الفصل الأول

الخصائص الفيزيائية والكيميائية للماء ودورها في الأغـــذية

Structural physical and chemical properties of water and its role in Food Systems

الدكتور غسان حماده الخياط

مقدمة : يعد الماء من أهم المكونات الرئيسة في الأغذية ، كما أن الصناعات الغذائية تعتمد اعتماداً كبيراً على الماء ، كما هو الحال في عمليات توليـد البخـار للتعقيم والتسخين وتنظيف الآلات والأجهزة والأدوات ، بالاضافـة إلى استخدام الماء أثناء التصنيع نفسه لمختلف المنتجات • والجدول التالي يوضح كميـات الماء المستخدمة في تصنيع بعض المنتجات الغذائية •

الحليب السائل	١ر٧٠٠ ــ ٨ر٠٠٠	غالون/طناً حليباً
الحليب المركز	٢ر٢٠٠ ــ ٤ر٤٠٠	غالون/طناً حليباً
منتجات اللحوم	٤ر٠٠٠ ــ ١٦ر٠٠٠	غالون/طناً وزناً حياً
التعليب	٥ر٠٠٠ ــ ٤٠٠ر٠٠٠	غالون/طناً ناتجاً نهائياً

جدول (١ ــ ١) ، يوضح كميات المياه المستهلكة أثناء تصنيع بعض المنتجات الغذائية

وتحتوي اللحوم على نسبة تتراوح من ٦٥ ــ ٧٠٪ من وزنها ماء • والأسماك على ٨٠٪ والخضراوات والفاكهة على ٩٠٪ والحليب البقري على ٨٧٪ والبقوليات على ١٠ ــ ٢٠٪ أما جسم الانسان فيحتوي على ٦٥٪ ماء •

لذلك يعد الماء من أهم ضروريات الحياة والنمو ، ذلك أن الماء هو المذيب لكثير من المركبات والغازات نظراً للتركيب الكيميائي الخاص الذي يتمتع به • كما أن توازن الماء water balance في الجسم من أهم ضروريات الحياة •

ويوجد الماء في الأغذية بواحدة أو أكثر من الصور التالية :

١ــ الماء الحر Free water : مثل الماء الموجود بين الأنسجة النباتية أو الحيوانية •

٢ــ الماء المرتبط hydrate water : مثل الماء المرتبط بروابط هيدروجينية مع بعض المركبات مثل السكريات العديدة أو البروتينات •

٣ــ ماء الترطيب الهلامي imbibed water gel : وهو يشبه النوع السابق، إلا أنه في هذه الحالة يحدث انتفاخ للمادة الممتصة أو انتباجها بالماء •

٤ــ الماء الممتص على أسطح المواد الصلبة :

water apsorped on the surface of solides

٥ــ الماء المرتبط كيميائياً Chemically bound water : وهو الماء الذي يعد من أصل تركيب المادة ، ولا يمكن فصله إلا بعد تفكيك التركيب الكيميائي لهذه المادة •

الخصائص الكيميائية للماء : Chemical properties of water

أولاً : الروابط المختلفة لجزيء الماء :

Inter molecular atractive force in HOH Molecules

لدى مقارنة صفات الماء بصفات المركبات الأخرى القريبة من الأوكسجين في الجدول الدوري مثل HF , NH_3 , CH_4 , H_2S , HCl نجد أن الماء يتمتع بدرجة غليان وانصهار وحرارة كامنة للتبخير وللانصهار مرتفعة ، كما أن سطحه النوعي ، ومقدرته على التوصل الكهربائي يعدان عاليين • ويوضح الجدول التالي بعض هذه الخواص •

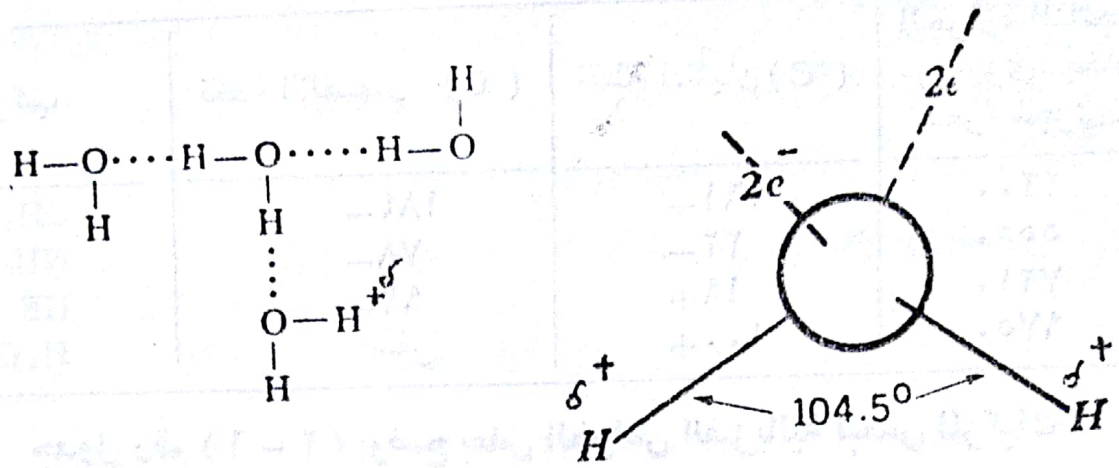
المركب	نقطة الانصهار (°C)	نقطة الغليان (°C)	الحرارة الناتجة عن جزيء بخار سعر/للجزيء
CH_4	١٨٤–	١٦١–	٢٢٠٠
NH_3	٧٨–	٣٣–	٥٥٥٠
HF	٩٢–	١٩+	٧٢٢٠
H_2O	صفر	١٠٠+	٩٧٥٠

جدول رقم (١ – ٢) يوضح بعض الخواص الفيزيائية لبعض المركبات

هذه الخواص تدل على وجود روابط قوية بين جزيئات الماء ، لدى مقارنتها بالمواد الأخرى في الجدول ويعود ذلك إلى السببين التاليين :

السبب الأول : قابلية جزيء الماء لتكوين روابط هيدروجينية Hydrogen bonding ، وهذا عائد لقابلية الأوكسجين القوية على جذب الالكترونات Electronegativity ، حيث يعد الأوكسجين ثاني العناصر بعد الفلورين في قدرته على اجتذاب الالكترونات ، وعلى هذا الأساس يجتذب الأوكسجين الكترونات على حساب ذرات الهيدروجين الموجودة في جزيء الماء . ولذلك تتكون على الأوكسجين شحنتان سالبتان جزيئتان (–٢) وتبقى على الهيدروجين شحنة موجبة جزئية واحدة (+) نتيجة لجذب الالكترون الوحيد لها بوساطة الأوكسجين ، وهذه الشحنة الموجبة على الهيدروجين ، هي شحنة البروتون . ونتيجة لهذا التوزيع (شحنات سالبة على الأوكسجين وشحنة موجبة على الهيدروجين) تتكون لدينا خاصية القطبية (Dipole) التي هي تشكل مراكز للشحنات (مركز سالب ناحية الأوكسجين ، ومركز موجب ناحية الهيدروجين)، ونتيجة لذلك تنتظم جزيئات الماء بحيث يكون مركز سالب من جزيء قريباً من مركز موجب لجزيء مجاور ، والمركز الموجب في الجزيء الأول يكون قريباً من المركز السالب لجزيء ثانٍ ... وهكذا .

وعلى ذلك نجد أنه في حالة الماء ، سواء أكان على حالة سائلة ، أم غازية ، أم متجمدة ، فإن كل هيدروجين مشحون بشحنة موجبة ، يكون مرتبطاً



شكل (١ – ١) تركيب جزيئة الماء والروابط الهيدروجينية

بالأوكسجين المشحون بالشحنة السالبة ، عن طريق رابطة هيدروجينية ، وفي هذه الرابطة تعمل ذرة الهيدروجين ، كجسر بين ذرتي الأوكسجين ذواتي الشحنات السالبة • والرابطة الهيدروجينية هذه تعد ضعيفة إذا ماقورنت بالروابط الأخرى•

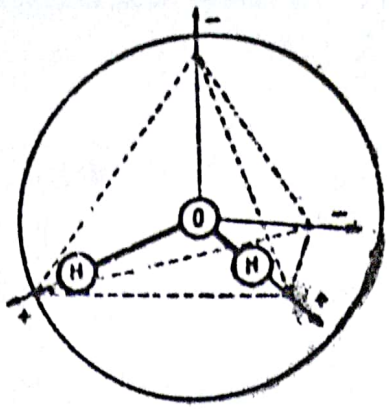
H–bonding	1.3-6.8	K cal/mole
C – C	80	K cal/mole
C – H	98	K cal/mole
O – H	101	K cal/mole
C = C	145	K cal/mole

جدول رقم (١ – ٣) يوضح قوة بعض الروابط الكيميائية

إلا أن وجود الروابط الهيدروجينية بكميات كبيرة في المركبات الحيوية ، يجعلها ذات تأثير كبير في الخواص الفيزيائية لهذه المركبات •

السبب الثاني : هو التركيب الذري والشكل الفراغي Atomic composition & Geometry •يوجد الماء على شكل رباعي Tetrahedron كما هو موضح في الشكل (١ – ٢) •

حيث يوجد الأوكسجين فيوسط هذا الرباعي ، وذرتا الهيدروجين موجودتان على أي خطين يمران بإحدى الزوايا ، وبهذه الطريقة تتكون مراكز للشحنات السالبة والموجبة ، وعن طريقها تتكون أيضاً الروابط الهيدروجينية ، ويؤدي وجود هذا التركيب إلى :



شكل رقم (١ ــ ٢) يوضح التركيب الذري والشكل الفراغي لجزيء الماء

آ ــ تشكل أكبر كمية ممكنة من الروابط الهيدروجينية .

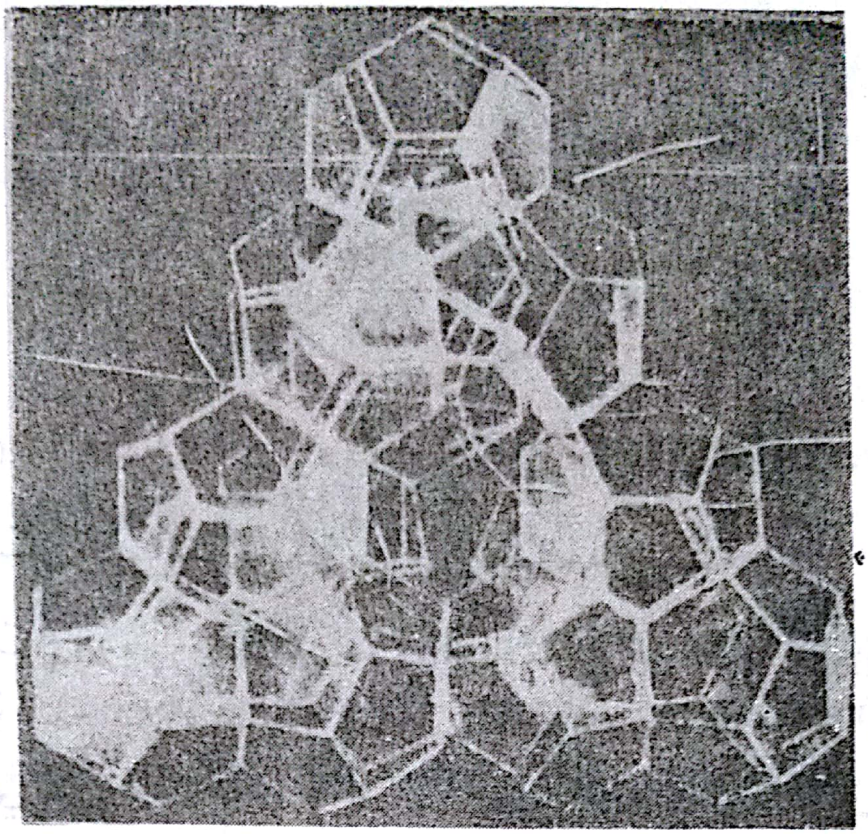
ب ــ تشكل هذه الروابط من جميع الجهات 3 dimentional H - bonding

ففي حالة الثلج مثلاً، نجد أنه تتكون كميات كبيرة من الروابط الهيدروجينية (أكبر كمية هي ٤ روابط هيدروجينية لكل جزيء ماء ، أي ارتباط كل جزيء ماء مع أربعة جزيئات أخرى ، اثنين عن طريق ذرة الأوكسجين ، واثنين عن طريق ذرة الهيدروجين) ونتيجة لذلك يتكون التركيب المنتظم للبلورات الثلجية .

أما فوق درجة حرارة الانصهار (ثلج ← ماء) ، فإن أعداد الروابط الهيدروجينية تقل ، وهذا طبيعي ، لأنه لدى إدخال طاقة إلى الماء ، فإن هذه الروابط تتكسر . والماء البارد يحتوي على تجمعات من جزيئات الماء (aggregates) .

هذه التجمعات ليس لها تركيب ثابت ومحدد ، بل هي تتفرق وتتجمع تبعاً للظروف المحيطة بها ، وبالتالي لا يكون هناك تركيب ثابت لها كما هو الحال في الثلج .

وتبقى هذه التجمعات موجودة مع ارتفاع درجة حرارة الماء ، حتى درجة الغليان (١٠٠) ، والدليل على ذلك هو ارتفاع درجة حرارة غليان الماء . إلا أنه لدى تحول الماء إلى بخار ، فإن هذه الروابط الهيدروجينية تتكسر . وقد وجد أن أكبر كمية من الروابط الهيدروجينية ، تكون موجودة على الدرجة (ــ١٨٣° م)، أما على درجة الصفر المئوي فإن ٥٠٪ منها فقط تكون موجودة ، وعلى الدرجة



شكل رقم (١ ــ ٣) يوضح المنظم للبلورات الثلجية

١٠٠° م يكون ثلثها ، وتتكسر كل هذه الروابط لدى تحول المـاء إلى بخار عـلى الدرجة ١٠٠° م .

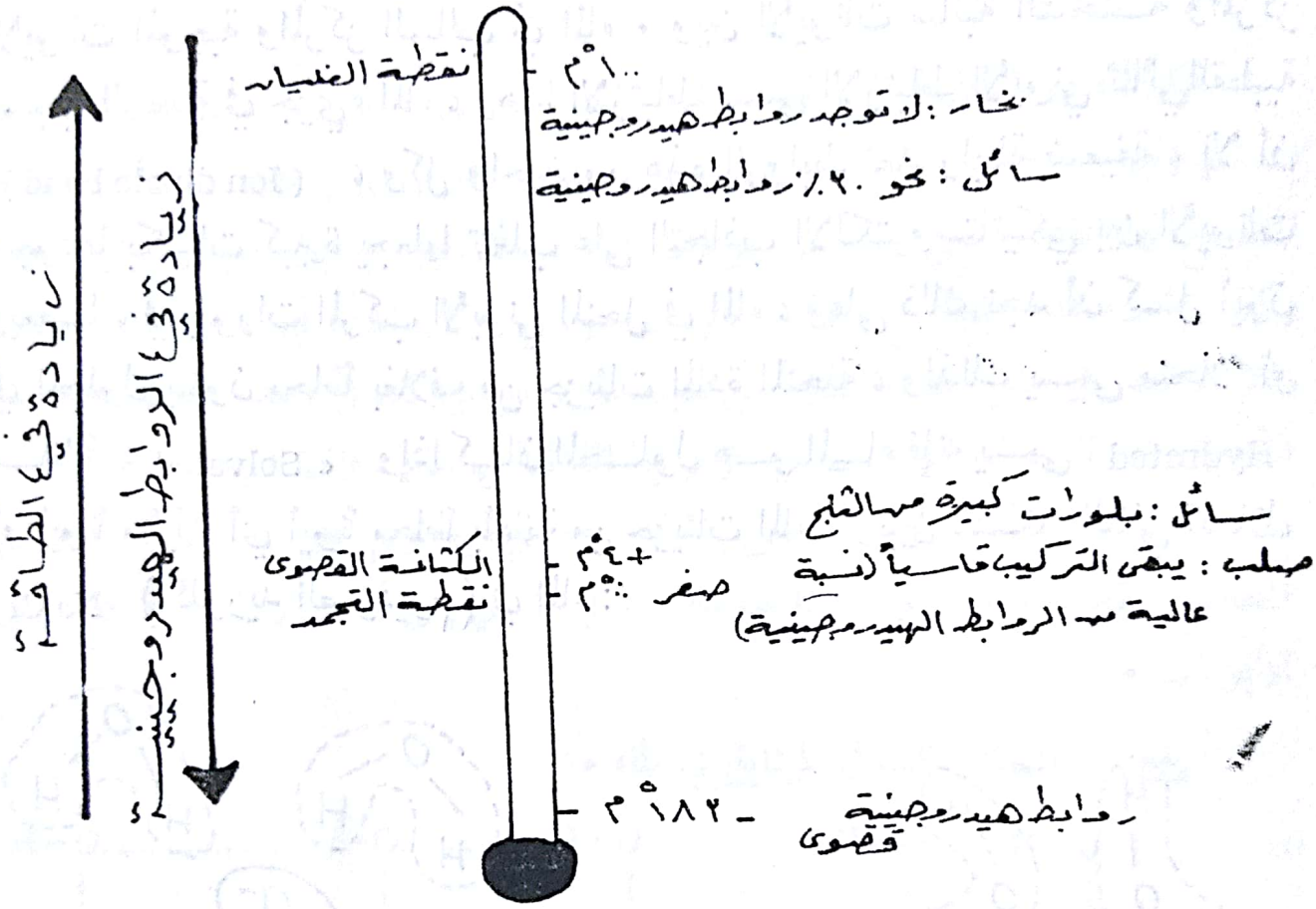
ومن المعلوم أنه لدى انصهار الثلج ، تزيـد كثافته ومع ازدياد درجة الحرارة عن الصفر ، تزيد الكثافة حتى الدرجة ٤° م ، وأي زيادة في درجـة الحرارة بعـد ذلك تقلل من الكثافة ، والسبب في ذلك أن الحرارة تؤدي إلى :

١ــ تقليل حجم التجمعات المائية Aggrigates : وزيادة عددها ، مما يساعد على زيادة الكثافة .

٢ــ التمدد الحراري Thermal expansion : حيث تنخفض الكثافة نتيجة لزيادة الحرارة .

وقد وجد أن العامل الأول يؤثر بين صفر إلى + ٤° م ، لذلك تحدث زيادة في كثافة الماء .

أما العامل الثاني فيؤثر بعد ٤° م ، لذلك يحدث نقص في كثافة الماء ، أما عند ٤° م فإنه يكون هناك توازن بين العاملين .

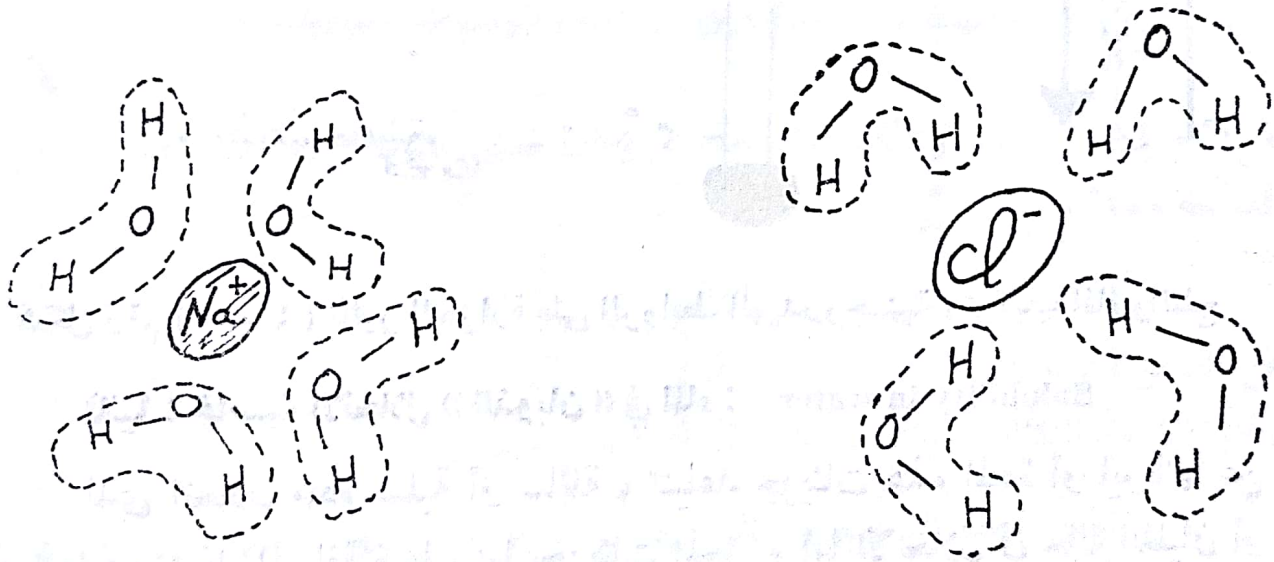


شكل رقم (١ ــ ٤) تأثير الحرارة على الروابط الهيدروجينية وتركيب الماء والثلج

ثانياً : خاصية الانحلال « الذوبان » في الماء : Solubility in water

لدى انحلال مادة صلبة أو سائلة ، تتباعد جزيئات هذه المادة أو ايوناتها عن بعضها ، وتشغل المسافة فيما بينها بجزيئات المحل . أما الانحلال في حالة الغليان أو الانصهار ، فيحتاج إلى طاقة لتكسير الروابط بين أيونات المادة المنحلة أو جزيئاتها، وهذه نحصل عليها من تشكل الروابط بين جزيئات المادة المنحلة وجزيئات المحل. في المركبات الأيونية ، فإننا نحتاج إلى كميات كبيرة من الطاقة ، للتغلب على الروابط الالكتروستاتيكية ، Electrostatic Bonding (الروابط الكهربائية الساكنة) التي تربط هذه الأيونات مع بعضها ، وعلى العموم فإن الماء وقليلاً من المحلات شديدة القطبية Polar solvents ، يمكن أن تحل المركبات الأيونية ، وحيث

أن الماء يعد شديد القطبية ، فهو يحتوي على مركز للشحنات الموجبة وآخر للشحنات السالبة (Dipole) ، وبذلك يحدث تجاذب (الكتروستاتيكي) يبين الأيونات الموجبة والمركز السالب في الماء • وبين الأيونات سالبة الشحنة والمركز موجب الشحنة في جزيء الماء ، وهذا الارتباط يسمى الارتباط الأيوني ثنائي القطبية (Ion dipole bond) ، وكل واحدة من هذه الروابط تعد رابطة ضعيفة ، إلا أن وجودها بكميات كبيرة يجعلها تتغلب على التجاذب الالكتروستاتيكي بين الأيونات وبعضها ، في بلورات المركب الأيوني المنحل في الماء ، وعلى ذلك نجد أن كل أيون في المحلول يكون محاطاً بغلاف من جزيئات المادة المنحلة ، ولذلك يسمى منحلاً أو مذاباً « Solvated » وإذا كان المحلول هو الماء فإنه يسمى Hydrated أو أيوناً مائياً ، أي أيوناً محاطاً بأغلفة من جزيئات الماء ، ويبين الشكل التالي انحلال Na Cl (كلوريد الصوديوم) في الماء :



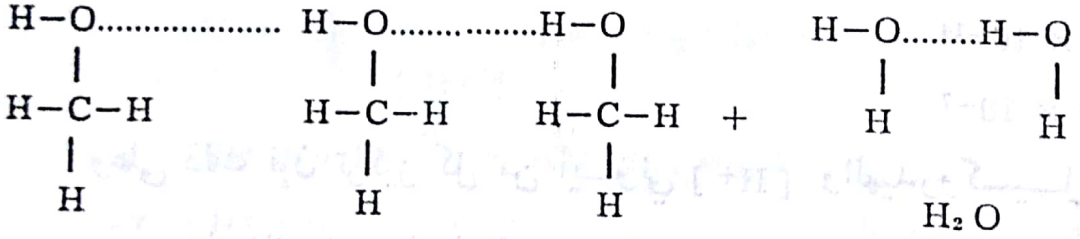
شكل رقم (١ ــ ٥) التداخلات الأيونية ــ القطبية لدى انحلال ايونات Na+ و Cl-

أما انحلال المركبات غير الأيونية فيعتمد على درجة قطبيتها ، فالمركبات غير القطبية أو ضعيفة القطبية تنحل في المحلات غير القطبية أو ضعيفة القطبية في حين أن المركبات القطبية تنحل في المحلات القطبية • مثلاً : مركب الميتان Methane ينحل في رباعي كلوريد الكربون C-tetrachloride ، لأن الروابط التي تربط

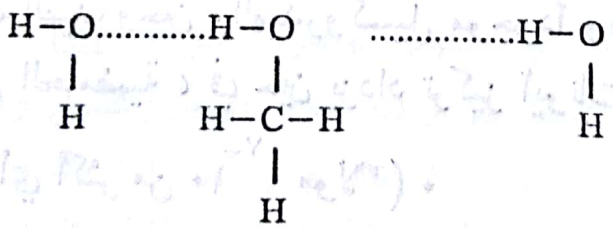
جزيئات الميتان ببعضها ، تشابه تلك التي تربط جزيئات رباعي كلوريد الكربون ، وبالتالي يرتبط الميتان برباعي كلوريد الكربون بالروابط نفسها ، ونجد أن كلا المركبين لا يذوبان في الماء .

أما الماء ذو القطبية العالية، فيمكنه أن يذيب بسهولة كل المركبات ذات القطبية، بسبب وجود المجاميع القطبية Polar - groups مثل NH_2 , OH , ... الخ هذه المجاميع لها القدرة على اجتذاب جزيئات الماء ، وتشكيل روابط هيدروجينية معها، وكلما زادت هذه المجاميع القطبية ، زادت درجة انحلال المادة في الماء ، فالسكريات مثلاً : تحتوي على أعداد كبيرة من مجموعات الهيدروكسيل ، مما يجعلها سريعة الذوبان في الماء ، أما المركبات غير الأيونية الذائبة في الماء ، فإنها عادة ما تكون في صورة جزيئات في المحلول ، ولكن إذا كان الجزيء يحتوي على كميات كبيرة من المجاميع القطبية ، فإن قوة اجتذاب الماء لها قد تؤدي إلى كسر الروابط بها وتكوين الأيونات .

مثال : انحلال كحول الميثايل في الماء .



روابط هيدروجينية في الماء روابط هيدروجينية بين جزيئات الميثانول (CH_3OH)



روابط هيدروجينية بين جزيئات الميثانول والماء
شكل (١ – ٦) يوضح انحلال كحول الميثانول في الماء

ثالثاً : تأين (تشرد) الماء : **Ionizated of water**

يتأين الماء تبعاً للمعادلة :

$$2H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + OH^-$$

وبصورة مبسطة يمكن كتابة معادلة تأين الماء كالتالي :

$$H_2O \rightleftharpoons OH^- + H^+$$

وبذلك فإن ثابت التأين للماء هو :

$$K = \frac{[H^+]\ [OH^-]}{[H_2O]}$$

وفي المحاليل المخففة ، فإن تركيز الماء يكون ثابتاً $[H_2O]$ وتكون المعادلة :

$$K\ [H_2O] = [H^+]\ [OH^-]$$

حيث K هي ثابت وبالنسبة للماء يسمى (ثابت الماء) Water constant ويعطى بالرمز K_w على الدرجة ٢٥° م

$$K_w = [H^+]\ [OH^-] = 1.0 \times 10^{-14}$$

وفي الماء النقي فإن

$$[H^+] = [OH^-]$$

$$[H^+]\ [OH^-] = 1.0 \times 10^{-14}$$

$$X^2 = 1.0 \times 10^{-14}$$

$$X = 1.0 \times 10^{-7}$$

وعلى ذلك فإن تركيز كل من أيوني $[H^+]$ والهيدروكسيل $[OH^-]$ هو 10^{-7} ، في الماء النقي أو في أي محلول متعادل على درجة ٢٥° م ، ويكون كل من أيونات الهيدروجين والهيدروكسيل موجوداً ويزداد تركيز أيون الهيدروجين في المحاليل الحامضية ، في حين يزداد تركيز أيونات الهيدروكسيل في المحاليل القاعدية (أي أكثر من 10^{-7} مولاً) .

وللتعبير عن تركيز أيون الهيدروجين Hydronium ion يستعمل ما يسمى رقم الحموضة (pH) ويعرف رقم الحموضة أنه : الأس السالب للوغاريتم تركيز أيون الهيدروجين ، وبذلك فإن :

$$pH = \log\left(\frac{1}{[H^+]}\right) = -\log[H^+]$$

$$[H^+] = 10^{-pH} = \text{Anti}\log(-pH)$$

وفي المحاليل المتعادلة :

$$[H^+] = 1.0 \times 10^{-7}$$

$$pH = -\log(10^{-7}) \qquad pH = 7$$

كذلك يمكن التعبير عن تركيز أيون الهيدروكسيل $[OH^-]$ بالرمز pOH ، وهو الأس السالب للوغاريتم تركيز أيون الهيدروكسيل ونظراً لأن :

$$[H^+][OH^-] = 10^{-14}$$

$$-\log[H^+] - \log[OH^-] = -\log 10^{-14}$$

$$p[H^+] + p[OH^-] = 14$$

بعض الخواص الفيزيائية للماء : Some physical proporties of water

١ ــ نقطة التجمد : Freezing point

نقطة تجمد الماء النقي هي الصفر المئوي تحت الضغط الجوي العادي ، وإضافة مواد غير طيارة إلى الماء سوف تؤدي إلى خفض نقطة التجمد ، كما في المعادلة :

$$\Delta T_f = K_p \frac{1000\ g}{GM} = K_p\ m$$

حيث إن :

ΔT_f = النقص في نقطة التجمد .

K_p = ثابت للماء = ١ر٨٦ .

G = وزن السائل المحل (غ) .

g = وزن المادة المنحلة (غ) .

M = الوزن الجزيئي للمادة المنحلة .

Molality = m

$$\text{Molality} = \frac{\text{(غ) مادة منحلة} \times ١٠٠}{\text{(غ) محل} \times \text{الوزن الجزيئي للمادة المنحلة}}$$

وهذه المعادلة تطبق فقط على المحاليل المخففة التي تحتوي على مواد منحلة، لا تتحلل ولا تتجمع ، وإذا تأينت ، فيجب أن يدخل ذلك في الحساب .

مثال : ماهي نقطة التجمد امولاً من محلول السكروز

$$\Delta T_f = K_p \, m = 1.86 \times 1 = 1.86$$

$$F_p = 0 - 1.86 = -1.86$$

ماهي نقطة تجمد امولاً من محلول كلوريد الصوديوم

$$\Delta T_f = (K_p \, m)\,Na\,(K_p \, m)\,Cl$$

$$= (1.86 \times 1)(1.86 \times 1) = 3.46$$

$$F_p = -3.46$$

٢ ـ الكثافة : Density

كثافة الماء ١ غ/سم^3 على الدرجة ٤° م ، وارتفاع درجة الحرارة أو انخفاضها عن ذلك ، يؤدي إلى انخفاض الكثافة كما شرح سابقاً .

٣ ـ الحرارة النوعية : Specific heat

تعرف الحرارة النوعية لأي مادة ، بأنها النسبة بين كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كغ من المادة الغذائية درجة واحدة ، إلى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كغ واحد من الماء درجة واحدة .

وبذلك فإن الحرارة النوعية للماء تساوي الواحد ، وهي متساوية على درجات الحرارة المختلفة (صفر ــ ١٠٠° م) في حين أن الحرارة النوعية للثلج هي ٠٫٤٩٢، وتقل بانخفاض درجة الحرارة حتى تصل إلى ٠٫١ على درجة ــ ٢٥٠° م .
ووحدات قياس الحرارة هي :

آ ــ السعر الصغير Calorie : وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة غرام واحد من الماء المقطر درجة مئوية واحدة .

ب ــ السعر الكبير Kilo calorie : وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوغرام واحد من الماء المقطر درجة مئوية واحدة .

ويجب أن تتعرف على المصطلحات التالية لأهميتها في فهم الخواص الفيزيائية للماء :

British Thermal Unit (BTU) أو وحدة حرارية بريطانية ، وهي كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة رطل واحد من الماء درجة فهرنهايتية واحدة .

ــ الحرارة الملموسة Sensible heat : وهي الحرارة التي تنتج منها زيادة في درجة حرارة المواد .

ــ الحرارة الكامنة : Latent heat : وهي كمية الحرارة بالسعرات اللازمة لتحويل غرام واحد من المادة من حالة إلى أخرى بدون رفع درجة حرارتها ، أو كمية الحرارة بالـ BTU اللازمة لتحويل رطل واحد من المادة من حالة إلى أخرى بدون رفع درجة حرارتها .

ــ الحرارة الكامنة للتبخير Latent heat of vaporization : وهي كمية الحرارة اللازمة لتبخير غرام مولي من المادة من الحالة السائلة ، إلى بخار على الدرجة نفسها من الحرارة .

والجدول التالي يبين حرارة التبخير للماء على درجات حرارة مختلفة :

المادة	درجة الحرارة م°	سعر/غ
ماء	صفر	٥٩٦
ماء	٢٠	٥٨٥
ماء	٤٠	٥٧٤
ماء	١٠٠	٥٤٠
حمض الخل	١١٨	٩٥
ميثانول	٦٥	٢٩٣

جدول رقم (١ ــ ٤) يبين حرارة التبخير للماء على درجات حرارة مختلفة

والحرارة اللازمة للتبخير هي كمية الحرارة اللازمة للتغلب على الروابط الداخلية للجزيء inter molecular forces في السائل وكذلك الحرارة اللازمة لاعطاء عمل ميكانيكي mechanical work لانتاج البخار وتمدده ضد الضغط الخارجي .

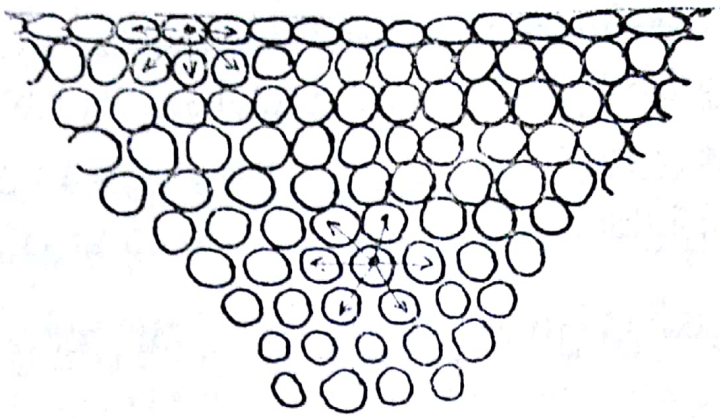
ــ الحرارة الكامنة للانصهار lentent heat of fusion : وهي كميةالحرارة اللازمة لتحويل الثلج إلى ماء على درجة حرارة الصفر المئوي، وهي٧٩ر٧١ سعر/غ ماء وتنتج هذه الكمية الكبير ةمن الحرارة عن الروابط الهيدروجينية العديدة على هذه الدرجة .

ــ عامل التوصيل الحراري Thermal conductivity : وهو كمية الحرارة التي تنتقل بالتوصيل في وحدة وقت خلال وحدة سمك عبر وحدة مسافة لكل وحدة فرق في درجة الحرارة ، ويجب أن يقاس تحت ظروف ثابتة وهي للماء٠٠١٢ر. على درجة صفر درجة مئوية ، وتزيد زيادة بسيطة بارتفاع درجة الحرارة ، وهي للثلج ٠٠٠٥ر. على الدرجة صفر مئوي ، وتقل بانخفاض درجة الحرارة ، وهذه العلاقة هامة حيث أنها تبين أن عامل التوصيل الحراري للثلج خمسة أصناف عامل التوصيل الحراري للماء ، خاصة في عمليات التجميد والانصهار للمواد الغذائية .

٥ ـ التوتر السطحي : Surface Tension :

التوتر السطحي للماء هام في دراسة ميكانيكية عمل المستحلبات والمواد المكونة للرغوة Foam & Emulsions ، لأنها تربط كمية كبيرة من الماء ، والتوتر السطحي هي خاصية في السوائل ، عموماً ، حيث نجد أن الجزيئات الموجودة في وسط السائل تكون متجاذبة بقوى متساوية من قبل جميع الجزيئات الأخرى المحيطة بها ، ولذلك تكون لها حرية الحركة في جميع الاتجاهات • أما الجزيئات الموجودة على سطح السائل ، فإنها تكون منجذبة بقوى جانبية وإلى الأسفل وليس إلى الأعلى كما في الشكل (١ ـ ٧) •

ونتيجة لذلك فإن الجزيئات الموجودة على السطح ، لن تتمكن من التحرك بحرية مثل الجزيئات الداخلية • ونتيجة لقوى الجذب إلى الأسفل ، فإن هذه الجزيئات تميل إلى تقليل مساحة سطحها ، وهذا يؤدي إلى تكوين السطح الكروي



شكل رقم (١ – ٧) يوضح قوى التوتر السطحي لجزيئات الماء

لنقط السوائل • وعلى ذلك فإن الجزيئات الموجودة على السطح تتجاذب مع بعضها مكونة طبقة شديدة التجاذب • والقوى التي ترتبط بها الجزيئات الموجودة على السطح تسمى التوتر السطحي Surface Tension وهي تزداد كلما زاد الارتباط بين الجزيئات السطحية ، وفي حالة الماء فإن التجاذب على السطح يكون عالياً بسبب الروابط الهيدروجينية التي تربط جزيئات الماء ببعضها • ومن المعروف أن للماء توتراً سطحياً أكبر من أي سائل آخر معروف • ماعدا بعض المعادن المنصهرة ووحدات قياس التوتر السطحي هي الدينة dynes وهي القوة اللازمة لمعادلة قوة السحب المتكونة من ١ سم^{٢} من السطح • والتوتر السطحي للماء على الدرجة ٢٠° م هو ٧٢ر٧٥ دينة/سم^{٢} وتقل بازدياد درجة الحرارة •

٦ – الماء الحر والماء المرتبط : Free and Bound water

الماء الموجود في المواد الغذائية المحتوية على بروتينات ومتعددات سكر إما أن يكون على الحالة الحرة أو قد يكون مرتبطاً وقد أثبتت الكثير من التجارب أن الماء الموجود في الأنظمة الحيوية biological systems لا يمكن أن يعمل كمحلل ولا يمكن أن يتجمد ، بسبب كون هذا الماء مرتبطاً ارتباطاً شديداً بمركبات عضوية ولا يمكن له أن يتفاعل تفاعلاً عضوياً طبيعياً ، والاعتقاد السائد هو أن الماء في هذه الحالة يكون مرتبطاً ببعض المجاميع المحبة للماء Hydrophilic groups لتشكيل طبقة منتظمة من جزيء واحد من الماء •

Oriental unimolecular layer of water ومن الطبيعي أن الطاقة اللازمة لهذا الارتباط تقل كلما زاد عدد الطبقات فالبروتين يمكن له أن يرتبط مع ٢٠ــ٥٠ غ ماء/١٠٠ غ بروتين أما هلام الجيلاتين gelatin gels فيحتوي على ١٪ جيلاتيناً و ٩٩٪ ماء ماء ويمكن تعريف الماء المرتبط بأحد التعاريف التالية :

١ــ الماء الذي يبقى بدون تجمد على درجات أقل من صفر مئوي (عادة ــ ٢٠° م) .

٢ــ الماء الموجود في النظام والذي لا يستعمل كمحل، وفي الأنسجة الحيوانية فإن ٨ ــ ١٠٪ من الماء يعد ماءً مرتبطاً أما في الفواكه والخضروات فتبلغ نسبته ٦٪ وعموماً فإن هناك ما يعادل ٣ر٠ غ ماء/غ مادة صلبة خالية من الدهن توجد في معظم الأغذية على صورة ماء مرتبط .

الماء في الصناعات الغذائية Water for the food industry

١ ــ مصادر الماء : water sourses تحصل مصانع الأغذية على الماء اللازم لها ، إما من الشبكة العامة أو من الآبار الخاصة بها . وعادة يفضل المصدر الثاني نظراً لانخفاض تكاليفه عن المصدر الأول . وتسمى مياه الأنهار والبحيرات المياه السطحية أما مياه الآبار فتسمى المياه الجوفية . وعادة فإن المياه السطحية ، تكون غير عسرة وملوثة بمواد عضوية ، في حين أن المياه الجوفية لا تحتوي على مواد عضوية ، إلا أنها تحتوي على كميات كبيرة من المعادن .

٢ ــ الشوائب : Impurities وهذه يمكن تقسيمها إلى :

ــ مواد معلقة
Suspended mater

ــ مواد عضوية ذائبة
. Dissolved organic matter

ــ مواد غير عضوية ذائبة
. Dissolved inorganic matter

ـ غازات ذائبة

. Dissolved gases

ـ أحياء دقيقة

. Micro organisems

والمواد المعلقة،قد تكونغير عضويةمثل بيكربونات الكالسيوم ـ السيليكا ـ فتات الصخر ـ هيدروكسيد الحديدي ـ كبريت • أو عضوية مثل النباتات وأجزاء الحيوانات والدهون والزيوت ، والمواد المعلقة مسؤولة عن عكارة الماء Turbidity ويتراوح حجم المواد المعلقة من الغروي إلى الخشن • فالمواد الخشنة يمكن فصلها بالترسيب ، أما المواد الملونة فهذه تكون ناتجة عن تحولات في المواد العضوية أو من مركبات الحديد • أما الرائحة غير الطبيعية للماء في بعض الأحيان ، فقد يكون سببها بعض المركبات العضوية الطيارة الذائبة في الماء • والماء المضاف له كلورين ، قد تكون رائحته غير طبيعية ناتجة عن تفاعل الكلورين مع المركبات العضوية • مثال ذلك تفاعل المركبات الفينولية مع الكلور ، يعطي الكلوروفينولات ذات الرائحة الكريهة ، كما أن تحلل البروتين يعطي أمينات طيارة ذات رائحة كريهة أيضاً •

تزال الشوائب حسب نوعها بإحدى طرق تنقية المياه • فالترسيب لإزالة المواد المعلقة ، والتجميع بوساطة كبريتات الألمنيوم والكربون المنشط لإزالة المواد العضوية المسببة للون والروائح الكريهة ، كما أن الترشيح خلال الرمل يفصل بعض الشوائب • ويحتوي الماء على أيونات الكالسيوم والمغنزيوم والصوديوم والكلور والنترات والحديد والبيكربونات والكربونات والهيدروكسيد والسلفات والفلوريد والمنغنيز•

٣ ـ عسر الماء : Hardness وعسر الماء معناه وجود أيونات الكالسيوم والمغنزيوم في الماء ، والتي يمكن أن تتحد مع بعض المركبات لتكوين أملاح غير ذائبة •

● العسر المؤقت : يدل على أن العسر ناتج عن بيكربونات الكالسيوم والمغنزيوم ، والتي يمكن أن تتحلل بالغليان وتتحول إلى كربونات كالسيوم غير ذائبة •

● العسر الدائم : ناتج عن الكلوريد أو الكبريتات للمغنيزيوم والكالسيوم .

● العسر الكلي : يعرف على أنه كمية كربونات الكالسيوم جزء/المليون. ويتم إزالة العسر للماء بعدة طرق درست في مقرر الكيمياء العامة في السنة الأولى .

٤ ـ **قلوية الماء :** **Alkaliniy of water** وهذه ناتجة عن التركيزات العالية من الأيونات Anions والتي تعد قواعد قوية Strong Basics ، والكاتيونات Cations التي تعد قواعد ضعيفة (Weakly Basics) ، فالأنيونات تتفاعل مع الماء لتعطي OH^- ، فكربونات وبيكربونات الصوديوم عند إذابتها في الماء تعطي محلولاً قاعدياً وتزيد من قلوية الماء ، وتحسب القلوية (ككربونات كالسيوم / جزيء في المليون) ونحتاج في معظم معامل الأغذية إلى ماء يحتوي على أقل من ١٠٠ جزء/المليون كربونات كالسيوم .

٥ ـ **الغازات في الماء :** يوجد في الماء بعض الغازات الذائبة Dissolved gases وهذه الغازات هي ثاني أوكسيد الكربون ـ الأوكسجين ـ النيتروجين ـ الميتان ـ كبريتور الهيدروجين .

ـ ويصل تركيز CO_2 في مياه الآبار من ٥٠ ـ ٣٠٠ جزء/المليون . أما في المياه السطحية فتنخفض من صفر إلى ٥ أجزاء/المليون من حمض الكربون . وعلى الرغم من أن هذا الحمض يعد ضعيفاً إلا أنه يسبب تآكلاً في معادن الأنابيب وكما هو معروف فإن هذا الحمض يتكون من CO_2 والماء .

ـ أما الأوكسجين فهو يوجد في معظم المياه الطبيعية ، وذوبان الأوكسجين في الماء هو ٤٩ مل/الليتر على درجة الصفر المئوي أما على ٢٥° م فإن ذوبانه يكون ١٦ر٧ مل من الهواء الذي يحتوي على٥ر٧ مل من الأوكسجين، وذوبان النتروجين يبلغ ٩٦ر١٠ مل/لتراً من الماء .

ونظراً لأن ذوبان الهواء في الماء على الدرجة ١٠٠° م يكون صفراً ، لذا يعد الغليان هو الطريقة الرئيسة لإزالة الغازات من الماء • والأوكسجين الذائب في الماء يعد غير مرغوب فيه في الصناعات الغذائية ، نظراً لتأثيره في أكسدة المعادن وتآكلها، ويؤدي إلى عيوب في صناعات المشروبات والتعليب نظراً لتآكل معدن علب الصفيح، كما يساعد على الأكسدة وفساد الأغذية •

ـ كبريتور الهيدروجين H_2S Hydrogen Sulfide : يعطي روائح غير مرغوب فيها تشبه رائحة البيض الفاسد ، ويمكن الكشف عنه بتركيزات منخفضة تصل إلى ٥ر٠ جزء/المليون • ويعد هذا الغاز حمضاً ضعيفاً لدى إذابته، كما في حالة الماءذي القلوية المرتفعة ، ويتحد الكبريتور مع الكاتيونات غير الهيدروجينية • وتحتوي معظم المياه الجوفية على كميات من هذا الغاز التي يجب التخلص منها عند استعمال مثل هذه المياه في الصناعات الغذائية ، وذلك إما عن طريق التهوية أو بالأكسدة أو بوساطة الكلورين $H_2S + \frac{1}{2} O_2 \longrightarrow H_2O + S$

وتعد التهوية من أرخص الطرق بخاصة إذا كان رقم حموضة المياه يميل إلى الحامضية •

ومن ناحية أخرى قد يُضاف إلى الماء أثناء تصنيع بعض المواد الغذائية ، أحد الغازات للاستفادة منها في الحصول على خواص فيزيائية أو كيميائية للمركبات الناتجة ، فغاز ثاني أكسيد الكبريت يضاف إلى المواد الغذائية بغرض تثبيط الاسمرار غير الانزيمي ، وكذلك لتثبيط نمو الفطريات ، كما يضاف غاز ثاني أكسيد الكربون في صناعة المياه الغازية والبيرة ، والأوكسجين هام في صناعة المحاليل الكحولية المعدة لصناعة الخل ، كما يضاف الكلورين إلى الماء لقتل الأحياء الدقيقة •

وعلى الرغم من أن إضافة بعض الغازات يعد مفيداً ومستحباً في بعض الأحيان، إلا أن إزالته بخاصة إزالة الأوكسجين تعد ضرورية للتغلب على فساد الأغذية •

لا تتفاعل بعض الغازات مع الماء في حين أن غازات أخرى مثل SH_2 و CO_2 تتفاعل مع الماء مكونة محاليل حامضية وبذلك تزيد من قابليتها للانحلال،

ب ـ معاملة الماء بالكلورين : Chlorination of water

الماء سواء المخصص للشرب ، أو الذي يستعمل في مصانع الأغذية ، يجب أن يخلو من الأحياء الدقيقة المرضية ، وهذه يكون مصدرها عادة المخلفات الآدمية، وبما أن بكتريا القولون وهي بكتريا غير مرضية إلا أنها توجد بكميات كبيرة في هذه المخلفات، لذلك يمكن قياس مدى تلوث المياه عن طريق العد الميكروبي لبكتريا

القولون في ١ مل من الماء • بالإضافة إلى ذلك تعد الأحياء غير المرضية غير مرغوب فيها في مصانع الأغذية ، بسبب تأثير الأنزيمات الموجودة بها في تفكيك المكونات الغذائية ، مثل البروتين والدهون مؤدية إلى فسادها وتحللها •

وهناك عدة صور للكلورين تستخدم في معالجة المياه منها :

١ً ــ غاز الكلورين : وهو السائد الاستعمال ويذاب غاز الكلورين في الماء ، معطياً حمض الهيبوكلوريت وحمض كلور الماء :

$$Cl_2 + H_2O \longrightarrow HOCl + HCl$$

٢ً ــ هيبوكلوريت الكالسيوم : وتتحلل هذه في الماء إلى أيونات هيبوكلورين والتي تتحد مع أيونات الهيدروجين لتنتج حمض الهيبوكلوريت كما في التفاعل :

$$Ca(OCl)_2 + H_2O \longrightarrow Ca^{++} + 2\,HOCl$$

٣ً ــ هيبوكلوريت الصوديوم $NaClO$ أو ثاني أكسيد الكلورين ClO_2 يستعملان أيضاً في معاملة الماء بالكلورين ، وغاز الكلورين المنتج من سائل الكلورين يعد أحسن مصدر للمصانع وتعتمد درجة انحلال الكلورين على درجة الحرارة والضغط والجدول التالي ، يوضح درجة انحلال غاز الكلورين في الماء ، والذي يزيد بانخفاض درجة الحرارة •

درجة الحرارة م°	درجة الانحلال (غ/١٠٠ غ ماء)
٥	١ر٤٦
٢٠	٠ر٧٦
٤٠	٠ر٤٥
٨٠	٠ر٢٢
١٠٠	٠ر٠٠

جدول رقم (١ ــ ٦) يبين أثر درجة الحرارة على انحلال الكلورين في الماء

وتتميز مركبات الكلورامين عن غيرها بارتفاع قدرتها في تعقيم مصانع الأغذية

وقتل الأحياء الدقيقة ، وأول مركب كلورامين استعمل في الصناعات الغذائيـة هو المعروف تجارياً باسم Chloramine - T ويحتوي محلول مشبع منه على درجة حرارة الغرفة على ١٥٪ كلورينا فعالاً ، ويعامل الماء عادة بغاز الكلورين لينتـج كلورينا فعالاً متبقى بنسبة ٥ ــ ٧ أجزاء/ المليـون وبعض المصانـع ترفعهـا إلى ١٥ ــ ٢٠ جزءاً من المليون ، عنـد استعمال الماء في غسيـل المنتجات • والتركيز المنخفض ٥ أجزاء المليون سوف لن يؤدي لظهور طعم غير مرغوب فيه في المنتجات الغذائية ، مثل الخضراوات ــ الفاكهة ــ الدجاج •

وقد أوضحت التجارب أن استخدام الكلورين ولو بتركيز (٥)أجزاء/المليون في الماء المستخدم لتصنيع معلبات التفاح ، التين ، البطاطا ، الخوخ سوف يـؤدي إلى حدوث طعم غير مرغوب فيه ، أما استعمال الماء المعامل بالكلورين لتحضـير الماليل الملحية المخصصة لتعليب الخضراوات فيعد اختيارياً ، لأنه حتى ولو تفاعـل مع البروتين الموجود في هذه الخضراوات فإن ذلك لا يؤثر في طعم ونكهة الناتج •

جـ ــ غاز ثاني أكسيد الكبريت : Sulfurdioxide استعمل ثاني أكسيد الكبريت كمادة حافظة منذ القدم ويستخدم حالياً في صورته الغازية أو في صورة حمـض الكبريتي أو كبريتيت أو بيكبريتيت •

Sulfurous acid , sulfites , Bisulfites and metabisulfities

ويستخدم حالياً في الصناعات الغذائية إما للاسراع ببعض التفاعلات الكيميائية أو تثبيطها، وفوائد استخدام SO_2 في الأغذية يمكن أن نلخصها كما يلي :

١ــ تخفيض فساد الأغذية أو منعه بوساطة الأحياء الدقيقة •

٢ــ تثبيط بعض أنواع الأحياء الدقيقة غير المرغوب فيها أثناء التخمرات •

٣ــ تثبيط الأنزيمات المسؤولة عن الاسمرار الأنزيمي •

٤ــ تقليل أكسدة حامض الاسكوبيك والكاروتينات والكثير مـن المـواد العضوية سريعة الأكسدة •

٥ــ تثبيط الاسمرار غير الأنزيمي •

٦ــ إزالة لون صبغات الفريز •

درجة حرارة الماء درجة م°	درجة الانحلال غ/١٠٠غ ماء
صفر	٢٢ر٨٣
١٠	١٦ر٨٣
٢٠	١١ر٢٩
٣٠	٧ر٨١
٥٠	٤ر٥٠

جدول رقم (١ ــ ٧) يبين أثر الحرارة في انحلال غاز ثاني اوكسيد الكبريت في الماء

ويستخدم هذا الغاز بإحدى الصور التالية في الماء •

آ ــ غاز ذائب Dissolved gas

جـ ــ ايون الباي سلفيت Bisulfite (HSO_3)

ب ــ حمض الكبريتي Sulfurous acid

د ــ أيون سلفيت Sulfite (SO_3^{--})

وتستعمل أمــلاح الكبريت مــن الصوديوم والبوتاسيــوم في الصناعات الغذائية مثل :

Na_2SO_3 (Sodium sulfite , $NaHSO_3$ (Sodium bisulfite)

$Na_2S_2O_5$ (Sodium metabisulfite)

والأخيرة هي باي‌سلفيت الصوديوم المنزوع منه الماء :

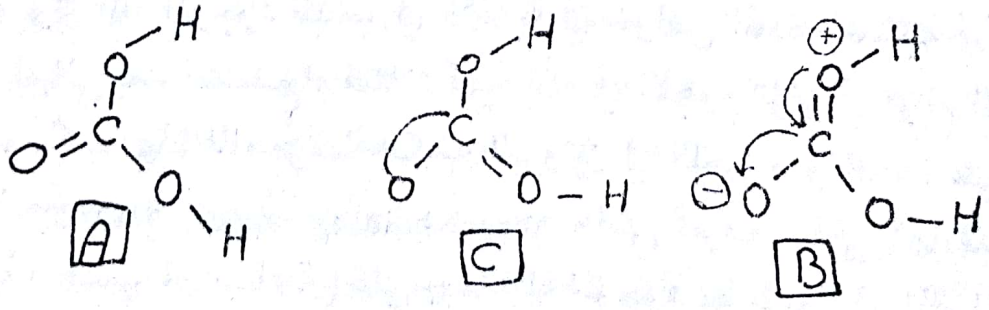
$$2\,HSO_3^- \rightarrow S_2O_5 + H_2O$$

وأملاح السلفيت سهلة الاستعمال ، حيث يمكن تخزينها وتداولها بسهولة، وعادة ما تضاف إلى الأغذية الحامضية ونتيجــة لذلك يتكــون حامض الكبريتي غــير المتأين •

وهذا الحمض وأملاح السلفيت يمكن أن يتأكسدا بسهولة في وجود الأوكسجين إلى كبريتات ، كما أن لهما خواص مضادة للأكسدة وخواص مرجعة ، وبشكل عام فإن استخدام حمض الكبريتي أو الكبرييتيت ، تعد طريقة مؤقتة للحفظ وليست دائمة ، وذلك عند استخدام SO_2 بكميات متوسطة ، لأن هذه المركبات تتأكسد بسرعة لتكون الكبريتات ، كما أن SO_2 يفقد بالتبخير لدى تعرضه لدرجات حرارة مرتفعة .

د ــ ثاني أكسيد الكربون Carbon Dioxide : ويلعب هذا الغاز دوراً كبيراً في الصناعات والمنتجات الغذائية مثل الخبز والمشروبات الكحولية وغير الكحولية كما يتكون غاز CO_2 أثناء تخزين الفاكهة والخضار الطازجة نتيجة لتهدم السكريات ويتشابه تركيب CO_2 مع تركيب الماء من حيث انه ثلاث ذرات فقط ، ولكنه يختلف عن الماء بوجود تناظر في المركب ، وبذلك يكون مركباً غير قطبي . ولدى إضافة غاز CO_2 إلى الماء فإن كمية من حمض الكربون H_2CO_3 تتكون .

وفي الماء النقي فإن أكثر من ٩٩٪ من CO_2 المنحل تكون في صورة CO_2 ، وأقل من ١٪ على صورة حمض كربون وذلك في مدى من درجات الحرارة يتراوح بين صفر و ٥٠° م ، والشكل الفراغي لحمض الكربون يمكن أن يوجد في إحدى الصور الثلاث التالية :



شكل رقم (١ ــ ٩) الشكل الفراغي لحمض الكربون

أما انحلال CO_2 في الماء فهي مبينة في الجدول التالي تحت ضغط ٧٦٠ ملم زئبقي .

درجة حرارة الماء (م°)	درجة الانحلال غ/١٠٠غ ماء
صفر	٠ر٣٣٥
٢٠	٠ر١٦٩
٣٠	٠ر١٢٦
٥٠	٠ر٠٧٦

جدول رقم (١ ــ ٨) يبين أثر الحرارة في انحلال غاز ثاني أوكسيد الكربون

وتعتمد درجة انحلال الغاز على بعض العوامل مثل نسبة السكر والكحول وضغط الغاز وهذه العوامل هامة في صناعة المشروبات الكحولية والمياه الغازية •

القدرة على الاحتفاظ بالماء في الأغذية البروتينية Water holding capacity

يتم أثناء العمليات التصنيعية للأغذية المختلفة إما إزالة الماء أو إضافته ، فمثلاً: في حالة إعادة بعض الأغذية المجففة إلى حالتها الطبيعية أي اضافة ماء إليها أو مايسمى الترطيب hydration ، ويضاف هذا الماء عادة تحت ظروف معينة، وتعتمد هذه العملية اعتماداً كبيراً على خواص البروتين في المادة المجففة، في حين أن امتصاص الماء بوساطة الأغذية الجاذبة للرطوبة hygroscopic ،غير مرغوب فيه وعلى ذلك، تعد دراسة امتصاص الماء بوساطة البروتين في الأغذية المجففة هامة لمعرفة خواص حفظ هذه المواد وكيفية فسادها •

ويؤثر الماء الموجود طبيعياً في الأغذية في خواص المادة الغذائية ، كما يؤثر في الناتج النهائي بعد التصنيع ، فمثلاً كمية الماء في اللحوم تؤثر في قوام اللحم وطعمه ولونه ، وكمية هذا الماء مرتبطة بكمية البروتين في اللحم • والمقدرة على الاحتفاظ بالماء Water holding capacity (WHC) والتي تعرف على أنها قدرة المادة الغذائية (طبيعية أو صناعية) على ربط الماء الموجود بها طبيعياً أو الماء المضاف إليها بدون فقده تحت ظروف معينة • وتعتمد كمية الماء هذه على كمية البروتين ونوعيته والمكونات الأخرى العضوية وغير العضوية والمعاملات الكيميائية والفيزيائية التي تتعرض لها المادة الغذائية •

وكما ذكرنا سابقاً فإن الماء يعد مركباً قطبياً polar ، وذلك نتيجة لتكون مركز للشحنات الموجبة وآخر للشحنات السالبة ، وبذلك يستطيع الماء أن يربط المجاميع الأيونية والقطبية الموجودة في جزيئات البروتين ، وعملية الترطيب أو امتصاص الماء hydration ، يمكن تعريفها على أنها ارتباط بالماء عن طريق المجاميع الأيونية والقطبية في المادة الجافة أو المادة المنحلة . ويجب أن نعلم أن البروتين يمكن أن يرتبط مع الماء أي أن يكون (مرطباً) ، ولكنه في الوقت نفسه لا يكون منحلاً في المحلول ، مثل بروتين الزايين الموجود في الذرة يمكن أن يرتبط بالماء ولكنه لا يذوب فيه .

ولدى ترطيب البروتين الجاف فإنه ينتفخ لدى امتصاصه لجزيئات الماء على طول السلاسل البتيدية ، بوساطة التكثف الشعري Capillary condensation أو بوساطة الماء الحر (المتشرب أو الممتص) Imbibed free water ، إلا أن ارتباط جزيئات البروتين ببعضها يكون قوياً بحيث إن جزيئات الماء لا تستطيع أن تكسر الروابط الداخلية بين جزيئات البروتين وبعضها .

وعادة فإن جزيئات الماء ترتبط بالمجاميع المحبة للارتباط بالماء والموجودة في السلاسل الجانبية لجزيء البروتين مثل مجاميع (الكاربوكسيل ، الأمينو ، الأميدازول ـ الكربونيل ـ السلفاهيدريل ، الهيدروكسيل والغوانيدين) عن طريق الروابط الهيدروجينية ، وأثبتت التجارب على أغلب أنواع البروتين والأغذية البروتينية أن نحو ١٦ ـ ٥٠ غ/ ١٠٠ غ بروتين جاف هو ماء مرتبط . وفي اللحوم يوجد ٣٥٠ ـ ٣٦٠ غ ماء / ١٠٠ غ بروتين في حين أن الغلوتين وهو بروتين القمح يحتوي على ١٨٩ غ ماء/ ١٠٠ غ بروتين ، والماء الموجود في هذه المواد إما أن يكون مرتبطاً أو غير قابل للتحريك Imobilized ومن الواضح أن للبروتين دوراً كبيراً أيضاً في الاحتفاظ بهذا الماء ، وعلى ذلك يمكن تعريف المقدرة على الاحتفاظ بالماء (WHC) على أنها كمية الماء الكلية المرتبطة وغير القابلة للتفاعل أو للتحريك منسوبة إلى كمية البروتين .