الفصل العاشر

رفع جودة الفواكه والخضراوات المصنعة حرارياً لأعلى حد

Maximising the Quality of Thermaly Processed Fruits and Vegetables

إتش إس رماسوامي وسي. آر. شن، جامعة مك جيل

H. S. Ramaswamy and C.R. chen, McGill university

(١٠,١) مقدمة: تطور التصنيع/الحراري

Introduction: The Development of Thermal Processing

التصنيع الحراري أحد طرق الحفظ التقليدية والتي تضمن سلامة (مأمونية) الأغذية المصنعة وبقاءها صالحة (للاستهلاك) على الرف (shelf-stable). يرجع تاريخ أصل العمليات الحرارية التجارية إلى عام ١٨٠٩م عندما منح العالِم الفرنسي نيوكولاس أبيرت (Nicholas Appert) جائزة الحكومة الفرنسية لتطويره طريقة ناجحة لحفظ الأغذية، الطريقة التي في نهاية الأمر عرفت بالتعليب (canning). وجد أبيرت طريقة جديدة وفعالة لحفظ الأغذية، ولكنه لم يفهم لماذا منعت هذه الطريقة فساد الأغذية (food spoilage). وفي عام ١٨٦٤م فسر لويس باستور (Louis Pasteur) العالم الفرنسي الآخر أن العملية الحرارية تقتل (أو تثبط) الأحياء الدقيقة (microorganisms) التي تحد من فترة صلاحية الأغذية. قاد هذا (الكشف) إلى أسس/قواعد التطور والتقدم في

طرق التعليب والتي قادت إلى الثورة الصناعية (revolutionized the Industry). وفي تسعينيات القرن (1890)، أسس بريسكوت Prescott واندروود (Underwood) العلاقة بين البكتيريا المحبة للحرارة (thermophilic) وفساد الذرة المعلبة (canned corn) وفي الوقت نفسه تقريباً، اكتشف نفس نوع الفساد في البازلاء المعلبة بواسطة روسيل (Russell) في وسكونس (Wisconsin) وبارلو (Barlow) بولاية إلينويس (Illinois). وفي أوائل القرن التاسع عشر (1920, 1910) حددت الخواص الحيوية والسمية الأساسية لبكتيريا *الكلوستريديوم بوتشيلينيوم* (*Clostridium botulinum*) لأول مرة بواسطة عدد من الباحثين الأمريكيين. وقد أصبح واضحاً أهمية السيطرة على *C. botulinum* في الأغذية المعلبة، ومن ثم وضعت أسس السيطرة عليها. طور بيجيلو وآخرون (Bigelou *et al.*, 1920) لأول مرة الطريقة المؤسسة علمياً، لحساب عمليات التعقيم الآمن الأدنى (minimum safe sterilizaion processes) للأغذية المعلبة. وأصبحت هذه الطريقة تعرف بالطريقة (الأصلية original) أو الرَسْمية البيانية (graphical). ومن بعد ذلك، طوَّر بال (Ball, 1923) طرقاً نظرية لتقدير العمليات الحرارية. طور شولتز Schultz وأولسون (Olson) عام ١٩٤٠م طريقة حصرية دراسية معنية بهذا الحقل (nomographic) لتقديرات العملية. اعتمدت معظم التطويرات والاختراعات التالية، في هذا الحقل، على هذه المفاهيم المبكرة. طور استمبو (Stumbo, 1949) إجراءات لطرق حساب عمليات التعقيم اعتماداً على تكامل قيم القتل (leathality values) عبر كل حجم الإناء (container).

وقد طور هايا كاوا (Hayakawa) في ١٩٦٨م الطرق الرياضية الأكثر تطوراً وتقدماً والتي أبعدت أخطاء معينة بسيطة نسبياً، موجودة في الطرق الحسابية السابقة. ومنذ حوالي عام ١٩٧٠م، ساهم بال Ball واستمبو وهاياكاوا وعدة باحثين في مزيد

من صقل النماذج الرياضية (mathematical models) للعمليات الحرارية التصنيعية. وقد قادت الأعمال اللاحقة المتأخرة لـ (Telixeira *et al.*, 1969, Purohit and Stumbo, 1972 Lenz and Lund, 1977, Tung and Garland, 1979 etc) لاستخدام الحاسبات الآلية في الحسابات الدقيقة/الصحيحة والسريعة للعمليات الحرارية الروتينية، ولمراقبة/متابعة العمليات الحرارية وبسيطرة عليها بقياس مقدرة القتل المحددة على الخطوط الإنتاجية (on-line measurement).

(١٠,٢) أنواع العمليات الحرارية
Types of Thermal Process

يمكن تحقيق التصنيع الحراري للفواكه والخضروات بعدة تقنيات: استخدام الماء الساخن أو البخار (الطبخ (cooking)، السلق (blanching)، والبسترة (pasteurization)، والبثق (extrusion)) أو بالهواء الساخن، التجفيف (drying) والطاقة الإشعاعية (irradiated energy) (الميكروويف (microwave)، والأشعة تحت الحمراء (infrared radiation)، والأشعة المتأينة (ionising radiation)) والتي سيتم وصفها لاحقاً.

(١٠,٢,١) الطبخ (الطهي) Cooking

الطهي/الطبخ هو تقنية تصنيعية حرارية (heat-processing technique) هدفها الأساسي هو تحسين استساغة الغذاء. ويمكن اعتبارها شاملة لعدة عمليات (operations) تجرى بصفة شائعة في المنزل كالغلي (boiling) والخبز (baking) والشواء (broiling) والتحميص (roasting) والقلي (frying) واليخن الغلي البطئ بالماء أو المرق (stewing) وتختلف كل هذه العمليات عن بعضها البعض في طريقة تطبيق المعاملة الحرارية/طريقة استخدام الحرارة. تتم عمليتا الغلي واليخن(الغلي البطيء) بوضع المنتج في ماء يغلي (أو البخار)، ويتطلب الخبز والشواء والتحميص حرارة جافة حيث تجرى هذه

العمليات في أفران الهواء الساخن لتحسين وتغيير جودة أكل الأغذية (eating quality of foods).

يمكن اعتبار الطبخ تقنية حفظ ؛ لأن كثيراً من الأغذية المطبوخة يمكن تخزينها لأوقات طويلة تحت ظروف التبريد، مقارنة بوقت تخزين غيرها من الأغذية غير المطبوخة، إذا ما تم تقليل إعادة التلوث. يؤدي الطبخ إلى تحطيم أو خفض الحمل الميكروبي وتثبيط الإنزيمات غير المرغوبة، وهذه هي المتطلبات المهمة لتقنيات الحفظ. وكما يمكن للطبخ أن يثبط السموم الموجودة طبيعياً أو المنتجة من خلال التلوث الميكروبي (في الأغذية الطازجة أو المصنعة)، ويحسن الهضم (digestibility) ويغير اللون والنكهة والقوام لمقابلة متطلبات المستهلك. مرة أخرى، فبالرغم من أن الطبخ يحقق هذه الآثار المرغوبة، إلا أنه يؤدي أيضاً إلى فقد بعض العناصر الغذائية المعينة غير الثابتة حرارياً .

(١٠,٢,٢) السلق Blanching

السلق معاملة حرارية خفيفة (mild heat treatment) تستخدم لتثبيط إنزيمات الأكسدة/ الإنزيمات المؤكسدة (oxidative enzymes) في الفواكه والخضراوات قبل عمليات التصنيع (التعليب والتجميد والتجفيف)، والتي من غير ذلك ستؤدي إلى تغيرات غير مرغوبة في اللون والنكهة والقيمة التغذوية للمنتجات أثناء تداولها وتخزينها. بجانب تثبيط الإنزيمات، يؤدي السلق وظائف إضافية متعددة : يزيل غازات الأنسجة (tissue gases) (لتحقيق فراغ أفضل في العلب (better vacuum in cans) وخفض الضغط عند قفل العلب (reduce the strain on can closures)) أثناء التصنيع وخفض مستويات الأكسجين في العلب)، ويرفع معظم درجة حرارة الأنسجة (bulk temperature of the tissue) وينظف الأنسجة ويسبب ذبول الأنسجة (wilts the tissues)

ليسهل التعبئة، وفي بعض الأحيان، يساعد على تحسين (تثبيت fixing) لون الخضراوات الخضراء.

من أنظمة الإنزيمات المؤكسدة، يعتبر إنزيم البيروأُكسيديز (peroxides) هو الأكثر مقاومة للحرارة (most heat resistant)، وعليه، فقد استخدم تثبيط هذا الإنزيم تقليديا كمؤشر (index) لكفاية وفعالية السلق. السلق بالبخار والسلق بالماء الساخن هما تقنيتا السلق الأكثر شيوعاً واستخداما، وهما من العمليات البسيطة السهلة وغير المكلفة، ولكنهما يتطلبان طاقة مكثفة (energy intensive)، ويؤديان إلى تسرب (leaching) بالغ للمكونات الذائبة (والذي يحدث أثناء كل من التسخين والتبريد) وأيضاً، يُنتجان كميات كبيرة من ماء الصرف المتدفق.

لخص فيلوس (Fellows, 2000) ميزات وعيوب هذه التقنيات التي ستناقش لاحقاً.

التكاليف الرأسمالية للسلق التقليدي بالماء (conventional water blanching) منخفضة (lower capital cost) وله كفاءة طاقة أفضل (better energy efficiency) مما للبخار، ولكنه يؤدي إلى فواقد كبيرة للمكونات الذائبة في الماء (water-soluble components) تشمل فيتامينات وعناصر معدنية وسكريات. وأيضا يؤدي السلق بالماء إلى كميات كبيرة من ماء الصرف ومخاطر التلوث بالبكتريا المحبة للحرارة. باستخدام السلق بالبخار، فمن الممكن خفض حجم ماء الصرف بشكل كبير وبالمثل تقليل فواقد التسرب إذا ما تم استخدام التبريد الهوائي(air cooling) بديلا للتبريد بالماء. وعلى أي حال، قد لا يكون السلق منتظما وكاملا (uneven blanching) إذا سلق الغذاء في أكوام متعددة الطبقات (multilayer piles). تقنية السلق السريع الفردية (individual quick blanching (IQB)) (lazar *et al.*, 1971) تقنية مبتكرة (inovation based)، وتعتمد على

أساس، مرحلتي تسِّخين وحفظ للحرارة (two stage heat-hold principle)، وقد ثبت أو أُثبت أنها تحسِّن الاحتفاظ بالعناصر الغذائية بدرجة معنوية (كبيرة). قادت الجهود البحثية والهندسية إلى تطوير/إنتاج معدات السلق المحسنة التي يستخدم فيها البخار(المشبع (saturated) أو فائقة التسخين (superheated)) وإعادة تدوير((recirculation)) الماء الساخن لتحسين الاحتفاظ بالعناصر الغذائية وتقليل فواقد التسرب وتحسين كفاءة الطاقة (Cumming et al. 1984).

تستحدم طرق السلق غير التقليدية الأخرى الغاز الساخن المرطب (moiturized hot gas) والميكروويف وتقنيات التسخين بالمقاومة الكهربائية (ohmic heating techniques) مع التبريد الهوائي لخفض التسرب. يعتمد الوقت اللازم للسلق عادة (١٠ثواني- ١٥ دقيقة) على نوع وحجم الفاكهة والخضار ونوع السلق (الماء أو البخار أو الغاز الساخن أو الميكروويف) ودرجة حرارة وسط التسخين (heating medium) وبالمثل على طريقة التسخين.

(١٠,٢,٣) البسترة Pasteurization

البسترة معاملة حرارية خفيفة، أيضاً، وتجرى على الأغذية لتحطيم الكائنات الدقيقة النامية (الخضرية (vegetative microorganisms) خاصة الممرضات (pathogens) ولتثبيط الإنزيمات. ولأن العملية ليست قاسية بدرجة كافية لقتل مكونات الجراثيم (spore formers)، يجب تخزين أو حفظ الأغذية المبسترة مبردة في الثلاجة مثلاً، وذلك لتقليل الفساد الميكروبي. وأيضاً، نتيجة لاستخدام معاملة حرارية بسيطة، فإن الخواص الحسية والتغذوية للأغذية المبسترة لا تتأثر كثيرا. وتعتمد درجة شدة المعاملة الحرارية ومدة التخزين على طبيعة المنتج وأحوال الأس الهيدروجيني (pH conditions)

ومقاومة الكائنات الدقيقة المختبرة أو / والإنزيم وحساسية المنتج ونوع الحرارة المستخدمة (Fellows 2000 , Holdsworth,1997).

(١٠,٢,٤) التعقيم Sterilization

يتضمن التعقيم معاملة حرارية أكثر شدة تهدف إلى تحطيم (قتل) المرضات والكائنات الدقيقة المسببة للفساد (spoilage causing) في غذاء معبأ في بيئة محكمة الإغلاق (hermetically sealed enviorment) لمنع إعادة التلوث (recontamination). وتأخذ العملية في حسابها المقاومة الحرارية لمكونات الجراثيم بالإضافة إلى حساسية نموها (growth sensivity) للأكسجين والأس الهيدروجيني ودرجة الحرارة. يمنع وجود التفريغ في العلب نمو معظم الكائنات الدقيقة الهوائية (aerobic microorganisms) وإذا حفظت العلب على حرارة تبريد تقل عن ٢٥°م، فستسبب محبات الحرارة (heat resistant thermopiles) مشاكل بسيطة أو لا تشكل أي مشاكل بالمرة. ومن منظور الصحة العامة (public health perspective)، فإن أهم الكائنات الدقيقة في الأغذية قليلة الحموضة (pH 4,5) هي *الكوليستريديوم بتشيلينيوم* (C.botulinum) وهي ممرضة مقاومة للحرارة مكونة للجراثيم ولاهوائية، والتي إن بقيت بعد التصنيع (survives processing)، فقد تتمكن من النمو وتنتج سم البوتيوليزم المميت (botulism) في الأغذية. ولأن *الـ C.botulinum* ومعظم مكونات الجراثيم لا تنمو في وسط يقل فيه الأس الهيدروجيني عن ٤,٥ (أغذية حامضية ومتوسطة الحموضة (acid and medium-acid foods)، فإن معيار التصنيع لهذه الأغذية هو تحطيم الكائنات الدقيقة الخضرية المقاومة للحرارة أو الإنزيمات.

(١٠,٣) أسس التصنيع الحراري
Principles of Thermal Processing

الأغذية المعلبة التي تتعرض للتصنيع / المعاملة الحرارية ليست معقمة وعمليات التصنيع غير مصممة لتجعل تلك الأغذية معقمة. ولا يعتمد نجاح هذه

العمليات الحرارية على التحطيم الكامل لكل الكائنات الدقيقة مما يؤدي إلى تدني جودة المنتجات بسبب إطالة فترة التسخين كمتطلب. ولكن عوضا عن ذلك، تقتل كل الممرضات ومعظم مسببات الفساد من الكائنات الدقيقة الموجودة في عبوات محكمة الغلق، كما يهيئ ذلك بيئة داخل العبوة لا تساعد على نمو الكائنات الدقيقة المسببة للفساد وجراثيمها. وحقا، فإن طبيعة الأس الهيدروجيني للغذاء والبيئة (التفريغ) والقفل المحكم ودرجة حرارة التخزين والمعاملة الحرارية المعينة، جميعها، تمنع نمو الكائنات الدقيقة المسببة للفساد وتفي بمتطلبات واهتمامات الصحة العامة (public health concerns). عليه، لتحديد مدى المعاملة الحرارية، يجب معرفة عدة عوامل (Fellows.2000) : النوع والمقاومة الحرارية للكائنات الدقيقة المستهدفة (target microorganism) والجراثيم الموجودة أو الإنزيم الموجود في الغذاء، والأس الهيدروجيني للغذاء ؛ وظروف التخزين بعد العملية ؛ وظروف التسخين (heating conditions)والخواص الحرارية الفيزيائية (thermophysical properties) للغذاء وشكل وحجم العبوة.

(١٠,٣,١) المقاومة الحرارية للكائنات الدقيقة

Thermal Resistance of Microorganism

أكسجين والأس الهيدروجيني pH والحساسية للحرارة. يتم في الأغذية التي تعبأ تحت تفريغ في أوعية محكمة الغلق (hermetically sealed containers)، تحقيق مستويات أكسجين منخفضة قصداً. عليه ، فإن الظروف السائدة لا تساعد على نمو الكائنات الدقيقة التي تتطلب الأكسجين (الهوائية الإجبارية (obligate aerobes) وتؤدي إلى فساد الغذاء أو المشاكل الصحية العامة (public health problems). زيادة على ذلك، فإن جراثيم البكتيريا الهوائية الإجبارية أقل مقاومة للحرارة من الجراثيم الميكروبية (micrbial spores) التي تنمو في ظروف لاهوائية (anaerobic conditions) أي اللاهوائية

الإجبارية أو الاختيارية (facultative or obligate anaerobes). إن نمو ونشاط هذه الكائنات الدقيقة اللاهوائية يعتمد بصورة أساسية، على الأس الهيدروجيني (pH). ومن ناحية التصنيع الحراري، تقسم الأغذية إلى ثلاث مجموعات حسب الأس الهيدروجيني:

١- أغذية عالية الحموضة (أس هيدروجيني أقل من ٣,٧).

٢- أغذية متوسطة الحموضة (أس هيدروجيني أكثر من ٣,٧ وأقل من٤,٥).

٣- أغذية منخفضة الحموضة (أس هيدروجيني أعلى من ٤,٥).

إن أهم فرق في تصنيف الأس الهيدروجيني، خاصة بالرجوع إلى المعاملة الحرارية، هو الخط الفاصل بين الأغذية الحامضية والأغذية منخفضة الحموضة. ومن المعروف بصفة عامة، أن الكوليستريديوم بوتشيلينيوم (C.botulinum) لا تنمو وتنتج سمًّا على أس هيدروجيني أقل من ٤,٦. عليه، فإن الأس الهيدروجيني المقسم بين المجموعة الحامضية والمجموعة المنخفضة الحموضة قد حدد بـ ٤,٥. في مجموعة الحموضة المنخفضة (أس هيدروجيني أعلى من٤,٥)، تحطيم جراثيم الكوليسريديوم بوتشيلنيوم هو الهدف أو الهم الأساسي في هذه العمليات، وعلى أي حال، قد تكون هناك كائنات دقيقة أخرى، على سبيل المثال: *الباسيلس استيروثيرموفايلس* (*Bacillus stearothermophilus*) *والباسيلس ثيرموا اسيدورانس* (*Bacillus thermoacidurans*) *والكوليستريديوم ثيرموساكارولييتيكوم* (*C. thermosachaarolyticcum*)، و كل هذه، أكثر مقاومة للحرارة من *الكوليستريديوم بوتشيلينيوم*، ولكنها بصفة عامة، محبة للحرارة في طبيعتها (درجة حرارة النمو المثلى حوالي ٥٠ ـ ٥٥م)، وعليه تنال اهتماما أقل إذا خزنت العلب المصنعة على حرارة أقل من ٢٥م.

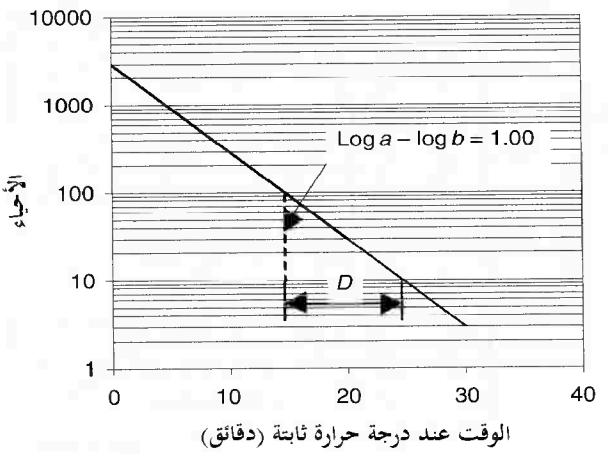
حركيات التحطيم (القتل) الميكروبي Microbial destruction kinetics :

لتأسيس جدولة للتصنيع الحراري، يجب تحديد معدل التحطيم الحراري للكائنات الدقيقة المختبرة / المعنية، وذلك في الظروف السائدة في العبوة، عادة، وذلك من أجل تحديد وقت تسخين مناسب على درجة حرارة محددة. زيادة على ذلك، لأن الأغذية المعبأة لا يمكن تسخينها إلى درجة حرارة التصنيع فورياً (instantaneously)، فهناك حاجة أيضاً، لمعلومات حول اعتمادية درجة الحرارة لمعدل التحطيم الميكروبي (temperature dependence of the microbial destruction rate). وذلك من أجل تكامل الأثر التحطيمي (destruction effect) من خلال مستويات درجة الحرارة تحت ظروف التصنيع.

منحنيات النجاة وقيمة دي Survivor curves and D-value : تفيد البراهين أن التحطيم الحراري للكائنات الدقيقة يتبع تفاعلا من المرحلة أو الدرجة الأولى (first order reaction) مما يشير إلى أنه نظام لوغريثمي للقتل (Logarithmic order for death) (الشكل رقم ١٠,١)، يعرف معدل التحطيم الحراري بوقت خفض عشري (decimal reaction time d-value) وهو وقت التسخين بالدقيقة عند درجات حرارة محددة مطلوبة تؤدي إلى خفض بمقدار عشري (٩٠٪ تحطيم) للمحتوى الميكروبي الموجود surviving microbial population). بيانياً (graphically)، يمثل هذا مدى الوقت الذي يمر له منحنى البقاء خلال دورة لوغريثمية (الشكل ١- ١٠). رياضياً:

$$D = \frac{(t_2 - t_1)}{[\log (a) - \log (b)]} \qquad (١٠,١)$$

حيث إن a وb يمثلان الكائنات الباقية بعد التسخين لـ تي ١ ($t1$) و تي ($t2$) دقيقة، على التوالي.



الشكل رقم (١٠,١). منحنى نموذجي للبقاء.

وقت القتل الحـــراري والقيمـــة دي Thermal death time (TDT) and D-value : في ميكروبيولوجيا الغذاء كثيراً ما يستخدم مصطلح آخر، هو وقت القتل الحراري (TDT)، ويعني وقت التسخين المطلوب لقتل أو تحطيم الميكروبات. يتم الحصول على بيانات وقت القتل الحراري بتعريض مجموع الميكروبات لسلسلة معاملات حرارية عند درجات حرارة معينة والبحث عن ما يبقى منها (حياً). يمثل وقت القتل الحراري الوقت بين التحطيم الذي يتم في أقرب وقت (shortest destruction) وأوقات البقاء الأطول امتداداً (longest survival times). والقتل في هذه اللحظة، و بصفة عامة، يشير إلى فشل مجموعة ميكروبية معينة، بعد المعاملة الحرارية للنمو إيجابياً في بيئة محددة، ولتوضيح نمو إيجابي في وسط (بيئة) الزراعة الفرعية (subculture media). وبمقارنة طريقة وقت القتل الحراري مع طريقة التحطيم العشري، من السهولة ملاحظة أن قيمة القتل الحراري تعتمد على الحمل الميكروبي الأول (initial microbial load)، بينما لا تعتمد قيمة التحطيم العشري (دي) على ذلك.

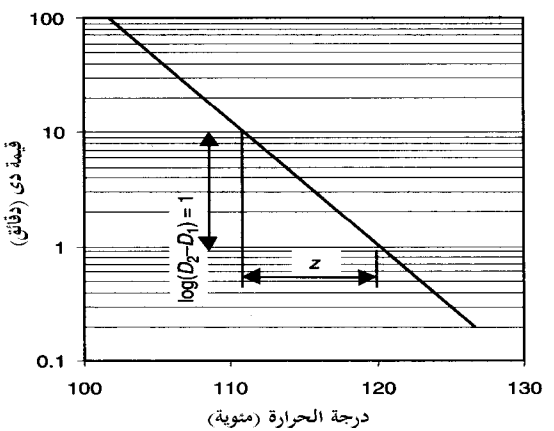
الاعتمادية الحرارية وقيمـــة – زد Temperature dependence and z-value:

تعتمد قيمة دي (D -value) وبشدة، على درجة الحرارة المستخدمة. عادة، يعبر عن الحساسية الحرارية لقيمة – دي عند درجات حرارة مختلفة، بمنحنى مقاومة حرارية (thermal resistance curve) مع رسم لوغاريثم قيم دي مقابل الحرارة (الشكل ٢-١٠). ويعرف مؤشر الحساسية الحرارية (temperature sensivity indicator) كقيمة – زد والتي تمثل مدى درجات حرارة تنتج أو تؤدي إلى تغير بمقدار عشرة أضعاف في قيم – دي، أو بالرسم البياني تمثل مدى درجات الحرارة التي يمر من خلالها منحنى قيم – دي من خلال دورة لوغريثمية واحدة. وتكتب رياضياً:

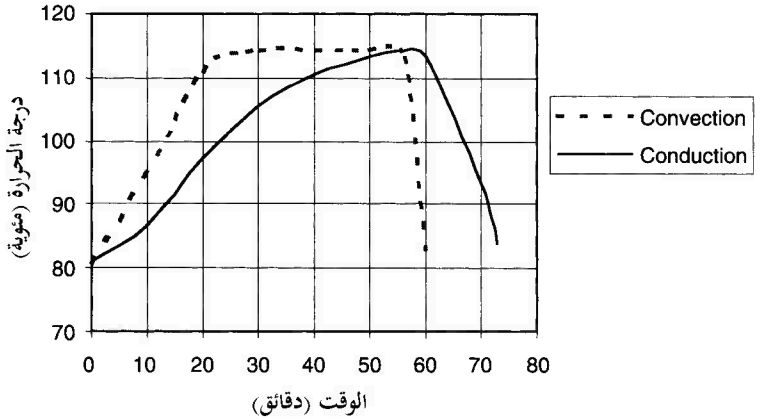
$$Z = \frac{(T_2 - T_1)}{[\log(D_1) - \log(D_2)]} \qquad (١٠,٢)$$

حيث إن D_1 وD_2 هي قيم D على T_1 وT_2 على التوالي. يمكن الحصول على قيمة – دي عند أي درجة حرارة معينة من شكل معدل للمعادلة (٢- ١٠) باستخدام قيمة – دي مرجعية (reference d-value) أي (D_0) عند درجة حرارة مرجعية، T_r وهي عادة ١٢١°م للتعقيم الحراري(thermal sterilization).

$$D = D_0 10^{(Tr-T)z} \qquad (١٠,٣)$$



الشكل رقم (١٠,١). منحنى مقاومة حرارية نموذجي.



الشكل رقم (١٠,٣). اختراق حراري نموذجي.

مفهوم القتلية lethality concept: القتلية (قيمة إف ، (F-value)) هي قياس للمعاملة الحرارية أو قياس لعمليات التعقيم. ولمقارنة السعات التعقيمية النسبية (relative sterilizing capacities) للعمليات الحرارية ، نحتاج لتأسيس وحدة قتلية (unit of lethality). وللفهم بصورة أكثر وضوحاً وللقناعة ، تعرف هذه بمكافئ التسخين لمدة دقيقة (equivalent heating of I min) عند درجة حرارة مرجعية ، والتي عادة تحدد بـ ١٢١°م لعمليات التعقيم. عليه فإن قيمة — إف ترمز إلى جمع ضرب معين (certain multiple) أو جزء من قيمة دي اعتماداً على نوع الكائن الحي الدقيق ؛ لذا ، فإن علاقة مثل المعادلة رقم (١٠,٣) أمر جيد فيما يتعلق بقيمة- إف.

$$F = F_0 10^{(Tr-T)/z} \qquad (١٠,٤)$$

إذ إن F_0 في هذه الحالة هي قيمة إف عند درجة الحرارة المرجعية (T_r). ويعرف منحنى وقت القتل الحراري المرجعي أو الصورة أو المثال التجريبي (phantom) بأنه منحنى مواز لمنحنى وقت القتل الحراري الحقيقي أو منحنى المقاومة الحرارية (أي له

نفس قيمة – زد) وله وقت قتل حراري (TDT) (قيمة- إف) تبلغ ١ دقيقة عند ١٢١°م. ومع مثال تجريبي(تحديد منحنى وقت القتل الحراري)، فمن الممكن شرح التأثيرات القاتلة لأي جمع بين الوقت ودرجة الحرارة في شكل دقائق مكافئة عند ١٢١°م أو قتلية:

$$F_0 = F10^{(T-Tr)/} \quad (١٠,٥)$$

للعمليات الحقيقية حيث يمر الغذاء خلال مستوى (مدى) من الوقت- درجة الحرارة، يجب أن يكون استخدام هذا المفهوم لتحقيق تكامل التأثيرات القاتلة من خلال مختلف مجموعات الوقت – درجة الحرارة. إن القتلية الجمعية المتحصل عليها هكذا لعملية ما، تعرف بالقتلية العملية (process lethality) وأيضاً يمثل/يعبر عنها بالرمز (symbol) اف (F_0). وزيادة على ذلك، بالإشارة أو الرجوع إلى حالة التصنيع، يمكن توضيح أن القتلية ترتبط بموقع محدد (عادة المركز الحراري (thermal center) أو أي موقع يتم اختياره اعتباطياً(arbitrarily chosen location) أو متكامل فوق العبوة. ومن ناحية السلامة (المأمونية) الميكروبيولوجية (microbiological safety point of view)، فإن ضمان أدنى قتلية (minimal lethality) عند المركز الحراري، هو الأهم، بينما من ناحية الجودة، فمن المرغوب والمطلوب خفض التحطيم الشامل.

(١٠,٣,٢) منحنيات تغلغل الحرارة Heat Penetration Curves

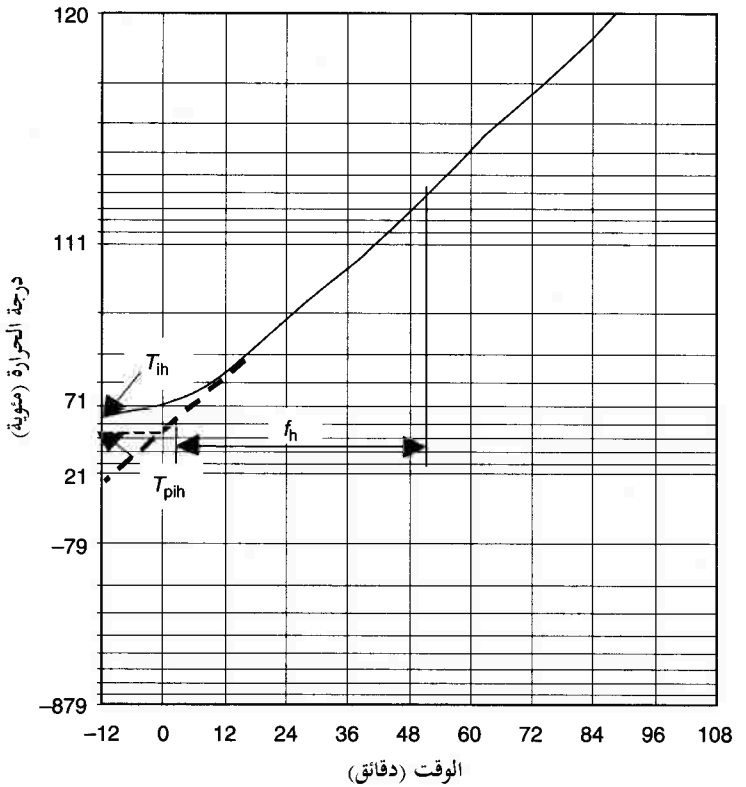
يوضح الشكل رقم (١٠,٣) منحنيات الوقت-درجة الحرارة البسيطة أثناء التسخين والتبريد بالتوصيل الحراري (conduction heating) والحمل الحراري (convection heating). تستخدم الطرق العامة والطرق العامة المحسنة (general and improved general) لحساب عمليات هذا النوع من المعلومات. وفي المقابل تستخدم معظم طرق المعادلات (formula methods) بيانات تغلغل الحرارة (heat penetration data) المتحصل عليها من الرسومات البيانية شبه اللوغريثمية (semilogarthmic polt)

(polt لفروق درجة الحرارة (T_R-T) على تدريج لوغريثمي ، (T_R-T on log Scale) بين درجة حرارة المعقم المرجعية (T_R) retort ودرجة حرارة المنتج (T) مقابل الوقت (على محور سيني linear abscissa) كما هو موضح في الشكل رقم (١٠,٤) (رسم جاكسون البياني (Jackson plot)). ويمكن تحقيق هذا بسهولة بتدوير الورقة شبه اللوغريثمية (semilog paper) خلال ١٨٠ °م و ترميز الخط الأعلى الأفقي (top Line) ١ درجة مئوية أقل من درجة حرارة المعقم، ومن ثم رسم درجات الحرارة بيانياً مباشرة رقم (١٠,٤). ويمكن الحصول على مؤشر معدل التسخين (f_h) heating rate idex) كميل سالب (negative reciprocal slope) لجزء الخط المستقيم من المنحنى أو الوقت ليعبر دورة لوغريثمية واحدة. تم الحصول على عامل التأخير جي إتش j_h lag factor باستخدام العلاقة التالية :

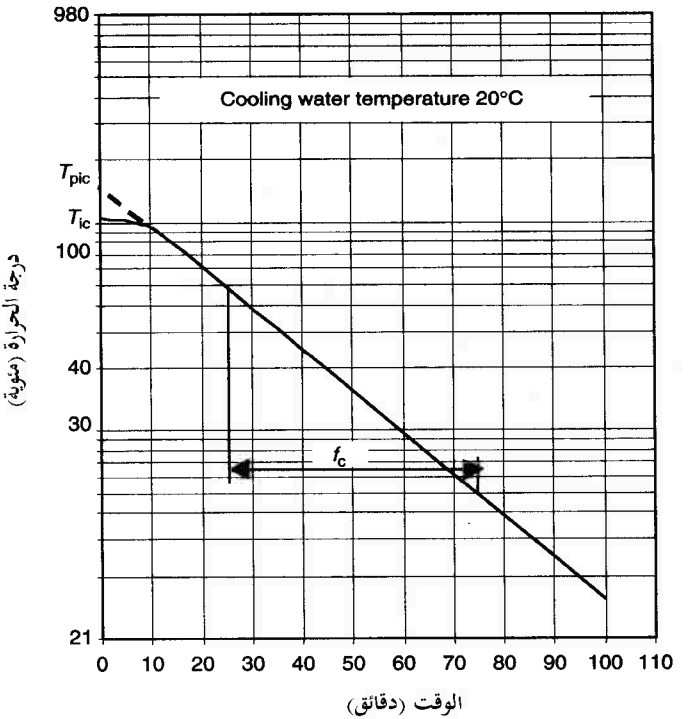
$$J_h = (T_R - T_{pih}) / (T_R - T_{ih}) \qquad (١٠,٦)$$

حيث إن T_R هي درجة حرارة المعقم، و T_{ih} هي درجة حرارة المنتج الابتدائية، وT_{pih} هي درجة حرارة المنتج الابتدائية المفترضة (pseudo-initial product temprature).

ويستخدم رسم بياني مشابه لـ (T-T_w) فرق درجة الحرارة بين المنتج ودرجة حرارة ماء التبريد أثناء التبريد (الشكل رقم ١٠,٥) للحصول على قياسات التبريد. ولرسم المنحنى البياني للتبريد تحفظ الورقة شبه اللوغريثمية في الوضع الطبيعي ويعلم الخط القاعي (bottom line) ١ °م فوق درجة حرارة ماء التبريد وترسم درجات الحرارة مباشرة، بيانيا. ومن هذا الرسم البياني يمكن الحصول على مؤشر معدل التبريد fc (cooling rate index) وعامل التأخير جي سي (j_c lag factor) ، بالمثل.



الشكل رقم (١٠,٤). رسم بياني شبه لوغاريثمي لمنحنيات التسخين. إف إتش معامل معدل الحرارة (دقائق)، وتي أي إتش درجة حرارة الغذاء الأولية عند بدء التسخين والتي ب آي إتش هي درجة الحرارة الأولية الزائقة أثناء التسخين.



الشكل رقم (١٠,٥). رسم بياني شبه لوغاريثمي لمنحنيات التبريد إف سي. f_c هي مؤشر معدل التبريد (دقيقة) والتي أي سي T_{ic} درجة حرارة الغذاء الأولية عند بدء التبريد.

(١٠,٤) حسابات التصنيع الحراري

Themal process Calcufalions

إن الغرض من حسابات التصنيع الحراري/العمليات الحرارية هو الحصول على وقت تصنيع مناسب تحت منظومة ظروف تسخين معينة (given set of heating conditions) تمكّن من أو تؤدي إلى قتلية عملية، أو عوضا عن ذلك، تقدير القتلية العملية لعملية معينة. ويجب أن تعمل الطريقة، وبشكل صحيح، على تكامل الآثار المساعدة /المؤدية للقتل للاستجابة الحرارية العابرة للغذاء الذي يخضع للتصنيع

الحراري فيما يتعلق بالكائنات الحية الدقيقة المختبرة/المعنية من ناحيتي الاهتمام بالصحة العامة والاهتمام بالفساد. أعيد تأسيس درجة القتلية فيما يتعلق بالوقت المكافئ عند درجة حرارة مرجعية (Tr) وقد صممت العمليات لتوفير أدنى قيمة موضوعة/ محددة مسبقا عند المركز الحراري. المعادلة الرئيسة الواجب حلها هي المعادلة الأساسية الصحيحة غير الكسرية التكاملية (lasic integral equation) للقيمة القتلية المجمعة (accumulated lethelity value)

$$F = {}_0^t\int 10^{(T-T)_r^z}dt \qquad (١٠,٧)$$

بشكل واسع ، تُقسَّم طرق حساب العملية (procecs calclation methods) إلى نوعين: طريقة عامة وطرق معادلات (formula methods).

(١٠,٤,١) الطريقة العامة General Method

الطريقة العامة التي اخترعها/صممها بايجيلو وآخرون (Bigelow et al, 1920) هي الأبسط والأكثر دقة مقارنة بالطرق الأخرى ، والتي تشمل تكاملاً رسمياً بيانياً أو تكاملاً عددياً (graphicl of numerical integration) للمعادلة (٧-١٠).

تم تكامل الآثار القاتلة عند مختلف مجموعات الوقت- درجة الحرارة في عملية حرارية بحيث تكون سببا للقتلية المجمعة الكلية ، إذ يعتبر أن لكل درجة حرارة قيمة تعقيم. يعتمد حساب وقت العملية على المعادلة التالية:

$$\frac{F_t}{F_{T_r}} = 10^{(T_r-T)/z} = \text{TDT} \qquad (١٠,٨)$$

وعلى أي حال ، لتحديد/تقدير الآثار القاتلة عند أي درجة حرارة T ، يستخدم عكس(reciprocal) المعادلة (١٠,٨). من بعد ذلك يستخدم معدل القتلية (lethality rate)

(١/وقت القتل الحراري) في طريقة تكامل رسم بياني (graphical integration procedure) لحساب أوقات العملية الحرارية (lund, 1975). إن دقة هذه الطريقة تعتمد أساساً على مدى صحة/ضبط قياسات درجة الحرارة، وبالمثل الفترات (الأوقات) الفاصلة لهذه القياسات. وتعرف هذه الطريقة بالطريقة العامة المحسنة، إذ إنها صحيحة/دقيقة ولا تعتمد على افتراضات حول تغلغل الحرارة، ولكنها متعبة مجهدة (laborious) (Stumbo, 1973; Lund, 1975; Fellows, 2000).

(١٠,٤,٢) بعض طرق المعادلات Some Formula Methods

من أجل تقدير وقت التصنيع أو القتلية المجمعة تحت ظروف تصنيع محددة بسهولة وسرعة، فقد طورت كثير من طرق المعادلات (Ball, Stumbo, phan etc) منذ العشرينيات من القرن العشرين (1920s).

تعتبر طريقة بال (Ball method) هي أبسط الطرق والتقنية الأكثر استخداما لحسابات التصنيع. وتعتمد هذه الطريقة على المعادلات التالية (١٠.٩) إلى (١٠.١١) والمشتقة من منحنى اختراق الحرارة، وذلك لتقدير وقت التصنيع، بي B (دقائق):

$$B = f_h \log[j_h(T_R - T_i)]/(T_R - T) \qquad (١٠,٩)$$

حيث إن f_h هو مؤشر التسخين و J_h هو معامل تأخير التسخين. ويرمز للفرق في درجات الحرارة (T_R-T) عند نهاية الطبخ بـ g_c وهو مفتاح تقدير وقت التصنيع باستخدام المعادلة (١٠.١٠). أسس بال علاقة بين f_h/U و g في شكل جدول وشكل (figure)، حيث إن U قد عرفت كـ:

$$U = F_0 F_i \qquad (١٠,١٠)$$

$$F_i = 10^{(121.1-T_R)/z} \qquad (١٠,١١)$$

حيث إن Fo هي القتلية التصنيعية المطلوبة/المرغوبة و Fi هو عدد الدقائق عند درجة حرارة المعقم المكافئ لـ ١ دقيقة عند ١٢١,١°م.

عند اشتقاق العلاقة الموضحة سابقاً بين f_h/U و g، افترض بال بعض الافتراضات كالتالي: $f_h = f_c$, $j_c = 1.41$, $z = 10^0C$ وأن منحنى التبريد يكون أساسا قطعاً زائداً (hyperbolic) يتبع ذلك أن يكون لوغريثميا (logarithmic). وأصبحت هذه الافتراضات بعض المحددات (المعوقات) لاستخدام طريقة بال.

ومن أجل التغلب على محددات طريقة بال، نشر استومبو Stumbo ولونجليي Longley (١٩٦٦م) جداول محددة (z of 12 to 22) لـ $f_h/U:g$ والتي إليها تعزى الفروقات/الاختلافات في قيم j لمنحنيات التبريد. تم التوصل إلى علاقات هذه الجداول بالطرق اليدوية باستخدام طريقة عامة للتكامل. لاحقاً وضع جين وآخرون (Jen *et al.*, 1971) جداول ممثلة (represcntative) لـ $f_h/U:g$ والتي يتم الحصول على قيمها بطريقة الفروق المطلقة بالحاسب (computerized finite difference method) لـ تيكسيرا وآخرين (Teixeira *et al.*, 1969)، نقح بيوروهت (puohit) واستومبو (١٩٧٢م) طريقة جين وآخرين (١٩٧١م) المذكورة سابقاً ووضع جداول منفصلة (٥٧ مجتمعة). تغطي قيم (Z-Values) من ٨ °ف إلى ٢٠٠° ف والتي سهلت أو مكنت من أن تستخدم طريقة استومبو لتحطيم مختلف الكائنات الدقيقة، مثل الجراثيم البكتيرية والخلايا الخضرية (vegetative) أو العناصر الغذائية.

طور فام (Pham 1987) منظومتين لمعادلات جبرية بسيطة وجداول مبسطة لحسابات العمليات الحرارية، واحدة لـ الـ $U/f_h > ١$ والأخرى لـ $U/f_h < ١$. وادعى فام (١٩٨٧م) بأن طريقته توفر قيماً على الأقل، تماثل دقتها دقة طريقة استومبو، وأنها أكثر براعة (متعددة الجوانب)؛ لأن جدوله الوحيد بديل لـ ٥٧ جدولاً نشرها استومبو.

عدل فام (١٩٩٠م) معادلاته لتغطي أحوال لا تختلف فيها معدلات /سرعات التسخين والتبريد، أي $f_h \neq f_c$.

(١٠,٥) التصنيع الحراري والجودة
Thermal Processing and Quality

(١٠,٥,١) خواص جودة الأغذية Quality Proprties of Foods

الجودة أو درجة الامتياز (degree of excellence): مصطلح نسبي (relative term) وكما هو مستخدم في الأغذية، يفسر "بالخواص التي تجعل الغذاء مقبولاً للشخص الذي يأكله". بعض عوامل/خواص جودة الأغذية مهمة فيما يتعلق بتقدير مأمونيتها وقبولها (safety and acceptability). يحدث فقد لبعض الجودة نتيجة للعمليات التصنيعية، بينما قد يحدث فقد إضافي أثناء التخزين. إن صلاحية غذاء (shelflife) ما هي إلا الفترة التي يتوقع أن يحتفظ فيها هذا الغذاء بمستوى جودة معينة محددة مسبقا، في ظروف تصنيع أو تخزين محددة. وقد وصفت الجودة بأنها مجموع عدة عوامل (kader, 1985 : المظهر والقوام والنكهة والقيمة التغذوية ومكونات المأمونية (safety components). في النقاش التالي حول الجودة المرتبطة بالأغذية المصنعة حراريا، تم الاهتمام بالنشاطات الميكروبيولوجية والإنزيمية (microbiolgical and enzyme activities) والجودة التغذوية (nutrtional quality) والخواص الحسية (organoleptic properties).

النشاط الميكروبيولجي Microbiological activity

بصفة أساسية، صممت العمليات الحرارية لإزالة أو تخفيض عدد الكائنات الدقيقة إلى مستوى مقبول (التعقيم التجاري) وتوفير ظروف تحد من نمو الكائنات الدقيقة الممرضة والمسببة للفساد. وتعتمد معاملة البسترة على تخزين الأغذية المصنعة تحت ظروف تبريد لفترة قصوى محددة، بينما يقصد من عمليات التعقيم أن تنتج

منتجات ثابتة قابلة للحفظ (shelf-stable) لها فترة حفظ طويلة (long storage life). *الكوليستريديوم بوتشيلينيوم C. botulinum* هي الكائن المفتاحي (الأساسي) فيما يتعلق بالصحة العامة وفيما يتعلق بتعقيم الأغذية منخفضة الحموضة (pH > 4.5) بينما تأتي أهمية المفسدات الأخرى من الكائنات الدقيقة فيما يتعلق بالأغذية الحامضية.

النشاط الإنزيمي Enzyme activity

تسبب كثير من الإنزيمات (البيروأُكسيديز peroxidases) والليبوكسيجينيز (Lipoxygenase) والبيكتين استيريز pectinesterase) إذا لم تثبط تغيرات جودة غير مرغوبة في الأغذية أثناء حفظها وحتى عند ظروف تبريدها. وكثيراً ما يُستخدم تثبيط الإنزيمات المقاومة للحرارة (heat-resistant enzymes) بكتين استيريز والفوسفاتيز (phosphatase) والبيروأُكسيديز كعمل أساسي. في التصنيع الحراري يتم تثبيط معظم الإنزيمات سواء بوجود عمليات مخصصة لذلك، أو لأن مقاومة هذه الإنزيمات أقل من مقاومة الأحياء الدقيقة المراد التخلص منها، وأخذها مؤشراً لذلك. وقد ذكر أن لبعض الإنزيمات المؤكسدة (oxidative enzymes) حساسية منخفضة جداً للحرارة (low temperature sensitivity) مقارنة بالكائنات الدقيقة (Lund, 1975). وتبلغ قيمة زد (Z-value) النموذجية للإنزيمات حوالي ٣٠°م مقارنة بقيمة زد للكائنات الدقيقة البالغة ١٠°م. ويعني هذا أنه بالنسبة للتثبيط على ١٠٠°م، إذا استخدمت حرارة تصنيع (process temperative) تبلغ ١٣٠°م، فإن معدل تثبيط الإنزيمات سيرتفع بمقدار عشرة أضعاف (10-fold) بينما يرتفع معدل تثبيط الكائنات الدقيقة بمقدار ألف ضعف (1000 fold). عليه، قد تؤدي العملية الناجحة في كل من تثبيط الإنزيمات والتحطيم الميكروبي على درجات حرارة منخفضة إلى نشاط إنزيمي متبقٍّ (residual enzyme activity) إذا جرت على درجات حرارة مرتفعة (أكثر من ١٣٠°م). لقد تسبب هذا الجانب في بعض

الاهتمامات بعمليات التعقيم (خالية من التلوث الجرثومي (aseptic processes) التي تتضمن مواد/قطع خاصة (Toledo and Chang, 1990).

الجودة التغذوية Nutritional quality

زاد وعي المستهلكين بالمحتوى التغذوي والعوامل السمية (toxic factors) والجودة الميكروبيولوجية للأغذية، ذلك عند اتخاذ قرارات اختيارهم وشرائهم (للأغذية). تشمل المجموعات العامة للعناصر التغذوية الكربوهيدرات والدهون والبروتينات والفيتامينات والعناصر المعدنية. ولقد لاقت العناصر التغذوية اهتماما واسعا كخواص جودة (Lund 1982 a, b, c; Thompson, 1982)؛ لأن العناصر التغذوية ضرورية وحساسة للمحافظة على الصحة وقد تُقيَّم تقييماً إيجابياً باستخدام الأجهزة.

الخواص الحسية Organoleptic properties

تستخدم التقييمات الحسية للحكم على قوام ونكهة ومظهر المنتجات الغذائية. يمكن أن تتكون لجان التحكيم الحسي من محكمين مختارين يمكنهم اكتشاف الفروقات الحسية (sensory differences) أو وصف خواص المنتج، أو المستهلكين غير المدربين الذين يبدون استجابات فعالة (affective responses). يمكن أن تساعد التقييمات الحسية التي يقوم بها محكمون مدربون في تقييم مدى تأثير العمليات الحرارية على العوامل الحسية (organoleptic factors). الآن، تستخدم الطرق الفعلية الموضوعية قياسات اللون والنكهة والقوام بالأجهزة (instrumental)، والتي تقارن وتتطابق جيداً مع النتائج الحسية، في قياس الخواص الحسية للأغذية والتنبؤ بها. أيضاً، تنال خواص القوام والخواص الريولوجية (الانسيابية، (rheological properties)) الاهتمام؛ وذلك لوجود ارتباط قوي بينها وبين الخواص الوظيفية لمكونات الأغذية.

(١٠,٥,٢) تأثير المعاملات الحرارية على جودة الغذاء

Effect of Thermal Processing on Food Quality

كما ذكر سابقاً، فإن استخدام تقنيات التصنيع الغذائي التي تطيل توافر (صلاحية) الأغذية القابلة للفساد (availability of perishable foods) تحد من توافر بعض العناصر الغذائية الأساسية، أيضاً. إن الاحتفاظ بالعناصر التغذوية لأقصى حد ممكن أثناء التصنيع الحراري كان تحديا كبيرا للصناعة الغذائية (Lund, 1988). لقد قسمت فواقد العناصر التغذوية الناتجة من التصنيع إلى ثلاث فئات: فواقد مقصودة (intentional) وبالصدفة (accidental) والتي لا يمكن تفاديها (inevitable) (Bender, 1978). يتم إزالة بعض أجزاء الغذاء غير المرغوبة قصدا، على سبيل المثال تقشير الفواكه والخضروات. تحدث فواقد الصدفة أو التي يمكن تفاديها نتيجة لعدم كفاية الضبط (inadequate control) وسوء تداول المواد الغذائية (food material). إن الهم الرئيس من ناحية التصنيع الغذائي هو الفواقد التي لا يمكن منعها، والتي تعني فواقد العناصر التغذوية التي لا تتحمل الحرارة أي تحطمها الحرارة (heat–labile) بدرجة ما. ويعتمد مدى هذه الفواقد على طبيعة المعاملة الحرارية (السلق أم البسترة أم التعقيم) والمواد الخام (raw materials) والإعداد السابق للتصنيع (preprocessing preperation)، وذلك لأن العمليات التصنيعية (operations) مثل تقليل الحجم والتقطيع والتقطيع إلى شرائح (dicing and slicing) تؤدي إلى زيادة الفواقد من خلال زيادة نسبة السطح للحجم (surface–to–volume ratio). قد تكون كل الفيتامينات الذائبة في الماء (water-solube vitamins) والعناصر المعدنية، وبالمثل بعض أجزاء البروتينات والكربوهيدرات الذائبة، عرضة للفقد (susceptible to losses). إن التركيز الأساسي في العمليات التشغيلية هو خفض هذه الفواقد التي لا فكاك منها من خلال اتخاذ وضبط ظروف وقت ودرجة حرارة التصنيع السليمة (proper time-temperature processing conditions)

وبالمثل ضبط العوامل البيئية المناسبة (التركيز (concentration)) والأس الهيدروجيني pH إلخ) وما يتعلق أو يرتبط بمنتجات غذائية محددة وعناصرها التغذوية المستهدفة.

تأثير السلق Effects of Blanching

ربما يمثل السلق أقل معاملة حرارية شدة مقارنة بكل العمليات الحرارية الأخرى، وعلى أي حال، قد يحدث فقد للعناصر الغذائية أثناء السلق، ذلك بسبب آثار أخرى مثل الفقد في ماء السلق (leaching) واعتماداً على طريقة السلق والمنتج/ والعناصر الغذائية المعنية، فقد يصل فاقد المعادن والفيتامينات إلى ٤٠٪ وخاصة في فيتاميني سي (ج) والثيامين، ويصل الفقد في السكريات إلى ٣٥٪، وفي البروتينات والأحماض الأمينية إلى ٢٠٪. وبالإضافة إلى العناصر الغذائية، فقد يتم فقد المكونات السامة (مثل النترات والكادميوم الموجودة طبيعياً في الخضراوات، وقد يقلل مستوى الكائنات الدقيقة الملوثة، وكل ما ذكر أخيرا فوائد ومميزات يتم تحقيقها بالسلق. وقد يؤدي السلق إلى بعض التغيرات غير المرغوبة في اللون والناتجة من الهدم الحراري (thermal degradation) لصبغات الكلوروفيل الزرقاء الخضراء (blue–green chlorophyll) إلى الفيوفيتينات الصفراء– الخضراء (yellow-green pheophytins). وهذه حساسة للأس الهيدروجيني (sensitive to pH) ووجود أيونات المعادن (metal ions). يحفز الأس الهيدروجيني القاعدي (alkaline pH) وعوامل الخلب (chelating agents) الاحتفاظ باللون الأخضر بشكل أفضل. وبالرغم من أن تدهور القوام (texture degradation) خاصية مميزة لمعظم المعاملات الحرارية، إلا أنه قد اتضح أن السلق على درجات حرارة منخفضة يحسن قوام بعض المنتجات (الجزر والبقول الفاصوليا (bean)) والبطاطس والطماطم والقرنبيط (الزهرة (cauliflower)) نتيجة لتثبيط البكتين ميثايل استيريز (pectin methyl esterase (selman 1988)).

تأثيرات البسترة Eflects if Pasteurization

مرة أخرى تتأثر الخواص التغذوية والحسية لمعظم الأغذية تأثراً بسيطا بعملية البسترة، ذلك بسبب معاملتها الحرارية الخفيفة الهينة (mild heat treatment) (lund, 1988). وعلى أي حال، بسبب أنها عملية مؤقتة لتمديد فترة الصلاحية، فإن جودة المنتج تستمر في التغير (التدهور (deteriorate)) أثناء التخزين. وتعتمد فترة الصلاحية على أحوال تعبئة ما بعد البسترة (post-pasteurization packaging) وبيئة التخزين. والسبب الرئيس لتغيرات اللون في الفواكه والخضراوات هو النشاط الإنزيمي (البولي فينولواكسيديز polyphenoloxidases) ووجود الأكسجين. إزالة الهواء (deaeration) قبل البسترة تبعد الأكسجين، وتثبط المعاملة الحرارية نشاط الإنزيم مما يقلل تدهور لون الفواكه والخضراوات.

تأثيرات التعقيم Effects of Sterilization

وكما جاء في المناقشة مبكرا، تكون معاملات التعقيم أكثر شدة فيما يتعلق بالمعاملة الحرارية المستخدمة بصفة عامة، لتحقيق الثبات التجاري (commercial stability). ومن الواضح، فإن هذه المنتجات ستتعرض لفواقد كبيرة في العناصر الغذائية، والعناصر التالية أكثر حساسية للتحطيم بالحرارة: فيتامين أ (A) وب$_{٦}$ (B$_6$)وب$_{٢}$ (B$_2$) وب$_{١}$ (B$_1$) وسي (ج(C)) و د(D) وإي (هـ(E)) وحمض الفوليك (Folic acid) والاينوسيتول (inositol) وحمض البانتوثينيك (pantothinic acid) والأحماض الأمينية اللايسين (lysine) والثيريونين (threonine). وباستخدام عمليات مجمعة عديدة للوقت- الحرارة (بلا حدود infinite) لتحقيق التعقيم الحراري، فإن تأثير العملية لا يمكن تقديره كمياً بسهولة.

وقد عرف المدى التالي للتدهور الحراري للعناصر الغذائية في عملية التعليب (Lund, 1982, a,b and c): فيتامين ج ٣٣-٩٠٪، والثيامين (ب١) ١٦-٨٣٪ والريبوفلافين (ب٢) ٢٥- ٦٧٪، والنياسين صفر- ٧٥٪ والفولسين (folacin) ٣٥-٨٤٪ وحمض البانتوثينيك ٣٠-٨٥٪ وفيتامين ب٦ صفر-٩١٪ والبيوتين صفر- ٧٨٪ وفيتامين أ صفر- ٨٤٪. إن شدة المعاملة الحرارية يحددها الأس الهيدروجيني للغذاء (تتطلب الأغذية منخفضة الحموضة مزيداً من الوقت في المعاملة الحرارية لضمان تحطيم (قتل) *الكوليستريديوم بوتشيلينويم C. botulinum*، وبمحتوى الغذاء (البروتينات والدهون والتركيز العالي للسكروز ترفع مقاومة الكائنات للحرارة) والسلوك التسخيني (heating behavior) للغذاء (التوصيل الحراري والتوصيل بالحمل) وطبيعة وحجم وشكل العبوة وطبيعة وطريقة استخدام وسط التسخين (heating medium). وتمثل عوامل تحريك/هز العبوة (container agitation) والتصنيع المعقم متغيرات إضافية.

القوام أحد أهم محددات الجودة في الفواكه والخضراوات، وعلى سبيل المثال، عندما تفقد الفواكه والخضراوات قوامها، أي عندما تصبح مشبعة بالماء (soggy) ومتدهورة القوام (mealy) وقابلة للمضغ (chewy) أو ليفية (filorous) فإنها ستُرفض من قبل المستهلك (Ball, 1923). تغيرات القوام في اللحوم المعلبة سببها التخثر/التصلب (cogulation) وفقد البروتينات المقدرة على مسك الماء والتي تنتج انكماشاً (shrinkage) وتصلباً (stiffening) للعضلات. يعتبر قوام الفواكه والخضراوات عادة أطرى (softer) من قوام المنتج غير المصنع، وذلك بسبب ذوبانية المواد البكتية (pectic material) وفقد اكتناز الخلايا (cell turgor) (Fellows, 2000).

تعتمد فواقد الفيتامينات التي تسببها الحرارة على: ١- الفروقات في أنواع الأغذية. ٢- وجود الأكسجين المتبقي في العبوة. ٣- طرق الإعداد (التقشير والتقطيع

والتقطيع إلى شرائح) أو السلق. إن المحافظة على فيتامين (ج) والنكهة هما أهم عوامل الجودة في عصير الفواكه (Sizer, *et al.*, 1988) وعليه فمن المهم أن تصنع العصيرات وتعبأ وتخزن في ظروف تمكّن من المحافظة على خواص الجودة المذكورة سابقاً. إن إزالة هواء العصير وتعبئته في بيئة خاملة (inert enviroment) من العمليات الضرورية لإبعاد تأثيرات الأكسجين المتلفة لفيتامين ج واللون والنكهة.

(١٠,٥,٣) حركيات تحطيم الجودة Kinetics of Quality Destruction

لتحقيق الأهداف الأساسية للتصنيع الحراري، (أي المحافظة على عوامل الجودة أقرب إلى الكمال، وكذلك توفير غذاء خال من المخاطر (risk free food))، فمن الضروري الحصول على بيانات كمية (quantitative) حول الهدم/التحطيم الحراري للكائنات الدقيقة، والإنزيمات وعوامل الجودة. وقد أجريت كثير من الدراسات حول حركيات هدم هذه المكونات والتي تم تلخيصها في كثير من الأوراق العلمية (articlas). (Lund, 1975, Tragardh and Paulson, 1985, Vilota and Hawkes, 1986, Fellows, 2000)) وبصفة عامة، فإن فقد القيمة التغذوية والجودة قد اتفقت مع حركية التفاعل ذات الرتبة صفر أو الرتبة الأولى (fit zero or first order reaction kinetics) (Labuza, 1932, Labuza and Riboh, 1983)

$$-(dC/dt) = kC^n \qquad (١٠,١٢)$$

حيث إن C هي تركيز خاصة الجودة المطلوبة، وt هو الوقت، وK هو ثابت معدل التفاعل (reaction rate constant) وn هو رتبة التفاعل(reaction order) . وبافتراض معدل تفاعل الرتبة الأولى، يمكن إيجاد وقت النقص العشري (decimal reduction) دي (D) مرتبطاً ارتباطاً تبادلياً (reciprocally related) بـ k ($D = 2.303/k$). وباستثناء

التفاعلات الضوئية/الكيميائية (photochemical reactions) وبعض التفاعلات الفيزيائية، فإن معدل ثابت تفاعل ما(rate constant of a reaction) ، يعتمد اعتماداً كبيرا على درجة الحرارة. عادة تتم نمذجة العلاقة بين المعدل الثابت ودرجة الحرارة إما بمعادلة أرهينيوس (Arrhenius equation):

$$k = k_0 e^{-E_a/RT} \qquad (١٠,١٣)$$

حيث إن k هو ثابت معدل التفاعل عند T ، وk_0 عامل التكرار (frequency factor) وE_a هي طاقة التنشيط (activation energy) وR هو ثابت الغاز (gas constant) وT هي درجة الحرارة المطلقة (absolute temp) أو بمفهوم وقت القتل الحراري (TDT):

$$D = D_0 10^{(T_0 - T)/z} \qquad (١٠,١٤)$$

حيث إن دي D هو وقت النقص العشري عند (T) و(D_0) هي قيمة دي (D-Value) عند T_0 مرجعية (T_0 refernce) (عادة هي ١٢١ر١°م) وz هي مدى درجة الحرارة المطلوب لتغيير الدي D بمعامل يبلغ ١٠.

ولا بد من الحذر عند تطبيق هذه المفاهيم في الأغذية بسبب الطبيعة المتغايرة (heterogenous nature) للأغذية والتغيرات الطورية (تغير الدهون الصلبة إلى الطور/الوجه السائل (liquid phase)) مع ارتفاع درجة الحرارة (Labuza, 1982). زيادة على ذلك، فإن هذا الشرح أو التوضيح يعتبر تبسيطاً مبالغاً فيه، (مفرط over) (simplification) لأنه يؤدي إلى معدل تفاعلات غير متوقعة في كثير من الحالات، خاصة في سوء التقدير (أو التقدير الناقص) (underestimation) لدنترة البروتين.

وبافتراض أن (N_0) و(N) أعداد ميكروبات (microbe counts) و(C_0) و (C) تركيزات عنصر غذائي مختبر قبل وبعد التصنيع، على التوالي؛ و (Dn_0) و(Dn) و(Dc_0) وD أوقات نقص/ خفض عشرية للكائنات الدقيقة (الرمز السفلي إن (n subscript))

والعنصر الغذائي (الرمز السفلي سي (subscript *c*))، على التوالي ودرجة الحرارة المرجعية هي (T_0) ودرجة حرارة التصنيع هي (T)، فإن التحطيم النسبي للعناصر الغذائية وعلاقته بالكائنات الدقيقة، قد يوجد باستخدام المعادلة التالية (١٥-١٠) من راماسوامي وعبدالرحيم (١٩٩١) (Ramaseamy and Abdelrahim):

$$\log(C/C_0) = (D_{n0}/D_{c0})\log(N/N_0)10^{(T_0-T)(1/z_n-1/z_c)} \quad (١٠,١٥)$$

وتكتب معادلة بديلة بالرموز المشابهة (similar notations)، ثابت معدل التفاعل k وطاقة تنشيط (E_a) ودرجة حرارة مطلقة (T) باستخدام طريقة أرهينيوس (Arrhenius) كالتالي:

$$\ln(C/C_0) = (k_{c0}/k_{n0})\ln(N/N_0)e^{(1/T_0-1/T)(E_{ac}-E_{an})/R} \quad (١٠,١٦)$$

ويمكن استخدام المعادلتين [١٥-١٠] و[١٦-١٠] بسهولة، لحساب مدى تدهور أي عنصر غذائي بالتناسب مع المجموعة الميكروبية عند أي درجة حرارة تصنيع محددة، شريطة أن تكون بيانات حركية التفاعل لكليهما معروفة. وباستخدام طريقة طبخ الـ بوت (طبخ البوتيوليزم، (bot cook approach))(١٢ دي (12 D) *للكولستريديوم بوتشيلينيوم* (*C. botulinum*)، (D_{n0})= ٠,٢١ دقيقة، و (Z_n)= ١٠ °م)، يمكن حساب الاحتفاظ بالثيامين (دي (D_{C0})= ١٦٠ دقيقة (160 min)، (Z_c)= ٢٥ °م ليكون ٥١,٢ ٪ عند ١٠٠ °م مقارنة بـ ٩٩,٥٪ عند ١٣٥ °م (المعادلة ١٦- ١٠)، مما يعني احتفاظاً أفضل للعناصر الغذائية عند درجات حرارة مرتفعة. وتم الحصول على نتائج مماثلة باستخدام طريقة أرهنيوس (Arrhenius) (k_{n0}= 11 min^{-1}, k_{c0}=0.0144 min^{-1}; E_{an}= 70 kcal $.mol^{-1}$, E_{ac}= 29. 4 Kcal mol^{-1}).

وبالرغم من أن الطريقتين (الـ TDT والـ Arrhenius) قد افتُرض أن تكونا متوافقتين (reconcilable) عبر مدى حراري بسيط (منخفض) (Lund, 1975)، فلابد من

الحذر عند التقدير الاستقرائي للنتائج، خاصة عند استخدام القياسات المحولة من نظام لآخر. فقد ينشأ تعارض/ تناقض إذا استخدمت القياسات المتحصل عليها عند درجات حرارة منخفضة تحت ظروف المعاملة الحرارية الفائقة(U H T conditions) (Ramaswamy *et al.*, 1989).

(١٠,٦) أسس الوضع الأمثل للعمليات الحرارية (جعلها في أكمل وجه)

Principles for Optimizing Thermal process

(١٠,٦,١) أسس الوضع الأمثل للعمليات الحرارية الغذائية

Principles of Optimization for Food Thermal Processing

إن القياسات الحركية (kinetic parameters) (D and Z) للكائنات الدقيقة والإنزيمات وعوامل جودة الأغذية، مختلفة، وتستغل هذه الحقيقة لتعديل العمليات الحرارية لإزالة المخاطر الميكروبية والاحتفاظ بجودة الأغذية التغذوية والحسية. يمكن تعريف العملية الحرارية المثلى بأنها المعاملة الأدنى المطلوبة لتحقيق التعقيم التجاري (commercial sterility) لأن تكاليف التسخين وفواقد جودة المنتج ترتفع إذا امتد وقت العملية. إن إجراءات إيجاد أفضل الحلول يمكن تلخيصها في الخطوات الأربع التالية:

١- الوظائف الإيجابية ومتغيرات اتخاذ القرار (objective functions and decision variables).

٢- النماذج الرياضية (mathematical models).

٣- المعوقات (constraints).

٤- تقنيات البحث (searching techniques).

للتصنيع الحراري للأغذية، تشمل أهداف إيجاد أفضل الأوضاع/الحلول، الاحتفاظ بأقصى درجة متوسطة من الجودة (maximum average quality retention) والاحتفاظ بالجودة السطحية (surface quality retention) والتصنيع في أقل وقت(minimum process time) والذي يفي بالقيمة القتلية المطلوبة في مركز العلبة أو أبرد نقطة (coldest spot) فيها. العوامل المؤثرة على هذه الأهداف المثلى كثيرة، وتشمل الخواص الحرارية للغذاء وحجم وشكل العلب ودرجة حرارة المعقم والقياسات الحركية لعوامل الجودة (D and Z)، وقيمة القتل المطلوبة وما إلى ذلك، ولكن عادة ما تكون متغيرات القرار (decision variables) التي يمكن تعديلها لغذاء معبأ معين، هي فقط درجة حرارة المعقم للتصنيع بدرجة حرارة ثابتة (constant processing retort temp (CRT) أو مستوى درجة حرارة المعقم (retort temperature profile) للتصنيع بحرارة المعقم المتغيرة (variable retort temp (VRT) processing). ويعني هذا أن جعل التصنيع الحراري بحرارة المعقم الثابتة (CRT) في أحسن ما يمكن، ينتمي إلى تعديل أحادي المتغير (single variable optimization)، بينما ينتمي جعل التصنيع الحراري بحرارة المعقم المتغيرة (VRT) في أحسن ما يمكن، إلى تعديل متعدد المتغيرات، إلا أن لوظائف الـ VRT أكثر من قياسين، عادة. والخطوة الثانية هي تطوير ووضع نماذج رياضية (mathematical models) تصف العلاقات بين المتغيرات القرارية والأهداف. كبح بعض المشاكل ضروري للوصول إلى الوضع الأمثل (optimization problems) وقد يشمل الكبح مدى من المتغيرات القرارية، مثل درجة حرارة المعقم أو/ و أهداف إضافية. على سبيل المثال، للحصول أو تحقيق أقصى درجات المحافظة على الجودة، فإن قيمة القتل المرغوبة و/ أو أقصى وقت تصنيع قد يستخدمان للبحث عن درجات حرارة المعقم المثلى. إن استخدام تقنيات البحث للتعديل ضمانة لأن تكون عملية التعديل فعالة

وقوية. وتتوافر مختلف تقنيات البحث لتعديل التصنيع الحراري والتي توضح تفاصيل بعضها في القسم التالي.

(١٠,٦,٢) نماذج الوضع الأمثل (التعديل) Optimization Models

قد اقترح تياكسيارا وآخرون (Teixeira et al, 1969) أولى المعاملات الرياضية (mathematical treatments) لعملية الوضع الأمثل لتحطيم الثيامين مقابل التعقيم، في العلب الأسطوانية للمنتجات المصنعة بالتسخين التوصيلي (cylindrical cans of conduction heating products). واستخدمت طريقة الفرق المحدود المتناهي (finite difference method) لتحديد توزيع درجات الحرارة وما يقابلها من تحطيم الثيامين، باستخدام حركيات الهدم من الدرجة الأولى (first order degradation kinetics). في نفس السنة، وسع هاياكاوا (Hayakawa, 1969) المفهوم/ النظرية باستخدام تقنية رياضية مختلفة تتضمن التحليل البعدي (dimensional analysis) ومفهوم/ نظرية قيمة التعقيم متوسطة الكتلة (mass-average sterilization value) للتغير الفيزيائي والكيميائي والحيوي الناتج من التصنيع الحراري. قاد هذا العمل إلى وضع معادلة يمكن استخدامها لحساب قيم الاحتفاظ بالعناصر الغذائية والتي من ثم يرجى استخدامها مع طرق يدوية قياسية، (Hagakawa 1971).

اشتق باريرو-مينديز وآخرون (Barreiro- Mendez *et al.*, 1977) نماذج لفواقد العناصر الغذائية أثناء التسخين والتبريد في العبوات الأسطوانية باستخدام المعادلات التحليلية (analytical equations). تعطي هذه المعادلات النسبية المئوية للاحتفاظ بالعناصر الغذائية ويتم الحصول على النتائج التجريبية (نتائج التجارب) باستخدام نظام مشابه (analogue system) مكون من ٦٪ نشا ذرة (maize starch) و١,٧٥٪

كاربوكسيميثايل سيليلوز (carboxymethyle. Cellulose)، وتتفق هذه اتفاقاً جيداً مع النتائج المتوقعة.

استخدم هاياكاوا، ١٩٧٧ نموذجياً حاسوبياً لتقدير النسبة المئوية للاحتفاظ بالثيامين في هريس الجزر (carrot puree) وهريس البازلاء (pea puree) وهريس لحم الخنزير (pork puree) والسبانخ، وقارن النتائج مع تقديرات التجارب. للعمليات التي تمت على ١١٥,٦°م، كانت النتائج في حدود ± ٣٪؛ وعلى أي حال، على درجات حرارة أعلى عند ١٢١,١°م لمدة ٦٠ دقيقة اختلفت الفروقات وتراوحت بين ١٠ و١٦٪. أعطى السبانخ أسوأ نتائج مقارنة (worst comparative results)، وبلغت التوقعات/ التنبؤات حتى ١٦٪ أقل من نتائج التجارب.

استخدم لينز ولوند (Lenz and Lund, 1977) طريقة حساب القتلية Lethality calculation والتي استخدمت مجموعة جديدة لا أبعاد لها (dimension less group)، رقم فوريير/ القتلية الـ Lethality/ Fourier number L حيث:

$$L = -\frac{\alpha \ln x}{k_r a^2} \qquad (١٠,١٧)$$

حيث إن α هي الانتشارية الحرارية (thermal diffusivity)، والـ χ هي جزء المكون الذي تم الاحتفاظ به (نسبة التركيز عند أي وقت تي (t) إلى التركيز الأصلي الابتدائي (initial concentration)) والـ k_r هي ثابت المعدل عند درجة الحرارة المرجعية T_r والـ a هو نصف قطر العبوة (container radius) (أي نصف السمك half thickness). وقد اشتق هذا بالجمع بين المعادلة الحركية من الرتبة الأولى وعلاقة أرهينوس لدرجة الحرارة Arrhenius temp. relationship واستبدال الوقت من رقم فوريير (α_t/α^2). ويتم الحصول على الأخير بحل معادلة نقل الحرارة غير مستقرة الحال (unsteady state heat transfer

(equation solution) لأسطوانة محدودة مع تضمين التبريد بحل المعادلة للظروف المحيطة المناسبة عند نهاية التسخين.

طور ثيجيسين وكوشين (Thijssen and Kochen, 1980) طريقة حساب العملية والتي لم تستخدم البيانات المجدولة (tabulated data) والتوليد/ الاستيفاء (interpolation). اعتمد النموذج المستخدم على المعادلة التالية (١٠,١٨):

$$\frac{C}{C_0} = \int_0^{v} \exp\left[-\int_0^{t} k\,dt\right] dv \qquad (١٠,١٨)$$

حيث إن C هو تركيز مكون محدد (specified component)عند الوقت t والـ C_0 هو تركيز مكون محدد عند الوقت صفر0، والـ V هو حجم العبوة للحصول على متوسطات (averaging purposes) والـ k هو معامل الحراك المعتمد على درجة الحرارة (temperature-dependant kinetic factor). ولدرجة حرارة المنتج الابتدائية المنتظمة T_0 ، ودرجة حرارة ثابتة لوسط التسخين، T_h ، ودرجة حرارة ثابتة لوسط التبريد، T_c ، فإن نقص مكون غير متحمل للحرارة يكون معاملاً (دالة (function)) لخمس مجموعات لا أبعاد لها (five dimentionless groups) : رقم فورير (Fourier number)ورقم بيوت (Biot number) ونسبة درجة الحرارة المتبقية (residual temp. ratio) ومجموعتين مرتبطتين بالعوامل الحركية. استخدمت الطريقة الحلول التحليلية (analytical solutions) لمعادلة نقل الحرارة للأجسام الدائرية (sphere) والأسطوانية والمستطيلة (rectangular) وأيضاً لأشكال هندسية (geometrical shapes) أخرى.

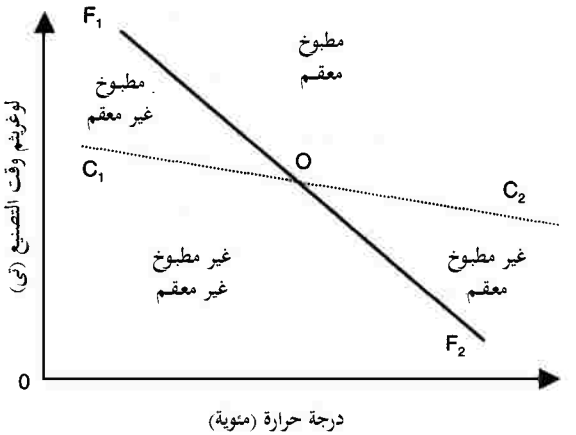
وسع كاستيللو وآخرون (Castillo et al., 1980) طريقة باريرو –مينديز وآخرين (Barreiro- Mendez *et al.*, 1977) حتى يمكن التعامل مع أكياس الغذاء المضلعة التي تتحمل المعاملة الحرارية في المعقم (rectangular retortable pouches of food). إن الأمر المثير للاهتمام الذي ينشأ من استخدام هذا النموذج، هو أن درجات الحرارة المتنبأ بها

(predicted temperatures) ودرجات الحرارة التجريبية عند نهاية التسخين، متوافقة توافقاً جيداً. وعلى أي حال، في نهاية التبريد، لوحظت فروقات تصل إلى ١٦٪، ربما بسبب افتراض معامل نقل حرارة عالٍ عند سطح الكيس. إن الحفاظ على الثيامين، المتنبأ به أو المتوقع، بعد التصنيع الحراري، متوافق جيداً مع نتائج التجارب.

(١٠,٦,٣) تقنيات البحث Searching Techniques

طريقة الرسم البياني Graphical approach

ربما يحدد اختيار ظروف التصنيع برسم بياني للوغريثم وقت (تصنيع) Log time مقابل درجات الحرارة (Holdsworth, 1997)، والذي يرسم فيه خطان مستقيمان (straight lines) يرمزان/ يمثلان قيمة القتلية الثابتة (constant lethality) (F) وقيمة الطبخ (C) كما هو موضح في الشكل رقم (١٠,٦). يقسم هذان الخطان الرسم البياني إلى أربع مناطق: الخط F_1OF_2 يحدد الحدود بين العمليات التي توفر تعقيماً كافياً والتي لا تحقق ذلك، بينما يحدد الخط C_1OC_2 الحدود بين الطبخ الكافي والطبخ غير الكافي. الرسوم البيانية المثالية مثل هذا الرسم مفيدة في تحديد تناسب (suitability) مختلف مجموعات درجات الحرارة مع الوقت. ويجب الإشارة إلى أن هذه الرسومات البيانية تعتمد على التسخين الفوري (اللحظي) (instantaneous heating) الذي يتبعه التبريد اللحظي للمنتج، وبصفة خاصة لطبقة رقيقة للمنتج (thin films of product). وتحت ظروف حقيقية واقعية بدرجة أكبر، من الضروري تضمين تأثيرات نقل الحرارة وأبعاد الشيء المراد تصنيعه. وعند القيام بذلك تصبح الخطوط المستقيمة في الشكل رقم (١٠,٦) منحنية (curved) ويصبح للمناطق حدود مختلفة.



الشكل رقم (١٠,٦). علاقة التي– التي t-T للتحطيم الميكروبي،إف (F)، والطبخ، سي (C)

التقنيات الرياضية Mathematical techniques

وفقاً لنوع الوظيفة الهادفة (objective function) يمكن تقسيم مشاكل توخي(أي تحقيق) الأمثلية (استمثال) إلى فئتين: الاستمثال الخطي (Linear optimization) ومشاكل الاستِمثال غير الخطي (non-linear optimization problems). البرمجة الخطية (linear programming) أداة مفيدة تستخدم للتعامل مع مشاكل الاستِمثال الخطي. وبالرغم من أن هذه التقنية تعتبر قيمة محدودة بسبب افتراضات الخطية (Linearity) والتقسيمية اللامتناهية (infinite divisibility)، إلا إنها تقنية مرنة جداً. زيادة على ذلك، للبرمجة الخطية القدرة على التعامل مع أعداد كبيرة من المعوقات بفعالية وكفاءة، وعليه، فهي مفيدة جداً لتحليل الأنظمة الكبيرة واستمثالها (Saguy, 1933). تم تطوير كثير من تقنيات البحث (searching techniques) للمشاكل غير الخطية، والتي تشمل تقنيات البحث ذات المتغيرات الأحادية والمتعددة (single and multiple searching

(Fibonacci وتقنية فيبوناكي (grid search)، وتشمل الأولى بحث الشبكة techniques). والتقنية التربيعية/ الثنائية (golden section method) وطريقة القسم الذهبي technique) (Powell method) للوظيفة الهدف ذات متغير وطريقة بوويل (quadratic techniques) (alternating المتبادلة ذات المتغيرات البحث تقنيات الأخيرة تشمل بينما ، الوحيد القرار (Powell's وبحث بوويل (Pattern search) باتيرن بحث : variable search techniques) (evolutionary operation and استجابة السطح تحليل ، العملية التطورية ، search) (gradient الانحداري وطرق التدرج response surface analysis) (Saguy, 1983) .methods)

استخدم ساجوي وكاريل (Saguy and Karel, 1979) تقنية رياضية ممتازة متعددة التكرار (elegant multi-iterative mathematical technique) لاستمثال المحافظة على الثيامين في هريس البازلاء (pea puree) في علبة ٣٠٣× ٤٠٦ وهريس لحم الخنزير (pork puree) في علبة ٤٠١× ٤١١. وقد أنتجت هذه الطريقة مستوى حرارة تسخين متغيرة (constant تمكن من إستمثال المحافظة على (variable temperature heating profile) heating temperature regime) العنصر/ العناصر الغذائية. وقد تم توضيح أن نظام درجة حرارة تسخين ثابت قد يكون بدرجة جودة المستوى المخرج/ المشتق نظرياً .(theoretically derived profile)

طور هيلدنبراند (Hildenbrand 1980) طريقة ذات جزأين لحل مشكلة السيطرة المثلى على درجة الحرارة (optimal temperature control). في الجزء الأول، حلت مشكلة معادلة نقل الحرارة غير المستقرة الحال، في أسطوانة متناهية باستخدام دالات جرين (Green's functions). وفي الجزء الثاني، حددت طريقة لضمان أن العبوة/ العلبة قد تلقت درجة الحرارة المحسوبة المستوى. بينما تبدو هذه المعالجة مثيرة للاهتمام، إلا

أنه لا وجود لأي مزيد من التطور. اختبر ناردكارني وهاتون (Nardkarni and Hatton, 1985) الأعمال السابقة واعتبرا أن هذه الطريقة ليست دقيقة بدرجة كافية للحصول على الوضع الأمثل. استخدم هؤلاء الباحثون الأسس الأدنى لنظرية الضبط المثالي (optimal control theory) للحصول على حلول مثلى. مرة أخرى، فإن المستويات البسيطة في التسخين والتبريد أفضل من مستويات التسخين المعقدة (complex heating profile).

طور بانجا وآخرون (Banga *et al.*, 1991) لوغوريثم استمثال (optimization algorithm)، وبحثاً عشوائيًا متكامل الضبط (Integrated control random search (ICRS)) من أجل ثلاثة أهداف: المحافظة الشاملة على العناصر التغذوية بأقصى درجة (maximum over all nutrient retention) والمحافظة بأقصى درجة على عوامل الجودة (maximum retention of quality factor) على سطح الغذاء وأقل وقت تصنيع (minimum process time). وقد خلص هؤلاء الباحثون إلى أن استخدام مستوى درجة حرارة متغير أمر مفيد في المحافظة على الجودة السطحية المثلى (optimum surface quality).

التقنيات الصناعية الذكية للنمذجة والاستمثال

Artificial intelligence techniques for modeling and optimization

مع التقدم السريع لتقنية الحاسب الآلي (computer technology) وعلوم الحاسب (software) وجد أن للتقنيات الصناعية الذكية مثل الشبكات العصبية الصناعية ((artificial neural networks (ANNs)) والألغوريثم الجيني (genetic algorithms) مميزات معينة تفوق ما للطرق التقليدية في التعامل مع النمذجة باستخدام الأنظمة (system modeling) ومشاكل الاستمثال خاصة في الحالات التي تتضمن معالجات رياضية غير خطية ومعقدة.

الشبكية العصبية تجميع لعناصر حسابات مترابطة (interconnecting computational elements) والتي تشابه الأعصاب في الأنظمة البيولوجية (الحيوية). ولهذه الشبكة القدرة على الربط بين قياسات المدخلات وقياسات المخرجات بدون سابق معرفة للعلاقات القائمة بينها. تقنيات الألغوريثم الجيني(الخوارزمية الجينية ، خطوات الحل الحسابي الجيني ، (genetic algorithms (GASs)) تقنيات استمثال تجميعية (combinational optimization technique). تبحث وتستكشف هذه التقنيات عن قيمة مثلى لوظيفة مستهدفة/ موضوعية معقدة (complex objective function) بتقليد العملية التطورية الحيوية (biological evolutionary process)، اعتماداً على عبور صبغيني جيني(crossover) وتطفر (mutation) كما في الوراثة (علم الجينات genetics). ويمكن البحث عن قيمة مثلى بالتوازي مع طريقة بحث متعددة النقاط (multi point search procedure). يزاد على ذلك ، يمكن استخدام تقنية الألغوريثم الجيني نماذج تقنيات الشبكات العصبية الصناعية (ANN) كعامل إرشادي (guiding function) ويمكّن هذا من تطوير تقنية ضبط شامل مثلى باستخدام كل من التقنيتين : تقنية الألغوريثمات الجينية (GASs) وتقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs).

استخدمت الـ ANNs والـ GASs كدوال فردية بشكل واسع لمناطق مختلفة ، ولكن كطريقة جمعية ، فقد ذكرت فقط ، حديثاً. قيَّم شن (Chen, 2001) استخدام كل من التقنيتين لنمذجة واستمثال التصنيع الحراري بما يشمل التصنيع الحراري التعقيمي الثابت والمتغير (ثابت أو متغير درجة الحرارة). وقد أظهرت نتائجه أن استخدام نموذج الـ ANN لنمذجة التصنيع الحراري وكذلك استخدام طريقة استمثال التصنيع الحراري المعتمد على التقنيتين (GA- ANN based optimization)، أمر موثوق ويعتمد عليه (reliable).

(١٠,٧) الاتجاهات المستقبلية
Future trends

من الواضح أن الطرق الحرارية التقليدية قد تقود إلى تحطيم مرغوب للممرضات الميكروبية والكائنات المفسدة، وإلى التغيرات الداخلية المرغوبة مثل تخثر البروتين (protein coagulation) وانتفاخ النشا (starch swelling) وتنعيم القوام (textural softening) وتكوين مكونات الرائحة (aroma components). وعلى أي حال، تحدث تغيرات غير مرغوبة، أيضاً، مثل فقد الفيتامينات والعناصر المعدنية وتكوين مكونات التفاعلات الحرارية للبوليمرات الحيوية (biopolymers) وبالمصطلحات التصنيعية الأدنى، فقد المظهر الطازج وفقد النكهة والقوام. إن المعالجة التقليدية للتغلب على هذه التغيرات غير المرغوبة أو على الأقل تقليلها هي استخدام التصنيع الحراري عالي الحرارة قصير الوقت((high temperature, short time (HTST) أو استخدام مفهوم الحرارة الفائقة ((ultra high temperature (UHT). وتعتمد أو تقوم هاتان الطريقتان على حقيقة أن لتثبيط الكائنات الدقيقة حساسية حرارية أعلى مما لعوامل الجودة، إذ تؤدي درجة الحرارة العالية إلى تثبيط سريع للكائنات الدقيقة والإنزيمات التي يهدف إليها في/ من البسترة أو التعقيم، كما أن الوقت القصير يقلل تغيرات الجودة غير المرغوبة. ولسوء الحظ، فإن مفهومي الـ HTST والـ UHT محدودان بشكل شديد للأغذية الصلبة، ذلك، لأن أجزاء الغذاء التي تلامس السطوح الساخنة ستسخن تسخيناً مفرطاً (overheated) أثناء الوقت المطلوب للحرارة حتى تنقل فيه إلى داخل الغذاء أو إلى أبرد نقطة فيه (coldest spot). يسبب التسخين السطحي المفرط فواقد الجودة والتي في الحالات الحادة/ الشديدة تعادل فوائد الـ HTST وUHT. وعليه، وجدت الطرق، وتقنيات التصنيع الحراري الممتازة الجديدة (novel thermal processing technique) مثل طريقة التسخين بالمقاومة الأومية (ohmic heating) والتسخين بالترددات الفائقة (high

(frequency heating والتسخين بالميكروويف (microwave heating) وتقنيات التصنيع غير الحراري (non-thermal processing tech.) مثل التصنيع بالضغط الهيدروستاتيكي (hydrostatic pressure processing) وطرق النبضات الكهربية (pulsed electricity method)، اهتماماً زائداً، سواء من علماء الأغذية أو الصناعة الغذائية.

(١٠,٧,١) تقنيات التصنيع الحراري الجديدة

Novel Thermal Processing Techniques

التسخين الأومي (بالمقاومة الحرارية) Ohmic heating

التسخين الأومي (بالمقاومة الحرارية) والذي يعرف بالمقاومة الكهربائية (electric resistance) طريقة تسخين مباشر (direct heating method) فيها يعمل الغذاء نفسه كناقل/ موصل للكهرباء المأخوذة من المصدر الرئيس (للكهرباء) (mains) التي تكون ٥٠ هرتزاً 50Hz في أوربا و٦٠ هرتزاً 60Hz في الولايات المتحدة الأمريكية (USA). ويمكن تغطيس الغذاء في سائل موصل (conduction liquid)، عادة محلول ملحي ضعيف (weak salt solution) ذي توصيل مشابه لتوصيل الغذاء. ويتم التسخين وفقاً لقانون أوم (Ohm's law) حيث إن توصيل، أو عكس ذلك، مقاومة (resistivity) الغذاء ستحدد التيار الذي سيتدفق (current that will flow) بين الأرض (ground) والإليكترود، القطب الكهربائي (electrode). عادة يستخدم فولت عالٍ (high voltages) يصل إلى ٥٠٠٠ فولت (5000 V). يرتفع التوصيل الغذائي (للتيار الكهربائي) بدرجة كبيرة مع ارتفاع درجة الحرارة. إذاً، للوصول إلى درجات حرارة عالية، من الضروري زيادة تيار الفولت (voltage current) أو استخدام مسافات طويلة (longer distances) بين الأقطاب الكهربائية والأرض.

إن أفضل نظم التسخين بالمقاومة الحرارية المعروفة هو نظام عمود التسخين الأومي APV (APV ohmic heating column)، حيث تنقل الأقطاب الكهربائية المغمورة

في الغذاء في أنبوب عمودي، متحد المراكز/متراكز (vertical concentric tube). وقد تم تركيب النظام الأومي للـ APV، لبسترة وتعقيم عدد من المنتجات الغذائية وتم الحصول على جودة ممتازة. وتوجد معظم هذه التجهيزات/ التركيبات الصناعية (Installations) في اليابان لإنتاج منتجات الفواكه (Tempest, 1996).

تتضمن عمليات الطبخ الصناعي بالتسخين بالمقاومة الكهربائية طبخاً سريعاً للبطاطس والخضراوات لسلقها في الصناعة ولتحضير الأغذية في المطابخ الصناعية (Industrial kitchens). وإحدى المشاكل الرئيسية لهذه التطبيقات هي ضمان أن تكون مواد الأقطاب الكهربائية خاملة وأن لا تسرب أيونات معدنية (metal ions) في محاليل التوصيل، وفي نهاية الأمر في الغذاء نفسه.

التسخين بالتردد العالي High frequency heating

يتم هذا التسخين في منطقة الميغاهرتز (megahertz region) للطيف الكهرومغناطيسي (electromagnetic spectrum). تضبط ترددات على ١٣,٥٦ و٢٧,١٢ ميغاهرتز (MHz) جانباً، للاستخدام في التسخين الصناعي. تسخن الأغذية بنقل الطاقة الكهرومغناطيسية من خلال الغذاء الموضوع بين قطب كهربائي والأرض. تسمح الطاقة عالية التردد (high frequency energy) المستخدمة بنقل الطاقة من فوق الفراغات الهوائية من خلال مواد التغليف غير الموصلة. ويتطلب تحقيق تسخين سريع وكاف للأغذية، كثافات حقول كهربائية عالية.

يتم التسخين بالتردد العالي بمجموعة(توليفة) التسخين بالأقطاب الثنائية (combination of dipole heating) عندما يحاول القطب الثنائي المائي (water dipole) أن يوازي نفسه (align) مع الحقل الكهربائي المتناوب المتردد (alternating electric field)، والتسخين بالمقاومة الكهربائية من تحركات أيونات الأغذية، المذابة. وفي مدى درجة الحرارة المنخفضة التي تشمل درجات الحرارة تحت درجة تجمد الأغذية، يكون

التسخين بالعازل الكهربائي (dielectric heating) مهمًّا، بينما لدرجات الحرارة المرتفعة، يسود التسخين بالتوصيل الكهربائي. وترتفع فواقد التوصيل الحراري أو فواقد عامل (التسخين) بالعزل الكهربائي بارتفاع الحرارة، والذي قد يقود إلى مشاكل تسخين سريع التقلب (runaway heating) بينما تمتص الأجزاء الساخنة من الغذاء معظم إمداد الطاقة. خصائص الغذاء الثنائية الكهربائية كثيرة بدرجة معقولة في مدى درجة الحرارة المنخفض، ولكن توجد بيانات قليلة حول درجات الحرارة التي تعلو درجة حرارة الغرفة.

إن أكثر استخدام في الصناعة الغذائية للتسخين بالتردد العالي هو الذي تم في التجفيف النهائي للبسكويت بعد الخبز (finish during post-baking of biscuits) وفي منتجات الحبوب الأخرى. استخدام آخر هو تجفيف المنتجات، مثل الحبوب الممددة (expanded cereals) وأشرطة (أصابع) شرائح البطاطس (potato strips). سابقاً، كان استخدام التردد العالي في تذويب (الثلج) وتسييح (defrosting) الأغذية المجمدة استخداماً رئيساً، ولكن حدثت مشاكل عدم الانتظام (uniformity) مع الأغذية ذات المحتوى المختلط مما حد من هذا الاستخدام. وقد زاد الاهتمام باستخدام التردد العالي في التسييح مرة أخرى في السنوات القليلة الماضية.

التسخين بالميكروويف Microwave heating

الميكروويفات المستخدمة في الصناعة الغذائية للتسخين ذات ترددات صناعية وعلمية وطبية (industrial scientific and medical (ISM) (frequencies) تبلغ ٢٤٥٠ ميغاهيرتز (MHz) أو ٩٠٠ (MHz) تقابل طول موجي ١٢ أو ٣٤سم، على التوالي. في هذا المدى من التردد، تسود آلية التسخين بالعزل الكهربائي بدرجات حرارة متوسطة. تحاول الجزيئات القطبية (polar molecules) التي يسود عليها الماء أن توازي نفسها مع اتجاه الحقل الكهربائي المتغير بسرعة. ويتطلب هذا التوازي (alignment) طاقة تؤخذ من

الحقل الكهربائي. وعندما يغير الحقل اتجاهه، تسترخي/ ترتاح (relax) الجزيئات وتوزع الطاقة الممتصة مسبقاً إلى الحيز المحيط (surroundings)، أي مباشرة داخل الغذاء. يعني هذا، أن محتوى الغذاء من الماء عامل مهم لتسخين الغذاء بالميكروويف ومهم لحسن أدائه. إن مقدرة الموجات الدقيقة على التغلغل في الأغذية محدودة. للأغذية الطبيعية الرطبة normal "wet" foods عمق الاختراق في جانب حوالي ١-٢سم عند ٢٤٥٠ ميغاهيرتز (2450MHz). عند درجات حرارة أعلى يلعب التسخين بالمقاومة الكهربائية من الأيونات الذائبة، دوراً في آليات التسخين، عادة، مزيداً من إنقاص عمق اختراق طاقة الميكروويف. عمق الاختراق المحدود للموجات الدقيقة (الميكروويف) يعني أن توزيع الطاقة داخل الغذاء قد يكون مختلفاً. إن ضبط انتظام التسخين للتسخين بالميكروويف من الأمور الصعبة، والأشياء المراد تسخينها ذات أحجام متساوية لطول الموجات في المادة. يجب أن ينظر إلى صعوبات ضبط انتظام التسخين كمعوق رئيس للاستخدام الصناعي للتسخين بالميكروويف. وعليه، فالمتطلب المهم فيما يتعلق بمعدات الميكروويف واستخدام طاقة الميكروويف في الصناعة الغذائية، المقدرة على ضبط انتظام التسخين بشكل سليم (Ohlsson, 1983).

توجد الاستخدامات الصناعية للتسخين بالميكروويف لمعظم عمليات المعاملات الحرارية في عمليات صناعة الأغذية. ولعدة سنوات كان الاستخدام الأكبر أو الأوسع هو تذويب (defrosting) أو تسييج thawing الأغذية المجمدة، مثل كتل اللحم المجمد (blocks of meat)، قبل مزيد من التصنيع. وغالباً ما يذوب اللحم جزئياً، فقط قبل مزيد من التصنيع. ويكون الاستخدام الأوسع الآخر في الوقت الحالي، في البسترة وكذلك في تعقيم الأغذية المعبأة. وفي تصنيع الأغذية الجاهزة الأولية (primary ready

made foods) ، كذلك. والهدف من هذه العمليات هو بسترة الغذاء على درجات حرارة في مدى ٧٥-٨٠°م من أجل إطالة فترة الصلاحية إلى حوالي ٣-٤ أسابيع.

لقد دُرِس التعقيم باستخدام الميكروويف لعدة سنوات، ولكن استخدامه تجارياً تم في السنوات الماضية القريبة، فقط، في أوربا واليابان. البسترة والتعقيم بالميكروويف واعدان فيما يتعلق بتوفير معاملة حرارية سريعة، وتؤدي إلى تغيرات جودة بسيطة/ قليلة، بسبب المعاملة الحرارية، وفقاً لأساس الحرارة العالية والوقت القصير (HTST). وعلى أي حال، يجب مقابلة المتطلبات الكبيرة لانتظام التسخين من أجل استيفاء عوامل الجودة هذه (Ohlsson, 1991).

ويمكن إجراء البسترة بالتسخين بالميكروويف للأغذية القابلة للضخ (pumpable foods). توجه الموجات الدقيقة (الميكروويف) نحو الأنبوب الناقل للغذاء ويتم التسخين مباشرة عبر المقطع العرضي للأنبوب. مرة أخرى، يجب ضمان انتظام التسخين، مما يتطلب اختيار الأبعاد الصحيحة لقطر الأنبوب والتصميم المضبوط للأجهزة التطبيقية (Ohlsson, 1995). تم ذكر حركيات تحطيم بعض الكائنات الدقيقة مثل *الساكارومايسيس سيرفيسيي Saccharomyces cerevisiae* و*اللاكتوباسيلس بلانتاروم (Lactobacillus plantarum)* و*الإيشريشيا كولاي (Escherichia coli)* وبالمثل تثبيط الإنزيمات بالتسخين المستمر بالميكروويف (Tajchakavit and Ramaswamy, 1997, Tajchakavit *et al.*, 1999, Koutchma and Ramaswamy, 2000).

ونجد المزيد من استخدام تسخين الميكروويف في التجفيف جمعاً مع التجفيف بالهواء الساخن التقليدي. وكثيراً ما تستخدم الميكروويفات مبدئياً لنقل تحريك الماء من الداخل الرطب لجزء الغذاء الصلب، إلى السطح، استناداً إلى التسخين المفضل للماء بالميكروويف (preferential heating of water by microwaves). ويوجد استخدام للباستا

(pasta المكرونة) والخضراوات ومختلف منتجات الحبوب (cereals) حيث يتم النفخ (puffing) بالتمديد السريع (rapid expansion) لداخل نسيج الغذاء باستخدام طاقة الميكروويف (Tempest, 1996).

(١٠,٧,٢) تقنيات التصنيع غير الحراري Non-Thermal Processing Techniques

استخدمت العمليات غير الحرارية مثل الحقل الكهربائي المنبض النبضي(pulsed electric field (PEF) والحفظ بالضغط العالي (high pressure (HP) preservation) في مختلف المنتجات الغذائية النموذجية (prototype food products). ويمكن تصنيف هذه العمليات أفضل تصنيف كعمليات بسترة ؛ لأنها ليست فعالة بدرجة كاملة في خفض نشاط الجراثيم البكتيرية (bacterial spores). قد يكون للأغذية المعاملة والمغلفة جيداً فترة صلاحية (refrigerated shelf-life) طويلة تحت التبريد، وقد تكون ثابتة على الرف shelf stable إذا كانت بها أحماض طبيعية أو مضافة لتمنع نمو الجراثيم.

تكسب تقنية التصنيع بالضغط العالي ((high pressure processing (HPP) سمعة/ شهرة وتفضيلاً داخل الصناعة الغذائية ؛ وذلك لقدرتها على تثبيط الكائنات الدقيقة الممرضة مع أقل معاملة حرارية، تؤدي إلى الاحتفاظ شبه الكامل للخواص الحسية والتغذوية للأغذية الطازجة دون التضحية بفترة الصلاحية. وتشمل المميزات الأخرى للتصنيع بالضغط العالي (HPP) مقارنة بالتصنيع الحراري التقليدي: انخفاض وقت التصنيع، وأقل مشاكل إتلاف/ تحطيم حراري، والاحتفاظ بالطزاجة (retention of freshness) والنكهة والقوام واللون، وعدم فقد فيتامين ج، وعدم وجود تغيرات غير مرغوبة في الغذاء أثناء التجميد عند انتقال/ تحول الضغط (pressure-shift freezing) الذي يسببه انخفاض حجم البلورات وأشكال المراحل الثلجية المتعددة (multiple ice phase forms) وأقل تغيرات وظيفية غير مرغوبة.

قد تحسن التغيرات التي تجرى نتيجة للمعاملة بالضغط العالي الخواص الوظيفية لمكونات الأغذية مؤدية إلى إنتاج منتجات ذات قيمة مضافة (value-added product). وتقليل الإتلاف أثناء التجميد عند انتقال/ تحول الضغطة والتسييح باستخدام التصنيع بالضغط العالي (HPP) وتثبيط الإنزيمات غير الحراري والتغيرات المرغوبة في خواص النشا- والتجلتن (starch-gelatinization properties) وبعض الأمثلة الأخرى للفوائد المحتملة للتصنيع بالضغط العالي (HPP). على أي حال، فإن تثبيط الجراثيم يعتبر تحدياً كبيراً للتصنيع بالضغط العالي، وما زلنا في انتظار تطوير طرق تستخدم لتحقيق تثبيط كامل للجراثيم باستخدام الـ HPP. في التصنيع الحراري، الـ D (أي الوقت المطلوب بالدقائق لخفض الحمل الميكروبي بمقدار ١٠ أضعاف (10- fold) وزد (Z) (أي درجة الحرارة بالمئوي التي تنتج تغيراً بمقدار ١٠ أضعاف (10- fold change) في قيمة D وإف F_0 (أي قيمة القتل المتكاملة integrated lethal (value من كل الحرارة المتلقاة من الغذاء المعامل بدرجة حرارة مرجعية تبلغ ١٢١,١°م، بافتراض أن قيمة- (Z- value) تبلغ ١٠°م) كل هذه قيم تصنيع قياسية؛ وعلى أي حال، هناك حاجة لتطوير قياسات عملية للتصنيع بالضغط العالي ومعايرتها فيما يتعلق بتثبيط الميكروبات؛ لأنها غير موجودة (المعايرة). وهذا أمر ضروري للنجاح التجاري لهذه التقنية.

استخدام الحقول الكهربائية النبضية لتثبيط الكائنات الدقيقة طريقة غير حرارية واعدة أخرى. يرتبط تثبيط الكائنات الدقيقة المعرضة للحقول الكهربائية المنبضة عالية الفولت، بعدم الثبات الكهربي الآلي (electro mechanical instability) لغشاء الخلية. قوة الحقل الكهربائي (electric field strength) ووقت المعالجة هما العاملان الأكثر أهمية المتضمنان في التصنيع بالحقول الكهربائية المنبضة (PEF). وقد ذكرت نتائج مشجعة في التجارب المختبرية، ولكن رفع ذلك إلى المستوى الصناعي يرفع تكاليف إمداد الطاقة

المولدة (command charging power supply) والمفتاح الكهربائي إلى قابس عالي السرعة (high-speed electrical switch). وما زلنا في انتظار تصميم نظام تصنيع مستمر وناجح، بالحقول الكهربائية المنبضة ليستخدم صناعياً. إن التكاليف الإنشائية/ الأولية العالية (high initial cost) لوضع نظام التصنيع بالحقول الكهربائية المنبضة هي العقبة الرئيسة التي تواجه الذين يشجعون الاستخدام الصناعي لهذا النظام. ستقلل التطورات المبتكرة في تقنية النبض عالي الفولت تكاليف توليد النبضات (pulse generation) وسيجعل تصنيع الحقول الكهربائية المنبضة منافساً لطرق التصنيع الحراري (Jeyamkondan *et al.*, 1999).

(١٠,٨) المراجـــع

References

BALL C 0 (1923) 'Thermal process time for canned food', *Bull Nat Res Council,* 7 (37) 9-76.

BANGA J R, PEREZ-MARTIN R I, GALLARDO J M and CASARES J J (1991) 'Optimization of thermal processing of conduction-heated canned foods: study of several objective functions', *J Food Eng,* **1425-51.**

BARREIRO-MENDEZ J A, SALAS G R and MORAN I H (1977) 'Formulation and evaluation of a mathematical model for prediction of losses of nutrients during heat treatment of canned foods', *Archivos Latinamericanos de Nutricion,* 27 325-41.

BENDER A E (1978) *Food Processing and Nutrition,* Orlando, Florida, Academic Press.

BIGELOW W D, BOHART G S, RICHARDSON A C and BALL C 0 (1920) *Heat Penetration in Processing Canned Foods,* Bulletin No. 16L, National Canners' Association, Washington, DC.

CASTILLO P F, BARREIRO J A and SALAS G R (1980) 'Prediction of nutrient retention in thermally processed heat conducting food packaged in retortable pouches', *J Food Sci,* 45 1513-16.

CHEN C R (2001) *Application of Computer Simulation and Artificial Intelligence Technologies for Modeling and Cptimization of Food Thermal Processing,* PhD thesis, Food Science Department, McGill University, Montreal, Canada.

CUMMING D B, STARK R, TIMBERS G E and COWMEADOW R (1984) 'A new blanching system for the food industry, II, commercial design and testing', *J Food Processing and Preser vation,* 8 137.

FELLOWS P (2000) *Food Processing Technology: Principles and Practices,* 2nd edition, Cambridge, UK, Woodhead Publishing Ltd.

HAYAKAWA K (1968) 'A procedure for calculating the sterilization value of a thermal process', *Food Technol,* 22 905-7.

HAYAKAWA K (1969) 'New parameters for calculating mass average sterilizing values to estimate nutrients in thermally conductive food', *Canadian Inst Food Tethnol J,* 2 (4) 165-72.

HAYAKAWA K (1971) 'Mass average value for a physical, chemical or biological factor in food', *Canadian Inst Food Technol J,* 4 133-4.

HAYAKAWA K (1977) 'Mathematical methods for estimating proper thermal processes and their computer implementation', *Adv Food Res,* 23 75-141.

HILDENBRAND P (1980) 'An approach to solving the optimal temperature control problem for sterilization of conduction-heating foods', *J Food Process Eng,* 3 123-42.

HOLDSWORTH S D (1997) *Thermal Processing of Packaged Foods,* London, Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman and Hall.

JEN Y, MANSON J E, STUMBO C R and ZHRADNIK J W (1971) 'A procedure for estimating sterilization of and quality factor degradation in thermally processed food', *J Food Sci,* 36 (4) 692-8.

JEYAMKONDAN S, JAYAS D S and HOLLEY R A (1999) 'Pulsed electric field processing of foods: a review', *J Food Protection,* 62 (9) 1088-96.

KADER A A (1985) 'Quality factors: Definition and evaluation for fresh horticultural crops', in *Postharvest Technology of Horticultural Crops,* ed Kader A A, Special Publication 3311, Cooperative extension, University of California, Berkeley.

KOUTCHMA T and RAMASWAMY H S (2000) 'Combined effects of microwave heating and hydrogen peroxide on the destruction of *Escherichia coli', Food Sci Technol (LWT),* 33 (1) 30-6.

LABUZA T P (1982) 'Application of chemical kinetics to deterioration of foods', *J Chem Ed,* 61 (4) 348.

LABUZA T P and RIBOH D (1983) 'Theory and application of Arrhenius kinetics to the prediction of nutrient losses in foods', *Food Technol,* 37 (10) 66.

LAZAR M E, LUND, D B and DIETRIC W C (1971) 'IQB - a new concept in blanching', *Food " Technol,* 25 (7) 684.

LENZ M K and LUND D B (1977) 'The lethality Fourier number method: experimental verification of a model for calculating average quality factor retention in conduction-heating canned foods', *J Food Sci,* 42 997-1001.

LUND D B (1975) 'Heat processing', in *Principles of Food Science, Part II: Physical Principles of Food Preservation,* eds Karel M, Fennema 0 R and Lund D B, New York, Marcell Dekker.

LUND D B (1982a) 'Influence of processing on nutrients in foods', *J Food Protection,* 45 367-83.

LUND D B (1982b) 'Quantifying reactions influencing quality of foods: texture, flavor, and appearance', *J Food Processing and Preservation,* 6 133-53.

LUND D B (1982c) 'Applications of optimizations in heat processing', *Food Technol,* 36 (7) 97-100.

LUND D B (1988) 'Effects of heat processing on nutrients', in *Nutritional Evaluation of Food Processing,* eds Harris R S and Karmas E, Westport, Connecticut, AVI Publishing, 319.

NARDKARNI M M and HATTON T A (1985) 'Optimal nutrient retention during the thermal processing of conduction-heated canned foods: application of the distributed minimum principle', *J Food Sci,* 50 1312-21.

OHLSSON T (1983) 'Fundamentals of microwave cooking', *Microwave World,* 4 (2) 4-7.

OHLSSON T (1990) 'Control heating uniformity - the key to successful microwave products', *European Food and Drink Rev,* 2 7-11.

OHLSSON T (1991) 'Microwave processing in the food industry,' *European Food and Drink Rev,* 3 21-5.

PHAM Q T (1987) 'Calculation of thermal process lethality for conduction-heated canned foods', *J Food Sci,* 52 (4) 967-74.

PHAM Q T (1990) 'Lethality calculation for thermal process with different heating and cooling rates', *J Food Sci Technol,* 25 148-56.

PUROHIT K S and STUMBO C R (1972) 'Computer calculated parameters for thermal process evaluations', in *Thermobacteriology in Food Processing,* 2nd edition, ed Stumbo C R, New York, Academic Press, 154.

RAMASWAMY H sand ABDELRAHIM K (1991) 'Thermal processing and food quality', *Encyclopedia of Food Science and Technology,* Cutten, C A, VCH Publishers, 2552-61.

RAMASWAMY H S, V and ER VOORT F R and GHAZALA S (1989) 'An analysis of TDT and Arrhenius approaches for handling of process ahd kinetic data', *J Food Sci,* 54 1322-6.

SAGUY I (1983) 'Optimization methods and applications', in *Computer-aided Techniques in Food Technology,* ed Saguy I, New York, Marcel Dekker.

SAGUY I and KAREL M (1979) 'Optimal retort temperature profile in optimizing thiamin retention in conduction-type heating of canned foods', *J Food Sci,* 44 1485-90.

SCHULTZ 0 T and OLSON F C W (1940) 'Thermal processing of foods in tin containers. III. Recent improvements in the general method of thermal process calculations - a special coordinate paper and methods of converting initial and retort temperatures', *Food Res,* 5 399-407.

SELMAN J D (1988) 'The blanching process', in *Developments in Food Preservation* - 4, ed Thorne S, Barking, UK, Elsevier Applied Science Publishers.

SIZER C E, WAUGH P L, EDSTAM S and ACKERMANN P (1988) 'Maintaining flavor and nutrient quality of aseptic orange juice', *Food Technol,* 42 (6) 152.

STUMBO C R (1949) 'Further considerations relating to evaluation of thermal processes for foods', *Food Technol,* 3 126-31.

STUMBO C R (1973) *Thermobacteriology in Food Processing,* 2nd edition, New York, Academic Press.

STUMBO C R and LONGLEY R E (1966) 'New parameters for process calculations', *Food Technol,* 20 341-5.

TAJCHAKAVIT S and RAMASWAMY H S (1997) 'Continuous-flow microwave inactivation kinetics of pectin methyl esterase in orange juice', *J Food Processing Preservation,* 21 (5) 365-78.

TAJCHAKAVIT S, RAMASWAMY H S and FUSTIER P (1999) 'Enhanced destruction of spoilage microorganisms in apple juice during continuous flow microwave heating', *Food Res Internat,* 31 (10) 713-22. TEIXEIRA A A, DIXON J R, ZAHRADNIK J W and ZINSMEISTER G E (1969) 'Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction-heated foods', *Food Technology,* 23 845-50.

TEMPEST P (1996) *Electroheat Technologies for Food Processing,* Bulletin of APV processed food sector, PO Box 4, Crawley, W. Sussex, England.

THIJSSEN HAC and KOCHEN L H P J M (1980) 'Calculation of optimum sterilization conditions for packed conduction-type foods', *J Food Science,* 45 1267-72.

THOMPSON D R (1982) 'The challenge in predicting nutrient change during food processing', *Food Technol,* 36 (2) 97-108, 115.

TOLEDO R T and CHANG S Y (1990) 'Advantages of aseptic processing of fruits and vegetables', *Food Technol,* 44 (2) 72-6.

TRAGARDH C and PAULSSON B (1985) 'Heat transfer and sterilization in a continuous flow heat exchangers', in *Developments in Food Preservation* - 3, ed Thome S, Barking, UK, Elsevier Applied Science Publishers, 245.

TUNG M A and GARLAND T D (1979) 'Computer calculation of thermal processes', *J Food Sci,* 43 365-9.

VILLOTA R and HAWKES J G (1986) 'Kinetics of nutrients and organoleptic changes in foods during processing', in *Physical and Chemical Properties of Food,* ed Okos M R, Chicago, IL, American Society of Agricultural Engineers.