลขชี้กำลัง R: ค่าคงที่แก๊ส

$\gamma(T)$: ผลอุณหภูมิ (0–1) $\hat{y}$: ค่าตอบสนอง x_1, x_2: ปัจจัยเข้ารหัส เช่น T และ pH

ใช้ในการทำนายจุลินทรีย์

ภายใต้สภาวะแปรปรวนหลายปัจจัย

Ratkowsky / Rosso / IUPAC / NIST

วิธีฟิตแบบจำลอง

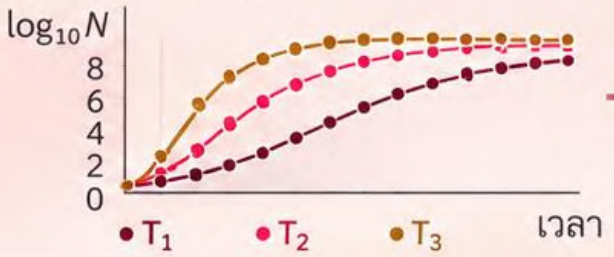
สองขั้นตอน เทียบกับการฟิตรวมขั้นตอนเดียว



1 ฟิตสองขั้นตอน
Two-Step Approach

ความคลาดเคลื่อน
อาจส่งต่อระหว่างขั้นตอน

1 ฟิต Primary model
แยกแต่ละอุณหภูมิ

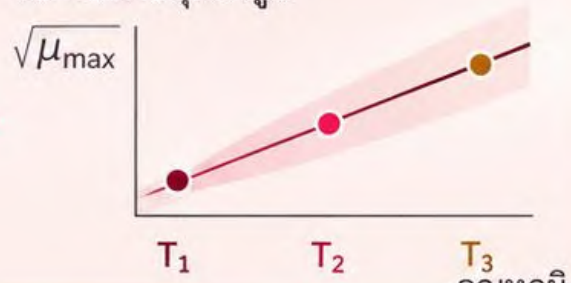


→ ค่า μ_{max} → $\hat{\mu}_1, \hat{\mu}_2, \hat{\mu}_3$

นำค่าประมาณ
ไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

→

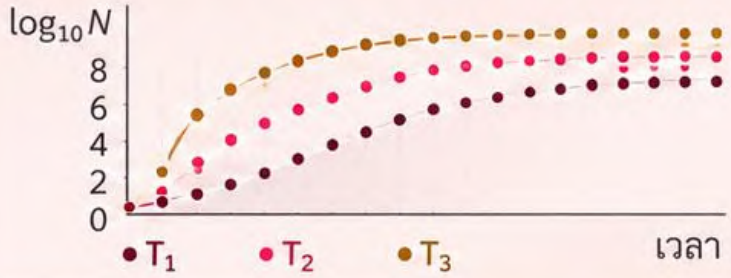
2 ฟิต Secondary model
สัมพันธ์กับอุณหภูมิ



2 ฟิตรวม ขั้นตอนเดียว
One-Step Global Fitting

ใช้ข้อมูลร่วมกัน
ช่วยลดความไม่แน่นอน

ข้อมูลทุกเวลาและอุณหภูมิ



ฟิต Primary + Secondary พร้อมกัน

$$\min_{\theta} \sum (y - \hat{y})^2$$

ลดความคลาดเคลื่อนรวมของข้อมูล

y: ข้อมูล $\hat{y}$: ค่าทำนาย θ: พารามิเตอร์

ตรวจสอบด้วยข้อมูลทดสอบ
ผลขึ้นกับข้อมูลและแบบจำลอง กราฟสถิติ

RMSE ต่ำ | $B_f \approx 1$ | $A_f \approx 1$

Jewell (2012), Huang (2017), Ross (1996)

ซอฟต์แวร์แบบจำลองระดับตติยภูมิ

เครื่องมือทำนายสำหรับอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์

ComBase Predictor >
การเจริญและการลดจำนวนเชื้อ
ใช้คู่กับฐานข้อมูล ComBase

PMP (USDA–ARS)
Pathogen Modeling Program >
พฤติกรรมเชื้อก่อโรค
ในสภาวะการแปรรูปและจัดเก็บ

DMRI Predict >
อายุการเก็บและความปลอดภัย
ทดสอบในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์จริง
เช่น *Leuconostoc spp.*

MicroHibro >
แบบจำลองและการประเมินความเสี่ยง
ตลอดห่วงโซ่อาหาร (QMRA)



ป้อนข้อมูล รับผลทำนาย
การเจริญ อายุการเก็บ ความเสี่ยง

ตรวจสอบเขตของแบบจำลอง และยืนยันผลกับผลิตภัณฑ์จริง
DMRI: โครงการพัฒนาแบบจำลอง *Bacillus cereus* (รายงานปี 2569)

เพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัย
เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์

การทำนายจุลินทรีย์ด้วยวิธี Machine Learning-Based Predictive Modeling

เรียนรู้จากข้อมูล เพื่อคาดการณ์การเจริญในสภาวะที่ซับซ้อน



1 ข้อมูลจุลชีววิทยา

ComBase และข้อมูลทดลอง



อุณหภูมิ pH a_w
เวลาและจำนวนเริ่มต้น
ชนิดเนื้อสัตว์และจุลินทรีย์

ComBase และ
ข้อมูลทดลองจริง

2 อัลกอริทึมเรียนรู้

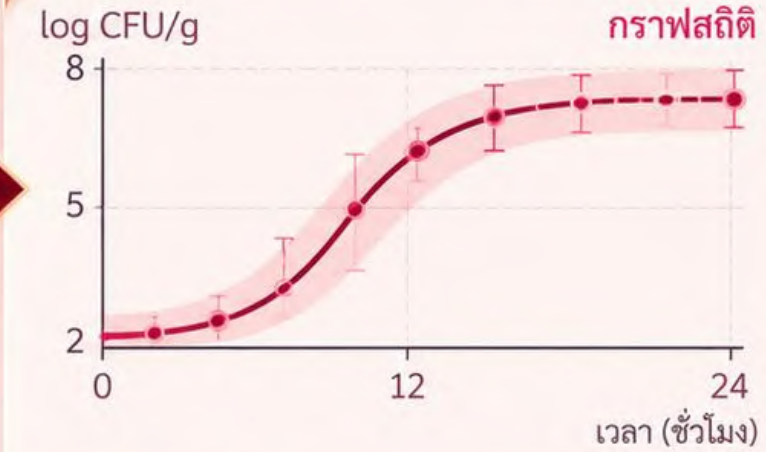
ความสัมพันธ์ไม่เชิงเส้น



- Random Forest Regression (RFR)
- XGBoost
- Artificial Neural Networks (ANN)

3 ผลทำนาย

จำนวนจุลินทรีย์ตามเวลา



ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่มีงานศึกษา

Listeria *Salmonella*
Pseudomonas

แนวทางทำนายจำนวนโดยตรง
ไม่ต้องฟิตแบบจำลองทุดิอุณหภูมิแยก

ประเมินความแม่นยำด้วย R^2 และ RMSE จากชุดข้อมูลทดสอบที่แยกไว้

แม่นยำ
ด้วยข้อมูลจริง

รวดเร็ว
รองรับสภาวะซับซ้อน

ประยุกต์ใช้ได้จริง
ในอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์

Dynamic HACCP
ทวนสอบจุดควบคุมวิกฤต

แบบจำลอง × เซ็นเซอร์ × การตัดสินใจ

1 ติดตามสภาวะจริง

เซ็นเซอร์บันทึกเวลา–อุณหภูมิ
ใช้อุณหภูมิผลิตภัณฑ์ทำนาย



2 ทำนายจำนวนจุลินทรีย์

แบบจำลองปฐมภูมิ + ทุติยภูมิ
คำนวณการเจริญตามข้อมูลจริง



ประเมินเวลา–อุณหภูมิร่วมกัน

กราฟสาธิต: 4 → 7 → 4°C





3 กำหนดขีดจำกัดวิกฤต

แบบจำลองช่วยออกแบบเกณฑ์
ยืนยันความใช้ได้กับผลิตภัณฑ์



4 ทวนสอบและตัดสินใจ

ทบทวนบันทึกและสอบเทียบ
เกินขีดจำกัด: กักสินค้าและแก้ไข



ประเมินการเบี่ยงเบนที่ CCP

ลดการทดสอบซ้ำที่ไม่จำเป็น
ยืนยันความปลอดภัยด้วยข้อมูลและแบบจำลอง

พร้อมคงการทวนสอบตามแผน HACCP
สอดคล้องมาตรฐานและข้อกำหนด

เพิ่มประสิทธิภาพและคุณภาพผลิตภัณฑ์
ลดความเสี่ยง ยืดอายุการเก็บรักษา

การลดอุณหภูมิซากสัตว์ด้วยแบบจำลอง

Carcass Chilling Optimization & Chilling Kinetics



1 เชื้อเป้าหมายนนผิวซาก

Salmonella และ *E. coli* O157:H7



2 เปรียบเทียบโปรไฟล์การเย็น

กราฟสำหรับสำชอ้มลอุณหภูมิผิวซาก



*7°C เป็นตัวอย่างเป้าหมาย ไม่รับประกันการหยุดเจริญ

3 การประยุกต์ใช้แบบจำลอง



ข้อมูลผิวซาก

อัตราการเริ่มต้นตามเวลา
และจำนวนจุลินทรีย์เริ่มต้น



แบบจำลองการเจริญ

ระบบปรับตัว (λ) และ
อัตราการเจริญ (μ)
เปลี่ยนตามเชื้อและสภาวะ



จำนวนจุลินทรีย์ที่ทำนาย

ใช้เลือกโปรไฟล์การเย็น
ยืนยันผลกับซากจริง

ความเย็นช่วยชะลอการเจริญ เชื้ออาจยังรอดชีวิต ต้องควบคุมสุขลักษณะร่วมด้วย

การทำนายอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์

การเจริญของจุลินทรีย์และเกณฑ์การเน่าเสีย

เก็บแบบมีอากาศ

Pseudomonas spp.



อาจเกิดกลิ่นผิดปกติและเมือก

10^7 CFU/g

เกณฑ์การเน่าเสีย (ตัวอย่าง)



บรรจุสูญญากาศ

แบคทีเรียกรดแลกติก (LAB)



บางสายพันธุ์สัมพันธ์กับการเน่าเสีย

อายุการเก็บด้านคุณภาพ = เวลาที่คาดว่าจะถึงเกณฑ์การเน่าเสีย

ใช้จำนวนเริ่มต้น อุณหภูมิ และสภาวะบรรจุ คำนวณเวลาถึงเกณฑ์

ยืนยันเกณฑ์กับคุณภาพทางประสาทสัมผัส และประเมินความปลอดภัยก่อนกำหนดวันหมดอายุ

ควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรคในเนื้อสัตว์พร้อมบริโภค
Listeria monocytogenes

เจริญได้แม้แช่เย็น

ความเป็นกรด
เลือกช่วง pH ให้เหมาะกับสูตร

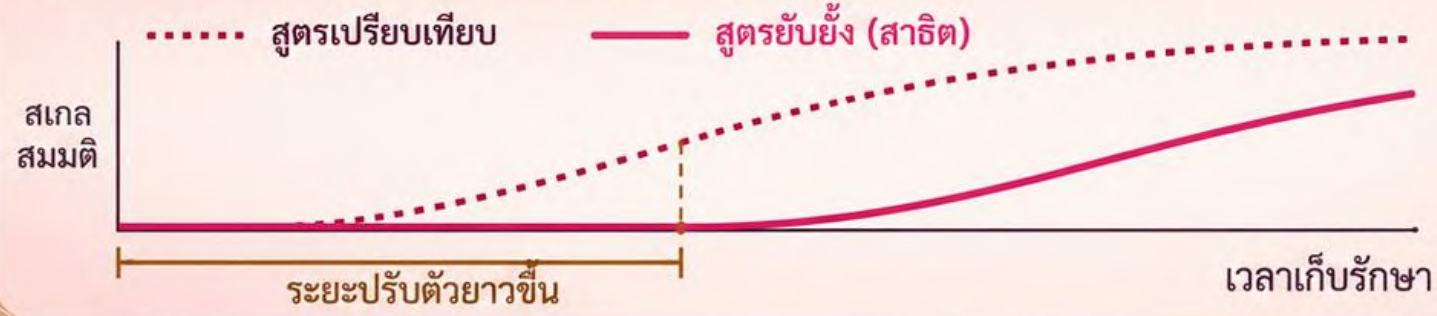
วอเตอร์แอคทิวิตีและเกลือ
ปรับน้ำที่จุลินทรีย์นำไปใช้ได้

สารถนอมอาหาร
โซเดียมแลคเตต + โซเดียมอะซิเตต



ไส้กรอก แฮม และโบโลญญา

กราฟสาธิต: การเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์



ขยายระยะปรับตัว (λ)
ประเมินการเจริญตลอดอายุการเก็บ

ยืนยันสูตรในผลิตภัณฑ์จริง
ร่วมกับการควบคุมการปนเปื้อนหลังปรุงสุก

USDA–FSIS: RTE ที่เปิดสัมผัสหลังปรุงสุกใช้แผนควบคุมตาม 9 CFR 430.4 ซึ่งมี 3 ทางเลือก

ควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรคที่สร้างสปอร์

Clostridium perfringens และ *Bacillus cereus*

1 ให้ความร้อน



ความร้อนลดเซลล์เจริญ
สปอร์บางส่วนอาจรอด

2 สปอร์รอดและอาจงอก



หากเย็นช้า อาจงอก
และเพิ่มจำนวน

3 ควบคุมการทำให้เย็น



ติดตามเวลา–อุณหภูมิแกนกลาง
คำนวณการเจริญด้วยแบบจำลอง

โปรไฟล์สาธิต: 55 → 15°C

สเกลเวลาสมมติ



ตัวอย่างเกณฑ์ FSIS

C. perfringens

≤ 1 $\log_{10}$
เพิ่มจำนวนไม่เกิน 10 เท่า

B. cereus: ประเมินแยก • ทำให้เย็นต่อถึงอุณหภูมิเก็บรักษาตามแผน

การป้องกันบรรจุภัณฑ์บวม

กรณีศึกษา: เนื้อสัตว์ปรุงสุกสไลซ์บรรจุบรรยากาศดัดแปลง (MAP)
Leuconostoc carnosum* และ *L. mesenteroides

บรรยากาศที่ใช้ศึกษา **30% CO_2 / 70% N_2**



บรรจุภัณฑ์ปกติ

แก๊สสะสมจนบวม

DMRI Predict
ช่วงสภาวะของแบบจำลอง

อุณหภูมิ	3–8°C
pH	5.3–6.5
เกลือในเฟสน้ำ	2–6%

สารถนอมอาหารที่ศึกษา
แลกเตต อะซีเตต และไนไตรต์

ทำนายการเจริญ แล้วปรับสูตร คุมความเย็น และเลือกฟิล์ม

ทดสอบยืนยันสูตรและฟิล์มจริงก่อนกำหนดอายุการเก็บรักษา

อายุการเก็บรักษาภายใต้อุณหภูมิผันผวน

กรณีศึกษา: เนื้อไก่และเนื้อวัวในห่วงโซ่ความเย็น



โรงงาน



รถขนส่ง



ตู้แช่ขาย



ฉลากเวลา–อุณหภูมิ (TTI)

โปรไฟล์อุณหภูมิสาธิต (4–15°C)



ฟิตข้อมูลพร้อมกัน (One-step)

Baranyi: การเจริญ / การรอดชีวิต: ใช้แบบจำลองเฉพาะ

ผลทำนายเนื้อไก่แบบมีอากาศ

อุณหภูมิคงที่ (แบบจำลอง Huang)

4°C	58	ชั่วโมง
15°C	16	ชั่วโมง

ประวัติอุณหภูมิและ TTI ที่สอบเทียบ ช่วยประเมินอายุการเก็บที่เหลือ

ข้อจำกัดของแบบจำลองและความแปรผันของเซลล์

กรณีศึกษา: จุลินทรีย์ก่อโรคในเนื้อสัตว์ (เช่น *Salmonella, L. monocytogenes*)



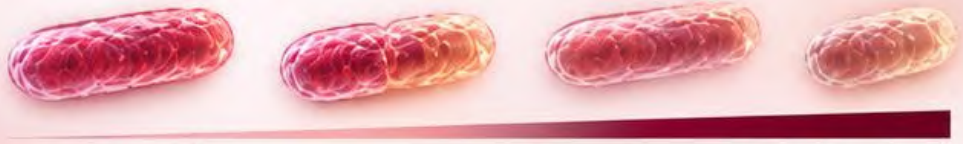
1 ประวัติอุณหภูมิ



ระยะปรับตัว (λ) อาจยาวขึ้น

เซลล์อาจปรับตัวต่อสภาวะเครียดก่อนเริ่มแบ่งตัว

ความต่างระหว่างเซลล์



ความทนทานต่ำ — ความทนทานสูง

จำนวนเริ่มต้นต่ำ เช่น <10 CFU/g

ค่าเฉลี่ยอาจแทนทุกเซลล์ได้ไม่ครบ

2 แบบจำลองเชิงสุ่ม (Stochastic)

จำลองหลายผลลัพธ์ที่เป็นไปได้



ความแปรผัน

เซลล์แต่ละตัวตอบสนองแตกต่างกันจริง

ความไม่แน่นอน

ข้อมูล / พารามิเตอร์ยังไม่แน่ชัด

ใช้ประวัติอุณหภูมิจริง รายงานช่วงผลทำนาย และยืนยันในผลิตภัณฑ์จริง

เทคโนโลยีไม่ใช้ความร้อน

การแปรรูปด้วยความดันสูง (HPP)

แรงดันส่งผ่านน้ำอย่างสม่ำเสมอทุกทิศทาง



ช่วงที่นิยมเพื่อลดจุลินทรีย์

400–600 MPa

งานวิจัยในเนื้อปรุงสุกศึกษา 100–600 MPa

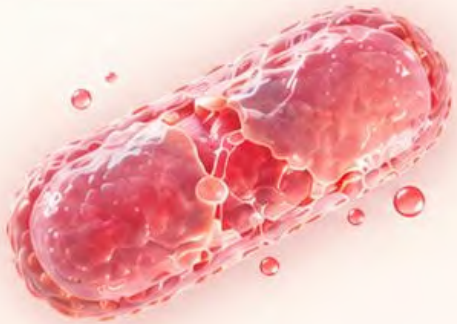
Listeria monocytogenes
E. coli* 0157:H7 และ *Salmonella

ผลต่อเซลล์จุลินทรีย์

เซลล์ปกติ



หลังใช้แรงดัน



เยื่อหุ้มเซลล์เสียหน้าที่

โปรตีนและเอนไซม์เปลี่ยนโครงสร้าง

ตัวอย่างผลวิจัยในเนื้อปรุงสุก

L. monocytogenes

> 4 $\log_{10}$ | 600 MPa / 3 นาที / 20°C

สีและเนื้อสัมผัสอาจเปลี่ยนตามสภาวะ ต้องทดสอบยืนยันในผลิตภัณฑ์จริง

PATP: แรงดันสูงผสานความร้อน

ก้าวข้ามข้อจำกัดของ HPP ที่อุณหภูมิห้อง เพื่อเพิ่มการทำลายสปอร์

แรงดันสูง **600 MPa** + อุณหภูมิเริ่มต้น **60–90 °C**



การอัดตัวทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น
ต้องวัดอุณหภูมิจริงและยืนยันเวลาที่เหมาะสม

ลดภาระความร้อนจากรีทอร์ท
มีศักยภาพลดเวลาและช่วยคงคุณภาพเนื้อสัตว์

การเก็บที่อุณหภูมิห้องต้องยืนยันความปลอดเชื้อเชิงพาณิชย์ในผลิตภัณฑ์จริง

พลาสมาเย็นและน้ำกระตุ้นด้วยพลาสมา

CAP ยับยั้งจุลินทรีย์บนผิวเนื้อ
(Cold Atmospheric Plasma)



RONS ทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และ DNA
UV มีส่วนร่วมแตกต่างกันตามระบบ

ตัวอย่างอกไก่ DBD 10 นาที:
ลด 2.1–2.7 log CFU/g

PAW กระตุ้นน้ำก่อนใช้ล้าง
(Plasma Activated Water)



ใช้ล้างผิวซากและอุปกรณ์
น้ำมี H_2O_2 ไนไตรต์และไนเตรต

ตรวจสารตกค้างและคุณภาพเนื้อก่อนใช้

ช่วยลดจุลินทรีย์ รักษาคุณภาพเนื้อ และเพิ่มความปลอดภัยในผลิตภัณฑ์จริง

อัลตราซาวด์กำลังสูงและคาวิเขชัน

คลื่นเสียงในของเหลวทำให้ฟองขยายและยุบตัวอย่างรวดเร็ว





ช่วยลดฟิล์มชีวภาพ

ใช้ร่วมกับการทำความสะอาดและฆ่าเชื้อ



ช่วยให้น้ำหมักซึมเข้าเนื้อ

ใช้ร่วมกับสารต้านจุลินทรีย์ธรรมชาติ

แสงพัลส์และ UV-C เพื่อควบคุมจุลินทรีย์

PL / แสงพัลส์พลังงานสูง (Pulsed Light)

200–1100 nm
พัลส์ระดับไมโครวินาที



ปฏิกิริยาแสงทำให้ DNA เสียหาย
ความร้อนเฉพาะผิวอาจช่วยเสริมฤทธิ์

ตัวอย่างแฮมสุก: *L. monocytogenes*
ลด ≈ 1.8 log CFU/cm²
ที่ปริมาณแสง 8.4 J/cm²

UV-C / 200–280 nm



เกิดไทมีนไดเมอร์ใน DNA
ขัดขวางการจำลอง DNA

ใช้กับสายพานและมีดในระบบปิด
ทำความสะอาดและลดเงาก่อนฉาย

แสงพัลส์และ UV-C ช่วยลดจุลินทรีย์บนผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์และอุปกรณ์แปรรูป
เสริมความปลอดภัยอาหารและยืดอายุการเก็บรักษา

RF และ Ohmic: ความร้อนภายในก้อนเนื้อ

เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นความร้อนภายในปริมาตร



RF: คลื่นวิทยุ
Radiofrequency Heating

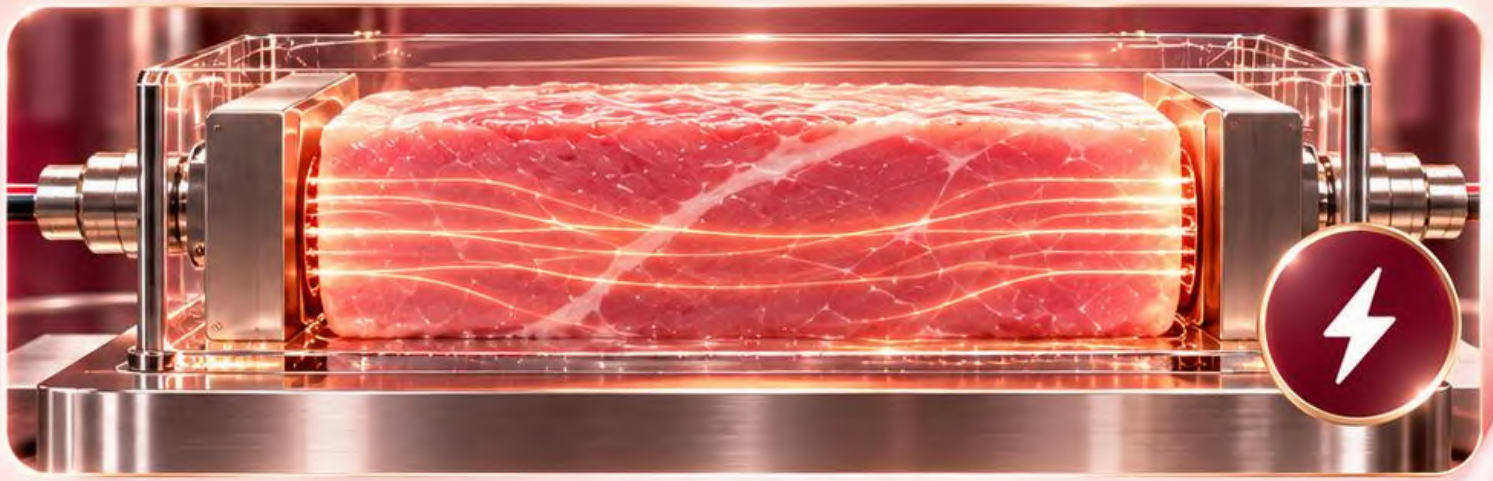
สนามไฟฟ้าสลับ

กระตุ้นไอออนและโมเลกุลมีขั้ว
เปลี่ยนพลังงานเป็นความร้อน
ภายในก้อนเนื้ออย่างรวดเร็ว

Ohmic Heating
การให้ความร้อนแบบโอห์มิก

กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเนื้อ

ความต้านทานไฟฟ้าของอาหาร
ทำให้เกิดความร้อนโดยตรง
และกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น



ช่วยลดเวลาและการร้อนเกินที่ผิว เมื่อออกแบบเหมาะสม

ความสม่ำเสมอขึ้นกับสูตรและรูปทรง • ต้องตรวจจุดเย็นและยืนยันการลดจุลินทรีย์

เทคโนโลยีหลายปราการและผลเสริมฤทธิ์

ผสานหลายกลไกเพื่อยืดอายุการเก็บรักษาเนื้อสัตว์



1 ลดจำนวนเริ่มต้น
HPP / CAP / Ultrasound

เทคโนโลยีทางกายภาพ



- **HPP** แรงดันสูง
- **Ultrasound** คลื่นอัลตราซาวนด์
- **CAP** พลาสมาเย็น

2 ยับยั้งต่อเนื่อง
Bacteriocins / Essential Oils

ร่วมกับบรรจุภัณฑ์แอคทีฟ



- **แบคเทอริโอซิน** ยับยั้งแบคทีเรีย
- **น้ำมันหอมระเหย** จากธรรมชาติ
- **บรรจุภัณฑ์แอคทีฟ** ปล่อยสารยับยั้งอย่างต่อเนื่อง

3 ชะลอการเจริญ แช่เย็น

ควบคุม pH และ a_w



- **อุณหภูมิต่ำ** ชะลอการเจริญของจุลินทรีย์
- **ควบคุม pH และ a_w** ลดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญ

ผลเสริมฤทธิ์: ผลรวมสูงกว่าที่คาดจากการใช้แยกกัน

ลดความรุนแรงของแต่ละวิธีได้ เมื่อยืนยันประสิทธิภาพและคุณภาพในผลิตภัณฑ์จริง

- ยืดอายุการเก็บรักษา
- คงคุณภาพเนื้อสัมผัสและสี
- เพิ่มความปลอดภัยของอาหาร

Mitigation of Chemical Hazards & Bio-Preservation

ลดอันตรายทางเคมี พร้อมต่อยอด Clean Label ด้วยชีวรักษ์



Bio-preservation

- **LAB** เช่น *Lactobacillus sakei* และ *Leuconostoc carnosum*
- สร้าง **Bacteriocins** ยับยั้ง *Listeria*
- **Bacteriophages** เจาะจงทำลาย *Salmonella* และ *E. coli* O157:H7
- แม่นยำสูง ไม่ทิ้งสารเคมีตกค้าง

Mitigation of Chemical Hazards

- เทคโนโลยีชีวภาพช่วยย่อยสลายหรือป้องกันการสะสมของสารถนอมอาหาร
- ลดความเสี่ยงจาก **Mycotoxins** และสารตกค้างในผลิตภัณฑ์
- สนับสนุนแนวทาง **Clean Label** และลดการพึ่งพาสารสังเคราะห์



ชีวรักษ์ช่วยควบคุมเชื้อ ลดสารเคมีตกค้าง และยกระดับความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์

แนวทางสำคัญของอุตสาหกรรมอาหารสมัยใหม่: แม่นยำ สะอาด และตอบโจทย์ Clean Label

Advanced Physical Hazard Detection Technologies

1 X-Ray Inspection Systems

ตรวจจับสิ่งแปลกปลอมความหนาแน่นสูง



2 Hyperspectral Imaging (HSI) & Computer Vision

ตรวจจับสิ่งแปลกปลอมความหนาแน่นต่ำ



เทคโนโลยีขั้นสูง ช่วยตรวจจับสิ่งแปลกปลอมในอาหารได้อย่างแม่นยำ

- เพิ่มความปลอดภัยของอาหาร
- ลดความเสี่ยงและการเรียกคืนสินค้า

Transition Paradigm:
Industry 4.0 vs. Meat Safety Industry 5.0

Industry 4.0
ระบบอัตโนมัติและการเชื่อมต่อดิจิทัล

ระบบอัตโนมัติ
หุ่นยนต์ทำงานเดี่ยว

ระบบไซเบอร์-กายภาพ
เชื่อมต่อข้อมูลแบบดิจิทัล

ประสิทธิภาพสูง
ผลิตได้รวดเร็ว
และสม่ำเสมอ



ข้อจำกัด


ความแปรผันของขนาด


ความแตกต่าง
ของโครงสร้างกระดูก


ความแตกต่าง
ของชั้นไขมัน


หุ่นยนต์อุตสาหกรรมดั้งเดิม
รับมือความแปรผันทางชีวภาพ
ได้จำกัด

Meat Safety Industry 5.0
ระบบที่มนุษย์และหุ่นยนต์ทำงานร่วมกัน เพื่อความปลอดภัยของเนื้อสัตว์

มนุษย์เป็นศูนย์กลาง
ผสานความเชี่ยวชาญ
ของมนุษย์กับเทคโนโลยี
อัจฉริยะ

**ความยืดหยุ่น
ล้มแล้วฟื้นไว**
พร้อมรับความแปรผัน
และปรับตัวได้รวดเร็ว

ความยั่งยืน
การผลิตที่ปลอดภัย
เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
และสร้างคุณค่าในระยะยาว



ผลลัพธ์

- ความปลอดภัยอาหาร ที่สูงขึ้น
- คุณภาพสม่ำเสมอ แม้มีความแปรผัน
- ลดการสูญเสีย และการใช้ทรัพยากร

การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-Robot Collaboration)

ใช้ Cobots ในพื้นที่ตัดแต่งเนื้อ เพื่อความปลอดภัยและคุณภาพที่ดีกว่า



ทำงานร่วมกันอย่างปลอดภัย

พนักงานและ Cobots สามารถทำงานเคียงข้างกันในพื้นที่ตัดแต่งเนื้อโดยไม่ต้องมีรั้วกั้น



ลดความเสี่ยงการปนเปื้อนข้าม

Cobots ทำหน้าที่จับยกหรือตัดชิ้นเนื้อ ช่วยลดการสัมผัสเนื้อสัตว์โดยตรงจากพนักงาน



ประโยชน์ของ Cobots ในอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์

ความปลอดภัยอาหาร
ลดความเสี่ยงการปนเปื้อนข้าม และรักษาคุณภาพเนื้อ

ความปลอดภัยพนักงาน
ลดภาระงานหนักและงานซ้ำ ๆ ช่วยลดการบาดเจ็บ

ประสิทธิภาพการผลิต
ทำงานต่อเนื่อง แม่นยำ และสม่ำเสมอ

ความยั่งยืน
สร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่ปลอดภัยและยั่งยืน

การยศาสตร์ในการทำงาน และชุดโครงบอสผ่อนแรง
(Physical Ergonomics & Assistive Exoskeletons)

ลดภาระงาน เพิ่มสุขภาวะพนักงาน เสริมความปลอดภัยในอุตสาหกรรมเนื้อสัตว์



ลดความเสี่ยงการบาดเจ็บ

ช่วยลดภาระที่กล้ามเนื้อและข้อต่อ
จากงานตัดแต่งเนื้อซ้ำ ๆ

ส่งกำลังผ่อนแรง

ระบบส่งแรงช่วยการเคลื่อนไหว
ของแขนและข้อมือ ขณะตัดแต่งเนื้อ

เพิ่มความแม่นยำ

ลดความเหนื่อยล้าและ
ความผิดพลาดในการตัดแต่ง

ผลลัพธ์ที่ได้

สุขภาวะพนักงานดีขึ้น
ลดการเกิดโรคกล้ามเนื้อ
และกระดูก

ความปลอดภัยสูงขึ้น
ลดอุบัติเหตุจากการทำงาน
ซ้ำ ๆ

คุณภาพการผลิตดีขึ้น
ตัดแต่งได้แม่นยำ
สม่ำเสมอ

การผลิตที่ยั่งยืน
รักษากำลังคน สร้างสภาพ
การทำงานที่ดีในระยะยาว

มีดตัดแต่งวัจฉริยะและเครื่องมือตัดแต่งอัจฉริยะ
(Intelligent Cutting Tools & Smart Knives)

ตรวจวัดและแยกแยะโครงสร้างเนื้อแบบเรียลไทม์ เพื่อการตัดแต่งที่แม่นยำและปลอดภัย





เซ็นเซอร์วัดแรง (Force Sensor)
ตรวจวัดแรงกด ขณะตัดแต่ง

เซ็นเซอร์ความต้านทานไฟฟ้า (Electrical Impedance)
ตรวจวัดความแตกต่าง ของเนื้อเยื่อ

เซ็นเซอร์สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy)
วิเคราะห์องค์ประกอบ ของเนื้อเยื่อ

การแยกแยะโครงสร้างเนื้อแบบเรียลไทม์

ส่งข้อมูลไปยังระบบควบคุมหุ่นยนต์

ปรับวิถีการตัดและแรงกดแบบเรียลไทม์

ประโยชน์ที่ได้รับ

เพิ่มความแม่นยำในการตัดแต่ง
แยกชั้นไขมัน กล้ามเนื้อ และกระดูก ได้อย่างถูกต้อง

ลดความเสี่ยงเศษกระดูกหลุดรอด
ป้องกันอันตรายทางกายภาพ ในผลิตภัณฑ์เนื้อ

เพิ่มประสิทธิภาพระบบหุ่นยนต์
ปรับแรงกดและวิถีการตัด แบบเรียลไทม์

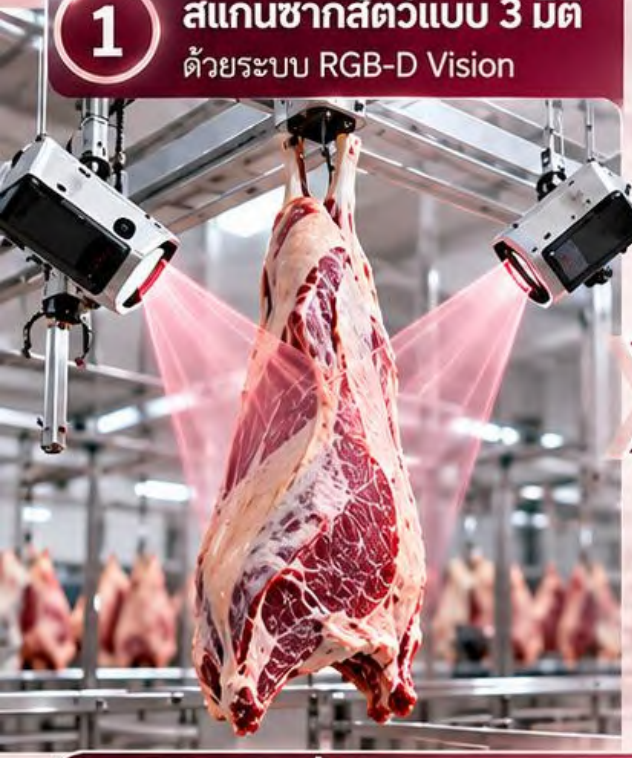
คุณภาพผลิตภัณฑ์ดีขึ้น
ได้ชิ้นเนื้อที่ได้มาตรฐาน ลดของเสีย

การมองเห็น 3 มิติ ข้อมูลมวลจุด และปัญญาประดิษฐ์
(3D Vision, RGB-D Point Cloud & Deep Learning)

สแกนโครงสร้างซากสัตว์ วิเคราะห์ด้วย AI เพื่อกำหนดจุดจับยึดและเส้นทางการตัดแต่งอย่างแม่นยำ



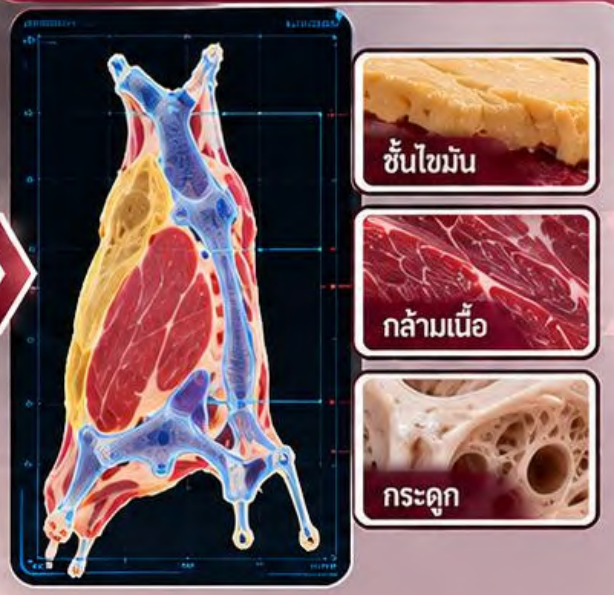
1 สแกนซากสัตว์แบบ 3 มิติ
ด้วยระบบ RGB-D Vision



2 สร้างข้อมูลมวลจุด 3 มิติ
(Point Cloud)



3 วิเคราะห์ด้วยปัญญาประดิษฐ์
(Deep Learning)
เช่น YOLOv3, U-Net และ Mask R-CNN



4 คำนวณจุดจับยึดและเส้นทางการตัด
ปรับตามความแปรผันของเนื้อแต่ละตัว



ประโยชน์ที่ได้รับ

เพิ่มความแม่นยำในการตัดแต่งเนื้อ
ปรับตามโครงสร้างของซากแต่ละตัว

รองรับความแปรผันทางชีวภาพ
ขนาด รูปร่างกระดูก และชั้นไขมันไม่เท่ากัน

ลดความเสี่ยงเศษกระดูกหลุดรอด
ตรวจจับและหลีกเลี่ยงโครงสร้างกระดูกได้อย่างแม่นยำ

เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต
กำหนดเส้นทางตัดและจับยึดแบบเรียลไทม์

โรงงานเนื้อสัตว์แบบเซลล์การผลิต
(Meat Factory Cells – RoBUTCHER Concept)
จากสายการผลิตแบบเส้นตรง สู่ระบบเซลล์การผลิตอัจฉริยะ



สายการผลิตแบบเส้นตรง (แบบเดิม)



รับซากสัตว์ → ตัดแต่ง → แปรรูป → บรรจุ → จัดเก็บ →

หากเครื่องจักรจุดใดจุดหนึ่งเสีย ทั้งโรงงานจะหยุดชะงัก และเชื้อจุลินทรีย์สามารถแพร่กระจายไปตามสายพานได้ง่าย



Meat Factory Cells (RoBUTCHER Concept)



จบในเซลล์เดียว



รับซากสัตว์ → ตัดแต่ง → แปรรูป → บรรจุ → จัดเก็บ

ประโยชน์ที่ได้รับ

- เพิ่มความยืดหยุ่นในการผลิต
- ลดการแพร่กระจายของเชื้อจุลินทรีย์
- สร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่ดีขึ้น
- เพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัย

ฝาแฝดดิจิทัล จมูกอิเล็กทรอนิกส์ และไอโอทีเพื่อการตรวจสอบย้อนกลับ
(Digital Twins, Smart E-Nose & IoT Traceability)

จำลอง ทำนาย เฝ้าระวังคุณภาพและความปลอดภัยตลอดห่วงโซ่การผลิตและการกระจายสินค้า



1 ฝาแฝดดิจิทัลของโรงงาน (Digital Twins)

จำลองกระบวนการผลิตเพื่อทำนายคุณภาพและความปลอดภัยล่วงหน้า



- อุณหภูมิ
- ความชื้น
- ความสด
- การปนเปื้อน
- ทำนายคุณภาพล่วงหน้า

2 จมูกอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ และเซ็นเซอร์ไอโอที (Smart E-Nose & IoT Sensors)

ตรวจจับกลิ่นระเหย (VOCs) เพื่อเฝ้าระวังความสดและการปนเปื้อตลอดห่วงโซ่ความเย็น



ประโยชน์ที่ได้รับ

- **ทำนายคุณภาพและความปลอดภัยล่วงหน้า** — ลดความเสี่ยงก่อนเกิดปัญหา
- **เฝ้าระวังการปนเปื้อนแบบเรียลไทม์** — ตลอดห่วงโซ่ความเย็น
- **เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการจัดการ** — ด้วยข้อมูลที่แม่นย้า
- **เพิ่มความเชื่อมั่นในความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์** — ตรวจสอบย้อนกลับได้ตลอดสาย

สรุปภาพรวม การกำกับดูแล และความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ และถาม-ตอบ

การบูรณาการเทคโนโลยีเพื่อยกระดับความปลอดภัยเนื้อสัตว์ในยุคใหม่



1 การสร้างแบบจำลองจลนศาสตร์อย่างแม่นยำ (Precision Kinetic Modeling)



ทำนายความเสี่ยงและกำหนดขีดจำกัดวิกฤต

2 เทคโนโลยียับยั้งเชื้อขั้นสูง (Advanced Interventions)



ยับยั้งเชื้ออย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่เสียคุณภาพ

3 อุตสาหกรรมเนื้อสัตว์ยุค 5.0 (Meat Safety Industry 5.0)



ระบบผลิตที่ยืดหยุ่น ปลอดภัย และมีมนุษย์เป็นศูนย์กลาง

ข้อพิจารณาด้านกฎหมายและกฎระเบียบ



ต้องปฏิบัติตามข้อกำหนดและรับรองจากหน่วยงานกำกับดูแล

ความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ (Cybersecurity)



ปกป้องข้อมูลและระบบ Cloud/IoT ตลอดห่วงโซ่การผลิต

ถาม-ตอบ (Q&A)

