تقدير زمن تجميد المنتج في غرفة التجميد باستخدام دورة هواء

الدكتور المهندس إبراهيم الأمين

الأستاذ المساعد في قسم هندسة الطاقة–كلية الهندسة الميكانيكية–جامعة حلب

الملخص

تجميد الغذاء هو واحد من التطبيقات الأكثر أهمية للتبريد. ولكي تكون عمليات التجميد فعالة من حيث التكلفة، من الضروري تصميم معدات التبريد على النحو الأمثل. وهذا يتطلب تقدير زمن تجميد الأغذية. وقد اقترحت أساليب تحليلية / تجريبية عديدة للتنبؤ بزمن تجميد الأغذية. ولذلك يواجه مصممو تجهيزات التبريد الغذائي التحدي المتمثل في اختيار طريقة تقدير مناسبة من عدد كبير من الطرق المتاحة.

يُنظر إلى النموذج الرياضي الذي يسمح بتحديد زمن تجميد المنتج في غرفة تجميد ذات دوران هواء، استنادًا إلى معادلات التوازن الحراري في غرفة التجميد وافتراضات تجانس المنتج وتوزيع منتظم للحرارة على الحجم في كل نقطة زمنية. يأخذ النموذج في الاعتبار تأثير الفجوة الهوائية في العبوة وسرعة الهواء ودرجة حرارة غليان وسيط التبريد.

الكلمات المفتاحية: التجميد في الهواء، تغيرات درجة الحرارة، زمن التجميد، توازن الحرارة.

المصطلحات

Q	كمية الحرارة	$[J]$
U	معامل انتقال الحراة	$\left[W/m^2.^0C\right]$
A	المساحة	$\left[m^2\right]$
k	معامل التوصيل الحراري	$\left[W/m.^0C\right]$
f	معامل انتقال الحرارة بالحمل	$\left[W/m^2.^0C\right]$
h	الإنتالبي	$\left[J/kg\right]$
c	الحرارة النوعية	$\left[J/kg.^oC\right]$
m	الكتلة	$[kg]$
x	سماكة	$[m]$
T	درجة حرارة	$\left[^0C\right]$
V	الحجم	$\left[m^3\right]$
τ	الزمن	$[s]$
v	السرعة	$\left[m/s\right]$
N	استطاعة	$[W]$
ρ	الكثافة	$\left[kg/m^3\right]$
L	الحرارة الكامنة	$\left[J/kg\right]$
η	المردود	[-]

o	الوسط المحيط (الخارجي)	a	هواء	w	عامل، جدار
i	داخلي	p	منتج	n	عدد
e	مبخر، محرك	b	صندوق	l	إضاءة
c	مكثف	$en.$	غلاف	s	صلب
$fr.$	تجميد	s	سطح	in	استثمار

1- المقدمة

الحفاظ على الغذاء هو واحد من أهم تطبيقات التبريد. من المعروف أن تجميد الطعام: (1) يحافظ على الغذاء (2) يُقلل بشكل فعال من نشاط الكائنات الدقيقة والأنزيمات، مما يؤدي بالتالي إلى (3) تأخير التدهور. بالإضافة إلى ذلك، فإن تبلور الماء يُقلل من كمية الماء السائل في المواد الغذائية (4) ويحول دون نمو الميكروبات.

تستخدم العديد من أنواع المجمدات لهذا الغرض. بعض هذه هي: (1) المجمدات الدافعة للهواء، دفعة، أو الهواء المستمر؛ (2) المجمدات الحلزونية. (3) مجمدات الطبقة المميعة؛ (4) المجمدات اللوحية (ألواح مسطحة باردة)؛ (5) مجمدات غمر السائل (يتم استخدام محلول ملحي أو غليكول مبرد، ويمكن أيضاً رشها). و (6) المجمدات المبردة (يستخدم سائل N_2 درجة حرارة الغليان $196-\left[{}^{o}C\right]$ أو سائل CO_2 درجة حرارة الغليان $79-\left[{}^{o}C\right]$).

تعتمد مجمدات الأغذية الصناعية التقليدية على تقانات نظام هواء الوسط (المكان) [1]، حيث يتم اعتماد الهواء البارد، بسبب رخصه وانخفاض مخاطر تلوث الطعام، وذلك لتقليل درجة حرارة الطعام تحت نقطة التجمد، حتى الوصول إلى درجة حرارة نهائية تبلغ حوالي $18-\left[{}^{o}C\right]$ في الجزء الداخلي من المنتج. عادة، يتراوح متوسط درجة حرارة سائل وسيط التبريد من $20-\left[{}^{o}C\right]$ إلى $40-\left[{}^{o}C\right]$، مع سرعة تتراوح بين $(1-6)\left[m/s\right]$ اعتماداً على نوع وحجم وشكل المنتج الغذائي المراد معالجته. يمكن تجميد الطعام من خلال عملية دفعية في غرفة تجميد مغلقة ومعزولة.

من العوامل ذات الصلة التي تؤثر على الجودة النهائية للمنتجات الغذائية المجمدة، وبالتالي، تصميم معدات مصانع الصناعات الغذائية، هو زمن التجميد. هذ البارامتر مشروط بشدة بالتركيب الكيميائي للغذاء، من حيث محتوى الماء ونسبة المواد الصلبة غير القابلة للذوبان [2]، وخصائص السائل. أثناء عملية التجميد، لا يحدث تغير طور المحتوى السائل للأغذية عند درجة حرارة ثابتة. في الواقع، عندما تبدأ عملية التجميد عند درجة حرارة التجميد الأولية، بسبب تبلور جزء من الماء، يزيد

تركيز المُذاب في المحلول المائي المتبقي، وبالتالي يُخفض من نقطة تجمد الجزء غير المجمد من الطعام. هذه الظاهرة تؤدي تدريجياً إلى خفض درجة الحرارة المطلوبة للحفاظ على عملية التجميد ومتابعتها، حتى يتم الوصول إلى التجميد الكامل للمنتج. في هذه العملية، الجليد جزء من الغذاء هو بارامتر مهم يصف الخصائص الحرارية الغذائية المتغيرة. عملية التجميد السريع، باستخدام وسط بدرجة حرارة منخفضة جداً حتى تحت $[\,^oC\,](-80/-90)$، يمكن أن تضمن التحول السريع للمياه الموجودة في الطعام إلى بلورات جليدية دقيقة، متجنبة إتلاف أغشية الخلايا الغذائية [3]، كما قد يحدث أثناء التجميد في درجة الحرارة القياسية $[\,^oC\,](-20/-40)$.

لكي تكون عملية تجميد الأغذية فعالة من حيث التكلفة، من الضروري تصميم معدات التجميد على النحو الأمثل لتلائم المتطلبات المحددة لتطبيق التجميد المحدد. ويتطلب تصميم معدات التبريد هذه تقدير زمن تجميد الأغذية، فضلاً عن أحمال التبريد المناظرة.

2- أهمية البحث وأهدافه

التجميد هو واحد من أقدم وأكثر الوسائل استخداماً لحفظ الأغذية. ومن المعروف أنه وسيلة فعالة للغاية للحفاظ على الغذاء لفترات طويلة منذ العصر الحجري الحديث، عندما استخدم الإنسان الجليد والثلوج لتبريد الغذاء. وكان تصنيع الثلج في البحيرات الضحلة باستخدام "التبريد الليلي" الإشعاعي والحفاظ على الجليد والثلوج في البيوت الثلجية ممارسة شائعة في البيوت الريفية الكبيرة في العصر الفيكتوري. كان الجليد منتجاً فقط للحلويات المتميزة، والمثلجة كانت عصرية للغاية وعلامة على ثروة كبيرة.

لكي تكون عملية التجميد فعالة من حيث التكلفة، يجب أن تتلاءم معدات التجميد مع المتطلبات المحددة لتطبيق التجميد المعين. ويتطلب تصميم معدات التجميد هذه تقدير زمن التجميد. ويمثل زمن التجميد طول الفترة الذي يتعرض فيه المنتج لوسيط التبريد ويمثل عاملاً حاسماً في تحديد كفاءة استخدام الطاقة في العملية. تجميد المنتج هو عملية معقدة. يجب إزالة الحرارة المطلوب من المنتج قبل التجمد، لتقليل درجة

حرارته إلى نقطة التجمد. هذه النقطة هي أقل إلى حد ما من نقطة تجمد من الماء النقي.

التجميد هو العملية التي يتم فيها خفض درجة حرارة المنتج تحت نقطة التجمد وجزء من الماء فيه يتحول إلى بلورات جليد والذي ينتج عنه تركيز للمواد الذائبة في الجزء من الماء غير المتجمد وهذا يُخفض النشاط المائي في المنتج. وعلى ذلك فالعامل الحفظي في هذه التقنية يتم من خلال تعاضد كل من: (1) الحرارة المنخفضة، (2) النشاط المنخفض (الناشئ من تركيز المواد الذائبة في الكمية القليلة من الماء غير المتجمد)، (3) البارامترات التي تجري قبل التجميد.

يمكن للتجميد الناجح أن يحافظ على المنتج تقريباً في شكله الأصلي. ويجعل هذا من الممكن الحفاظ على المنتجات ونقلها في جميع أنحاء العالم. كما يمنع التجميد نمو الميكروبات، يمكن تخزين المواد الغذائية المجمدة لفترات طويلة. ليست هناك حاجة لاستخدام المواد الحافظة أو إضافات لتمديد العمر الافتراضي. يسمح التجميد بالمرونة في التصنيع والتوريد، ويعني أنه يمكن الحفاظ على المنتج عند قرب الجودة المثلى للتوزيع والنقل.

يلعب تجميد الأغذية دوراً هاماً كعملية حفظ في صناعة الأغذية. على الرغم من استخدامه على نطاق واسع، فإن التعقيد الذي ينطوي عليه العملية يجعل من الصعب جدًا على المرء التنبؤ بزمن تجميد الطعام بدقة. ومع ذلك، قد يكون زمن التجميد هو أهم متغير يجب معرفته قبل إنشاء وحدة التجميد. في عمليات التجميد المستمرة، يتناسب حجم معدات التجميد اللازمة لأداء مهمة تجميد معينة مع زمن التجميد. لذلك، فإن التقليل من زمن التجميد يمكن أن يؤدي إلى عدم كفاية الاستطاعة الإنتاجية للمعدات، بينما قد يؤدي المبالغة في تقديرها إلى تكاليف غير ضرورية في مواد البناء، والمكان المادي والطاقة.

يهدف البحث إلى تقدير زمن تجميد المنتج في غرف التجميد باستخدام دورة هواء.

3- طرائق البحث ومواده

3-1- التحليل النظري

إن عدم وجود تعريف ثابت لزمن التجميد هو أحد المشاكل المرتبطة بالدراسات المنشورة حول تجميد الأطعمة. تنشأ هذه المشكلة بشكل رئيسي لأن الأطعمة لا تتجمد عند درجة حرارة ثابتة، بل يحدث على مدى درجات حرارة تغير الطور. يتطلب تعريف زمن التجميد تعريف نقطة التجمد. يوجد توزيع متغير لدرجة الحرارة داخل المنتج الغذائي أثناء عملية التجميد، مما يعطي زمن تجميد مختلف حسب النقطة داخل المنتج حيث يتم مراقبة درجة الحرارة. يستخدم "المركز الحراري"، والمعرّف بأنه الموقع في المواد التي يتم تبريدها بشكل أبطأ، بشكل عام كموقع مرجعي. زمن التجميد الفعال، الذي يحدده المعهد الدولي للتبريد [4]، هو الزمن الإجمالي المطلوب لخفض درجة حرارة المواد الغذائية في مركزها الحراري إلى درجة الحرارة المطلوبة تحت نقطة التجميد الأولية. التعريفات الأخرى هي:

- الزمن اللازم لخفض درجة حرارة المنتج في مكان التبريد من نقطة التجميد الأولية إلى درجة الحرارة المرغوبة والمحددة بأقل نقطة تجميد أولية.
- المعهد الدولي للتبريد [4] التعريف: هو النسبة بين المسافة الدنيا من السطح إلى المركز الحراري والزمن المنقضي بين السطح الذي يصل إلى $\left[{}^{o}C\right]0$ والمركز الحراري الذي يصل إلى أبرد بمقدار $\left[{}^{o}C\right]5$ من درجة حرارة التكوين الأولي للجليد عند المركز الحراري [$cm/hr.$].

زمن التجميد هو واحد من أهم البارامترات في عملية التجميد، ويُعرف بأنه الزمن اللازم لخفض درجة حرارة الغذاء من درجة الحرارة الأولية لدرجة حرارة معينة في المركز الحراري. وبما أن توزيع درجة الحرارة داخل المنتج يختلف أثناء عملية التجميد، فإن المركز الحراري يُؤخذ بصفة عامة كمرجع. وهكذا، عندما يصل المركز الهندسي للمنتج إلى درجة الحرارة النهائية المحددة، ويضمن هذا خفض متوسط درجة حرارة المنتج إلى درجة حرارة التخزين. يعتمد زمن التجميد على عدة عوامل، بما في

ذلك درجات الحرارة الأولية والنهائية للمنتج وكمية الحرارة المزالة، وكذلك الأبعاد (خاصة السماكة) وشكل المنتج وعملية نقل الحرارة ودرجة الحرارة. ويحدد المعهد الدولي للتبريد مختلف عوامل زمن التجميد. أهمها:

1- أبعاد وشكل المنتج، وخاصة السماكة.

2- معامل نقل الحرارة السطحية للمنتج.

3- درجات الحرارة الأولية والنهائية.

4- التوصيل الحراري للمنتج.

5- درجة حرارة وسط التبريد.

6- تغيير في الإنتالبي (المحتوى الحراري).

حساب زمن التجميد في النظم الغذائية أمر صعب بالمقارنة مع النظم النقية.

3-2- التنبؤ بزمن التجميد

من المهم أن نتنبأ بدقة بزمن تجميد الأغذية لتقييم الجودة ومتطلبات المعالجة والجوانب الاقتصادية لتجميد الأغذية. تم اقتراح عدد من النماذج في الدراسات للتنبؤ بزمن التجميد. ومع ذلك، بما أن عملية التجميد هي مشكلة حدودية متحركة، أي مشكلة تنطوي على تغيير في المرحلة، فإن معظم الحلول أحادية الطور وغير المستقرة غير مناسبة.

الأغذية، التي تمر بالتجميد، تطلق الحرارة الكامنة على مجموعة من درجات الحرارة. لا يحدث التجمد عند درجة حرارة ثابتة. بالإضافة إلى ذلك، لا تحتوي الأغذية على خصائص حرارية ثابتة أثناء التجميد [3]. نتيجة لذلك، لا يوجد نموذج رياضي دقيق للتنبؤ بتجميد الأطعمة. استخدم الباحثون ، الذين وجدوا حلاً، إما اختلاف محدود أو طرق عناصر محددة. لذلك، تتراوح نماذج التنبؤ بزمن التجميد بين الحلول التحليلية التقريبية والأساليب العددية الأكثر تعقيدًا.

تم القيام بعدد كبير من الدراسات لتطوير نماذج رياضية للتنبؤ بزمن تجميد الطعام. تعتمد دقة هذه النماذج على مدى قرب الاقتراب من الافتراضات المقابلة.

عادة ما يتم تصنيف معظم هذه النماذج في واحد من شكلين، تحليلي أو رقمي، مع اعتبار الأخير أكثر دقة نظرًا لوجود مجموعة من الافتراضات والشروط الحدية، والتي هي ذات طبيعة أكثر واقعية، تم استعراض 30 طريقة مختلفة للتنبؤ بزمن التجميد والذوبان [4]. يتم إعطاء تفاصيل حول هذه النماذج في مكان آخر [5،6].

كان النهج العام للباحثين في مجال تجميد الطعام هو البحث عن علاقات تقريبية أو تجريبية، بدلاً من محاولة استخلاص المعادلات التحليلية الدقيقة. يمكن تصنيف الطريقة إلى مجموعتين: (1) الطرق التي تعتمد على التقديرات التحليلية، أو (2) طرق تعتمد على نتائج الحاسوب أو البيانات التجريبية، تختلف الطرق بشكل كبير من حيث التعقيد والدقة، وعدد البارامترات أو التجريبية.

3-3- معادلة بلانك

استمدت معادلة بلانك على أساس مبدأ توازن الطاقة [7]. وتعطى بالعلاقة التالية:

$$q = hA\left(T_i + T_s\right) \quad \ldots(1)$$

$$\tau_{fr.} = \frac{\rho L}{T_{fr.} - T_i}\left[\frac{P.\alpha}{h} + \frac{R.\alpha^2}{k_{p.fr.}}\right] \quad \ldots(2)$$

قيم P و R الأشكال المختلفة للأطعمة تعطى بالجدول (1):

الجدول (1): قيم P و R الأشكال المختلفة للأطعمة.

	لوحي	أسطواني	كروي
P	1/2	1/4	1/6
R	1/8	1/16	1/24

تتمثل حدود معادلة بلانك كما يلي:

1- يُهمل الزمن اللازم لإزالة الحرارة فوق نقطة التجميد الأولية.

2- لا يعتبر الإزالة التدريجية للحرارة الكامنة على مدى درجات الحرارة أثناء عملية التجميد.

3- التوصيل الحراري الثابت المفترض للمواد المجمدة.

4- يفترض أن يكون المنتج بالكامل في طور سائل.

3-4- الدراسة التجريبية

عند تصميم غرف التجميد واختيار معدات التبريد، من الضروري تحديد زمن عملية التجميد بشكل موثوق. وفي نفس الوقت، تؤخذ في الاعتبار درجة الحرارة في الغرفة، ومتطلبات عملية إنتاج الأغذية، والخصائص الحرارية الفيزيائية للمنتج، وطريقة التركيب ونوع التغليف، ومستوى رأس المال وتكاليف التشغيل. أثناء عملية التبريد، تتغير درجة حرارة المنتج، ودرجة حرارة الهواء، ودرجة حرارة التبخير (الغليان) لوسيط التبريد. يعود سبب الاهتمام إلى اعتماد درجات الحرارة هذه في الزمن المحدد تحت ظروف مختلفة في الغرفة (درجة الحرارة، سرعة الهواء). سنقوم بتقدير زمن تجميد المنتج في الغرفة مع دوران الهواء الذي يوفره مراوح تبريد الهواء.

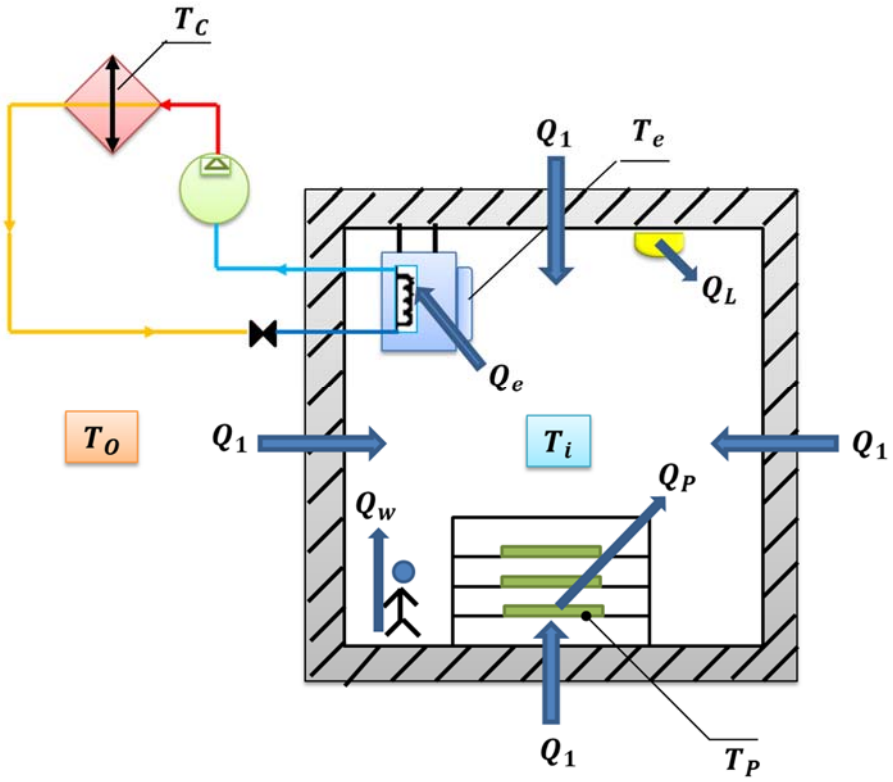
يمكن وصف تغير الحالة الحرارية للهواء في غرفة التجميد مع الحمل الموضوع فيها، وفقًا لمخطط الحساب الشكل (1) ، بالعلاقة التالية:

$$m_a.c_a \frac{dT_a}{d\tau} = Q_w + Q_p + Q_a + Q_{in} \qquad \ldots(3)$$

يمكن تمثيل تدفق الحرارة الناتج من المنتج إلى الهواء، مع مراعاة تجانس المنتج، ومعدل متوسط خواصه الفيزيائية الحرارية والتوزيع المنتظم لدرجة الحرارة على النحو التالي:

$$Q_p = m_p \frac{dh_p}{d\tau} = U_p A_p \left(T_p - T_a\right) \qquad \ldots(4)$$

يمكن تحديد الإنتالبي $h_p = f\left(T_p\right)$ لكل منتج على أساس البيانات المتاحة عن الخواص الفيزيائية الحرارية. ويعتمد معامل انتقال الحرارة من المنتج إلى الهواء على المقاومة الحرارية للحزمة، ووجود فجوة هوائية بين المنتج وجدار العبوة (الغلاف)، وسرعة الهواء.



الشكل (1): الرسم التخطيطي لتدفقات الحرارة في غرفة التجميد.

يتم تحديد معامل انتقال الحرارة من خلال عزل الجدران والسقف والأرضية بالعلاقة التالية:

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{f_o}+\frac{x_{ins.}}{k_{ins.}}+\frac{1}{f_i} \qquad \ldots(5)$$

يحسب الحمل الحراري الناتج من الوسط المحيط إلى الوسط المبرد خلال الجدران والسقف والأرضية نتيجة وجود فرق بدرجات الحرارة بالعلاقة التالية:

$$Q_w = U\,A\left(T_o - T_i\right) \qquad \ldots(6)$$

يتم حساب استطاعة التبريد بالعلاقة التالية:

$$Q_e = U_e\,A_e\left(T_a - T_e\right) \qquad \ldots(7)$$

يتم حساب معامل انتقال الحرارة من المنتج إلى هواء الغرفة بالمعادلة (8) بالعلاقة التالية:

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{\alpha_p}+\frac{x_{b.}}{k_{b.}}+\frac{x_{en.}}{k_{en.}}+\frac{x_{a.}}{k_{a.}} \quad \ldots(8)$$

حيث يكون معامل انتقال الحرارة من سطح المنتج α_p دالة لسرعة تدفق حجرة الهواء الخاصة بحزمة المنتج v_a ويتم تحديدها بواسطة الصيغة للأسطح المسطحة [3] $\alpha_p = 7.3\, v_a^{0.8}$، يتم تعريف سرعة الهواء أدناه؛ يتم أخذ مقاومة حرارية $x_{b.}/k_{b.}$ لصندوق الكرتون، $x_{en.}/k_{en.}$ كيس التغليف $x_{a.}/k_{a.}$ والفجوة الهوائية داخل الصندوق، بيانات عن معاملات التوصيل الحراري للكرتون، كيس التغليف [3]. مع هذه الطريقة لتعبئة الأسماك، يختلف سمك طبقة الهواء داخل الصندوق بشكل كبير من الصفر في القاع إلى القيمة القصوى على السطح العلوي المستوي (تحت الغطاء). في المتوسط، يمكن أن يكون سمك طبقة الهواء من [mm](5-12)، وبالتالي، في المعادلة للكيلوغرام، هذا البارامتر هو متغير.

يمكن تحديد سرعة الهواء على النحو التالي.

$$v_a=\frac{V_a}{A_p} \quad \ldots(9)$$

بالإضافة إلى التدفقات الحرارية الرئيسية الأنفة الذكر، توجد تدفقات حرارية أخرى ناجمة عن استثمار غرفة التجميد، الإضاءة، العمال، المراوح الكهربائية الداخلية والكسب الحراري من خلال فتح الأبواب عند التحميل.

حمل الإضاءة

الطاقة الكهربائية المنقولة إلى مصابيح الإضاءة تتحول بكاملها إلى حرارة ولذلك إذا كانت N استطاعة المصابيح بـ [W] الموجودة في غرفة التجميد، فالتدفق الحراري في واحدة الزمن يكون:

$$Q_l = N \quad \ldots(10)$$

حمل العمال

كمية الحرارة التي ينشرها العامل الواحد أثناء العمل المتوسط الجهد حوالي 350 $[W]$، وبالتالي فالتدفق الحراري الناتج عن العمال:

$$Q_w = 350\, n_w \qquad \ldots(11)$$

حمل المحركات الكهربائية

في غرفة التجميد يمكن أن بعض الأجهزة كالمراوح في نظام التبريد الهوائي، فالحرارة التي تطرحها تنتقل إلى هواء الغرفة وتحسب بالعلاقة التالية:

$$Q_e = \eta_e \sum N_e \qquad \ldots(12)$$

الحمل الحراري من خلال فتح الأبواب

الكسب الحراري من خلال فتح الأبواب عند التحميل يعطى بالعلاقة التالية:

$$Q_a = B.A \qquad \ldots(13)$$

إن قيمة B تتعلق بحجم غرفة التجميد.

حمل استثمار غرفة التجميد

$$Q_{in.} = Q_l + Q_w + Q_e + Q_a \qquad \ldots(14)$$

4- النتائج والمناقشة

وفقاً للطريقة الموصوفة، تم حل المعادلات بطريقة رقمية لغرفة تجميد الأسماك في صندوق من الورق المقوى (الكرتون) $(35\times32\times8)[cm]$ مع وجود فجوة هوائية داخلها. في الحساب أعلاه، تم الأخذ بالخصائص الحرارية الفيزيائية للمنتج بالنسبة لطبقة جافة معبأة بإحكام من الأسماك في كيس بلاستيكي.

الشروط الأولية في اللحظة الأولى من الزمن، بعد تحميل غرفة التجميد:

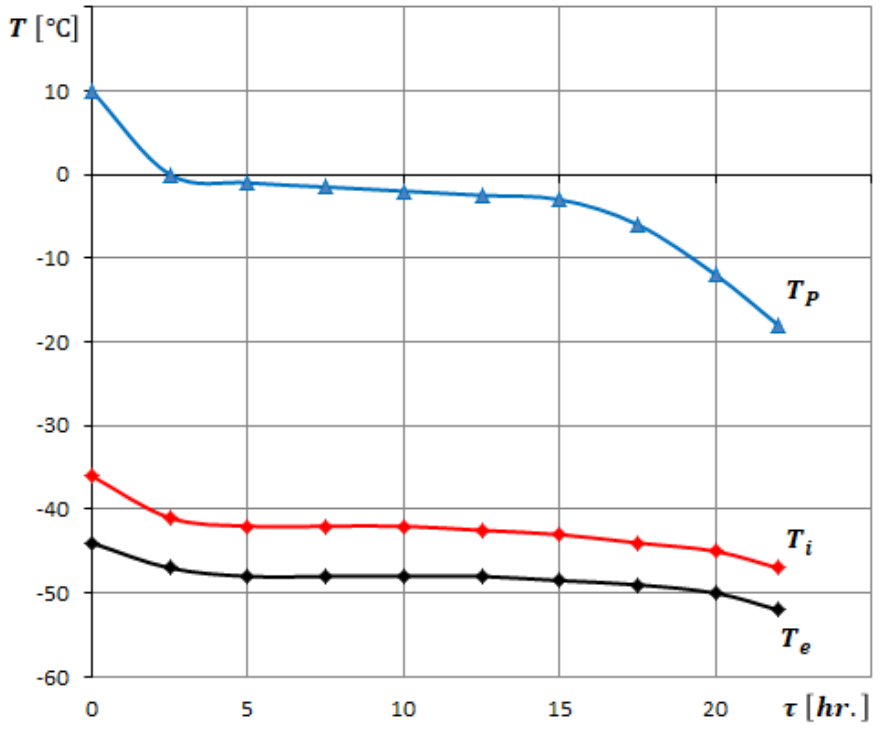
- درجة حرارة التحميل $T_p = 10\left[{}^0C\right]$
- درجة حرارة الهواء $T_a = \left[(-30)-(-35)\right]\left[{}^0C\right]$
- درجة حرارة التبخر $T_e = \left[(-30)-(-35)\right]\left[{}^0C\right]$

نتائج الحل هي الرسوم البيانية للتغيرات في درجة الحرارة T_p ، T_a، T_e مع مرور الزمن. يسمح النموذج الرياضي المبني لغرفة التجميد، في إطار الافتراضات المقدمة، بتقييم مختلف العوامل على عملية تبريد المنتج. أجريت سلسلتين من الحسابات. في المرحلة الأولى، كان من المفترض أن تعمل آلة التبريد بأقصى سعة تبريد تحت هذا الوضع (بدون توقف وفقاً لدرجة الحرارة في الغرفة أو ضغط الغليان). تحت نظام يشير إلى نقطة الغليان الحالية. يبين الشكل التوضيحي الشكل البياني للتغيرات في متوسط درجة حرارة المنتج ودرجة حرارة الهواء ونقطة الغليان بسرعة هوائية مقدارها $4[m/s]$، ومتوسط سماكة الفجوة الهوائية في الصندوق قدره $1[cm^3]$. يتم خفض درجة حرارة المنتج من الدرجة الأولى $+10[^oC]$ إلى $0[^oC]$ بسرعة كبيرة في $2.5[hr.]$، ثم من $0[^oC]$ إلى $-3.5[^oC]$، تتباطأ عملية التجميد بشكل كبير، يرجع ذلك إلى تبلور الماء في المنتج وإزالة الحرارة من التبلور، هذه العملية هي أطول وتستمر بين $(14-12.5)[hr.]$، ثم بعد تجميد الكمية الرئيسية من الرطوبة، فإن معدل التبريد يزيد تدريجياً، ليصل إلى القيمة الأولية، وتستمر المرحلة الأخيرة حوالي $7[hr.]$.

تستغرق العملية الكاملة للتجميد إلى درجة حرارة متوسطة تبلغ $-18[^oC]$ في هذه الحالة $22[hr.]$. نظرًا لأن وحدة التبريد تعمل بشكل مستمر، يتم تحديد فرق درجة حرارة توازن معين في الغرفة بين المنتج والهواء $(T_p - T_a)$، بالإضافة إلى نقطة غليان معينة، والتي لا تتغير عمليًا ويتم تحديدها بواسطة استطاعة وحدة التبريد ككل في هذا الوضع. مع زيادة استطاعة التبريد، سيزداد فرق درجة الحرارة بين الهواء والحمل، أي انخفاض نقطة الغليان، وهذا يؤدي إلى انخفاض في زمن التجميد في المنطقة ما بين $[(0)-(-3.5)][^oC]$. على النحو التالي من الحسابات، في معظم الأحيان، يتم الاحتفاظ بدرجة الحرارة في الغرفة عند $-42[^oC]$، وفي نهاية قطرات التجميد إلى $-47[^oC]$. بشكل عام، هذه قيم منخفضة تؤثر على انخفاض في ضغط الغليان وزيادة في الحمل على الضاغط. ستؤدي زيادة استطاعة التبريد إلى

زيادة أكبر في فرق درجة الحرارة $\left(T_p - T_a\right)$، وهو أمر غير عملي بسبب انخفاض نقطة الغليان.

يمكن تقليل اختلاف درجة الحرارة بين الهواء والحمولة عن طريق تقليل المقاومة الحرارية للحزمة.

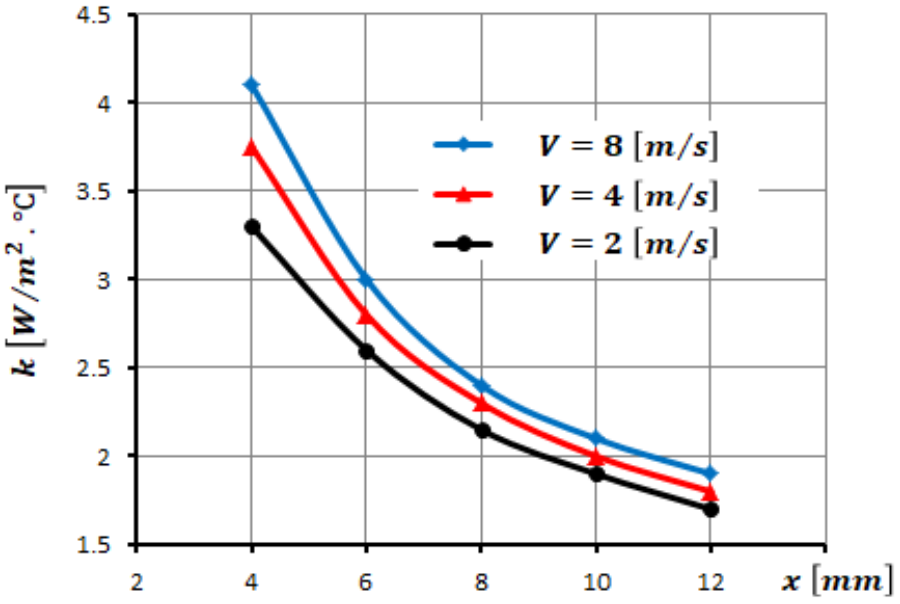


الشكل (2): تغيير درجة الحرارة مع الزمن $\left(x = 10[mm], v_a = 4[m/s]\right)$.

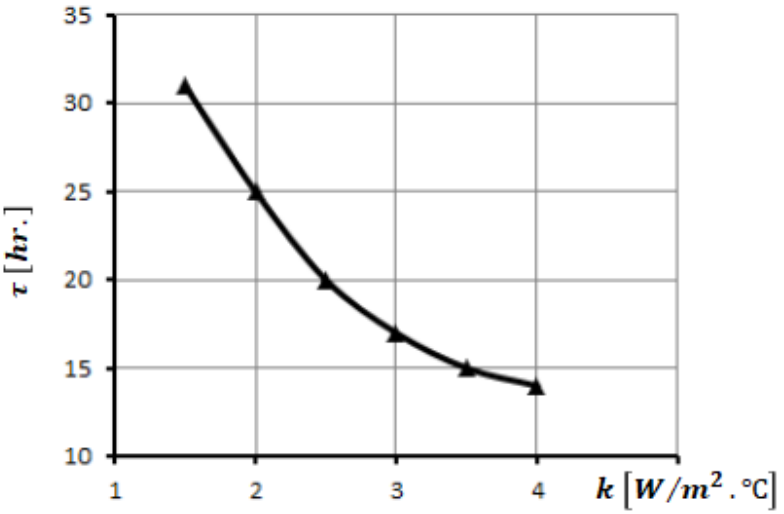
تم تنفيذ السلسلة الثانية من العمليات الحسابية مع الأخذ بعين الاعتبار تحديد زمن تشغيل وحدة التبريد أثناء عملية التجميد على درجة حرارة الغرفة (أو على ضغط الغليان، وليس أقل من $0.1[MPa]$. عند درجة حرارة $T_a = -38[^oC]$، يتم إيقاف إمداد المبردات إلى مبردات الهواء، وعندما ترتفع درجة الحرارة بمقدار $5[^oC]$، يتم

استئنافها. في هذه الحالة، الفرق في درجة حرارة الهواء هو الحمل ليست كبيرة كما في الحالة الأولى، وبالتالي، فإن درجة الحرارة نقطة الغليان (الضغط) أعلى، حيث يتم ضبطها عند $-41\left[{}^{o}C\right]$، وهذا يؤدي إلى زيادة طفيفة في زمن التجميد. لكن وحدة التبريد تعمل بفرق ضغط أقل واستهلاك أقل للطاقة.

يبين الشكل (3) معامل انتقال الحرارة على وسماكة طبقة الهواء في الصندوق عند سرعات هواء مختلفة. عند سرعات الهواء العالية والطبقات البينية الأصغر، يكون معامل انتقال الحرارة أعلى بشكل ملحوظ، وهذا يؤثر على تقليل زمن التجميد. الرسم البياني لزمن التجميد مقابل معامل انتقال الحرارة موضح في الشكل (4).



الشكل (3): معامل نقل الحرارة من الحمل، اعتمادا على سرعة الهواء وسماكة الفجوة الهوائية x.



الشكل (4): زمن تجميد المنتج

5- الاستنتاجات

نتيجة للتحليل:

- تبين أن انخفاض معامل انتقال الحرارة من المنتج إلى هواء غرفة التجميد له تأثير كبير على سرعة وزمن التجميد في هذه الحالة، فإن البارامترات الرئيسية لهذه الطريقة هي المقاومة الحرارية للطبقة الهوائية البينية في العبوة وسرعة تدفق الهواء.
- يمكن تطبيق هذه التقنية، وفقًا للافتراضات التي تم إجراؤها حول تجانس خصائص المنتج، لتقدير تقريبي زمن التجميد لعينات فردية أو منتجات أخرى.
- يتم إدخال نتائج البحث في العملية التعليمية بالجامعات.

المراجع

1- DEMPSEY P., BANSAL P., 2012- **The art of air blast freezing: Design and efficiency considerations**, *Appl Therm Eng*, **47**, 71-83.

2- ASHRAE. *Refrigeration ASHRAE Handbook*, 2010.

3- ROLFE E., 1968- **The chilling and freezing of foodstuffs,** *Biochemical and Biological Engineering Science*, **2**, 137–208.

4- HAYAKAWA K., 1977- **Estimation of heat transfer during freezing or defrosting of food**, *Freezing, Frozen Storage, and Freeze Drying*, **1**, 293–301.

5- HUG Y., 1990- **Prediction of cooling and freezing times**. *Food Technology* **5**, 137–153.

6- RAMASWAMY H., TUNG M., 1984- **Review on predicting freezing times of foods**. *Journal of Food Process Engineering* **7**, 169–203.

7- MAKSIMOV V., 1998- **Compressor and refrigeration engineering at the present stage**, *Bulletin Kazan, technology*, **1**, 104 - 113.

8- KOBOULASHVILLI S., 1961- **Refrigeration technology, Encyclopedic reference,** Book 2,. Gostorgizdat, 575.

9- VALENTAS K., 2004- **Food Engineering**: **A Handbook with Examples of Calculations**, Profession, 848.

Determination of product freeze time in freezing room using an air cycle

Dr. Eng. Ibrahim Alamin

Assistant Professor in Energy Engineering-Faculty of Mechanical Engineering-University of Aleppo

Abstract

Freezing food is one of the most important applications of refrigeration. For freezing to be cost-effective, refrigeration equipment should ideally be designed. This requires an estimate of the food freezing time. Several analytical / empirical methods have been proposed to predict the timing of food freezing. Therefore, designers of food refrigeration facilities face the challenge of choosing an appropriate method of estimation from a large number of available methods.

The mathematical model, which allows the freezing of the product in a freezing room with an air circulation, is considered based on the room's equilibrium equations, the homogeneity of the product and the regular distribution of temperature at each time point. The model takes into consideration the effect of the air gap in the package, the air speed and the cooling temperature of the cooling medium.

Key words: freezing in air, temperature changes, freezing time, heat balance.