



طرق توصيف وتحليل خصائص الطينات ودورها

في تحسين الانتاج الخزفي

Methods for Characterizing and Analyzing
the Properties of Clays and Their Role in
Enhancing Ceramic Production

إعداد

د/ إبراهيم دسوقي عبد الموجود سليمان

مدرس الخزف بقسم التربية الفنية - كلية التربية النوعية -

جامعة جنوب الوادي

مجلة جامعة جنوب الوادي الدولية للعلوم التربوية

المعرف الرقمي للبحث DOI

10.21608/musi.2024.341832.1194

الترقيم الدولي الموحد الالكتروني

[2636-2899](https://doi.org/10.21608/musi.2024.341832.1194)

موقع المجلة عبر بنك المعرفة المصري

musi.journals.ekb.eg



٢٠٢٤/هـ١٤٤٦م

المخلص:

يهدف البحث إلى التعرف على الأسس الفكرية للطرق العلمية المتبعة لتوصيف وتحليل خصائص الطينيات المستخدمة في الإنتاج الخزفي؛ وتحديد دور توصيف وتحليل خصائص الطينيات في تحسين الإنتاج الخزفي؛ واقتراح آليات عملية لتطبيق نتائج توصيف تحليل خصائص الطينيات في تحسين الإنتاج الخزفي. واتبع البحث المنهج الوصفي التحليلي في تحديد طرق توصيف وتحليل خصائص الطينيات لتحديد العوامل التي تؤثر على تحسين الإنتاج الخزفي. وتوصل البحث إلى العديد من النتائج منها أن التركيب يحدد الكيميائي للطين (مثل نسب الألومينا والسيليكا) مقاومته للحرارة، صلابته، ومتانته؛ وأن الخصائص تتحكم الفيزيائية مثل اللدونة والانكماش بشكل مباشر في جودة التشكيل والتجفيف؛ وأن تطبيق التحاليل الكيميائية والفيزيائية يتيح تحسين عمليات التشكيل، التجفيف، والحرق. وأوصى البحث بالعديد من التوصيات منها استخدام نتائج التحليل الكيميائي لضبط نسب المواد الخام وضمان توافقها مع التطبيقات المختلفة؛ واعتماد تقنيات تجفيف وحرق متقدمة لتقليل التشققات والانكماش وتحسين متانة المنتجات؛ ووضع معايير موحدة لتوصيف وتحليل الطينيات لضمان جودة المواد الخام؛ وتدريب العاملين في مجال صناعة الخزف على تقنيات تحليل الطينيات وقراءة النتائج بفعالية.

الكلمات المفتاحية:

طرق توصيف وتحليل؛ خصائص الطينيات؛ تحسين الإنتاج الخزفي

Abstract:

The research aims to identify the intellectual foundations of the scientific methods used to characterize and analyze the properties of clays employed in ceramic production; to determine the role of clay characterization and analysis in improving ceramic production; and to propose practical mechanisms for applying the results of clay property analysis to enhance ceramic production. The research adopted the descriptive-analytical method to identify the methods of characterizing and analyzing clay properties in order to determine the factors influencing the improvement of ceramic production. The study reached several findings, including that the chemical composition of clay (such as the proportions of alumina and silica) determines its heat resistance, hardness, and durability; and those

physical properties, such as plasticity and shrinkage, directly affect the quality of shaping and drying. Furthermore, the application of chemical and physical analyses enables the improvement of shaping, drying, and firing processes. The research recommended several measures, including using chemical analysis results to adjust raw material proportions and ensure their compatibility with various applications; adopting advanced drying and firing techniques to reduce cracks, shrinkage, and enhance the durability of products; establishing standardized criteria for the characterization and analysis of clays to ensure raw material quality; and training workers in the ceramics industry on clay analysis techniques and effectively interpreting the results.

Keywords:

Methods for Characterizing and Analyzing; Properties of Clays; Enhancing Ceramic Production

تمهيد:

تعتبر الطينات العنصر الأساسي في صناعة الخزف، حيث أنها تشكل المادة الخام التي تبنى عليها هذه الصناعة التي امتدت عبر التاريخ كواحدة من أبرز الممارسات الإبداعية والوظيفية. ويعرف الطين بأنه "نوع من التربة الثقيلة واللزجة التي تصبح قاسية عند حرقها وتستخدم لصنع أشياء مثل الأواني والطوب. (Bradbery, 2020, p. 271) وتتسم الطينات بخصائص فيزيائية وكيميائية مميزة تجعلها مكوناً أساسياً لتصنيع المنتجات الخزفية.

والطينات ليست مجرد مواد طبيعية يتم استخدامها لصنع الأواني الفخارية، بل هي مادة ذات خصائص معقدة تحتاج إلى فهم عميق لتحسين أدائها وضمان جودة المنتجات الخزفية. ويعد توصيف وتحليل الطينات من الأمور الجوهرية التي تؤثر بشكل مباشر على نجاح العمليات الإنتاجية وتقليل الأخطاء والمشكلات التقنية التي قد تظهر في المراحل اللاحقة.

ويتمثل التحدي الأساسي في الصناعات الخزفية في كيفية استغلال هذه الخصائص لتحقيق منتجات متجانسة وعالية الجودة، مما يعزز من كفاءة الإنتاج ويقلل من الفاقد. ويُعد فهم خصائص الطينات وتحليلها خطوة أساسية نحو تحقيق منتجات خزفية ذات جودة عالية. يشمل توصيف الطينات دراستها من الجوانب الكيميائية، الفيزيائية، والمعدنية لتحديد خصائصها وأثرها على عمليات التشكيل، التجفيف، والتزجيج. لذلك، تبرز أهمية تطوير منهجيات فعّالة لتحليل الطينات بهدف تحسين الإنتاجية وجودة المنتجات الخزفية.

مشكلة البحث:

تعاني العديد من الصناعات الخزفية من مشكلات ترتبط بجودة المنتجات الناتجة عن استخدام طينات غير مدروسة بشكل كافٍ. ويرجع ذلك إلى نقص المعرفة بخصائص الطينات وتأثيرها على مراحل الإنتاج المختلفة. وعليه، تبرز الحاجة إلى دراسة معمقة تشمل طرق توصيف وتحليل خصائص الطينات لتحديد العوامل التي تؤثر على تحسين الإنتاج الخزفي. ويمكن تحديد مشكلة البحث في التساؤلات التالية:

١. ما الأسس الفكرية للطرق العلمية المتبعة لتوصيف وتحليل خصائص الطينات؟
٢. ما دور توصيف وتحليل خصائص الطينات في تحسين الإنتاج الخزفي؟
٣. كيف يمكن استغلال نتائج توصيف تحليل خصائص الطينات لتطوير الإنتاج الخزفي؟

أهداف البحث:

١. التعرف على الأسس الفكرية للطرق العلمية المتبعة لتوصيف وتحليل خصائص الطينيات المستخدمة في الإنتاج الخزفي.
٢. تحديد دور توصيف وتحليل خصائص الطينيات في تحسين الإنتاج الخزفي.
٣. اقتراح آليات عملية لتطبيق نتائج توصيف تحليل خصائص الطينيات في تحسين الإنتاج الخزفي.

أهمية البحث:

تتبع أهمية هذا البحث من كونه يساهم في تعزيز المعرفة العلمية المرتبطة بصناعة الخزف وتحليل خصائص الطينيات، مما يفتح المجال لتطوير منتجات ذات جودة أعلى. وتكمن أهمية البحث في النقاط التالية:

١. تقدم رؤية معمقة حول خصائص الطينيات وكيفية تحسين استخدامها.
٢. يساهم في عرض حلول عملية لتحسين كفاءة الإنتاج في المصانع الخزفية.
٣. يساعد في تقليل التكاليف المرتبطة بالإنتاج وتقليل الهدر من خلال اختيار طينيات مناسبة ومُحسنة.
٤. تعزز إمكانيات الابتكار في تصميم المنتجات الخزفية من خلال استغلال الخصائص المثلى للطينيات.

منهجية البحث:

يتبع البحث المنهج الوصفي التحليلي في إستعراض الأسس الفكرية للطرق العلمية المتبعة لتوصيف وتحليل خصائص الطينيات لتحديد العوامل التي تؤثر على تحسين الإنتاج الخزفي.

محددات البحث:

يقصر هذه البحث على تناول طرق تحليل وتوصيف خصائص الطينيات المستخدمة في الإنتاج الخزفي ودورها في تحسين الإنتاج.

مصطلحات البحث:

الطين (Clay):

يعرف الطين بأنه "مجموعة من الركام المعدني الطبيعي ويتكون من سيليكات الألمنيوم المائية ذات الهياكل والطبقات والتي تصبح لدنة عند ترطيبها بدرجة كافية، وتكون صلبة عند تجفيف الكتلة، ويتم ترزجها عند تسخينها إلى درجة حرارة عالية بدرجة كافية. (McColm, 2013, p. 96) وعرفت أيضًا لجنة التسمية المشتركة (JNC) من الرابطة الدولية لدراسة الطين (AIPEA) وجمعية المعادن الطينية (CMS)، "الطين" بأنه "مادة طبيعية تتكون أساسًا من معادن دقيقة الحبيبات، والتي تكون بشكل عام لدنة بمحتويات مائية مناسبة وتتصلب عند تجفيفها أو حرقها". (Mukherjee, 2013, p. 4)

التحليل (Analysis):

يعرف التحليل بأنه "الفصل والقياس لمكونات مادة معينة، وتفسير هذه النتائج. ويُعرف ذلك أيضًا بالمحتوى الكيميائي، والمحتوى المعدني، والخواص الفيزيائية". (McColm, 2013, p. 21) ويعرف أيضًا بأنه "طريقة لوصف المادة من خلال أجزائها المختلفة. يتم إجراء التحليل بطريقتين: نوعي (qualitative)، يحدد فقط طبيعة الأجزاء الموجودة، وكمي (quantitative)، يحدد أيضًا كمية كل جزء موجود. الطريقة الأخيرة تقدم التركيب النسبي للمادة بالنسب المئوية، ولكنها قد تجمع الأجزاء المتشابهة معًا لتسهيل التعامل". (Hamer & Hamer, 2015, p. 8)

المحور الأول: ماهية الطين:

أولاً: مكونات الطين:

تتكون معظم كتلة وحجم قشرة الأرض من عدد قليل من العناصر الكيميائية. يمثل O وSi ما يقرب من ٧٥ ٪ من الكتلة، والباقي معظمه يتكون من Al وFe وCa وNa وK وMg وTi وH وP وMn. (Schulze, 2005, p. 264) ونظرًا لأن الطين هو الناتج النهائي لتجوية صخور السيليكات، فإن معظمها يتكون أساسًا من الألومنيوم والسيليكون، وهما العنصران الأكثر مقاومة للعوامل الجوية، الألومنيوم معدن: يوجد في الطين على شكل ألومينا أو أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3)، والذي يتخلى عن الإلكترونات ويتحد مع السيليكون المعدني الموجود على

شكل سيليكات أو ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) والذي قد يضيف الإلكترونات أو يشاركها. ويمكن وصف معظم الطينات بشكل أكثر تحديداً على أنها ألومينوسيليكات Aluminosilicates مائية، تحتوي على ثلاث مكونات أساسية وهي الماء، والألومينا، والسيليكا؛ وهي متغيرات من الصيغة العامة أو النظرية ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)، ومتوسط مكونات الطين هو ٣٩.٤٪ ألومينا، و٤٦.٦٪ سيليكات، و١٣.٩١٪ ماء؛ وتختلف النسب المئوية الفعلية لهذه المكونات اختلافاً كبيراً في الطبيعة لأن الأنواع المختلفة من الطين أو المعادن الطينية تختلف في التركيب الذري، وبالتالي قد تتراوح نسبة السيليكا إلى الألومينا من ١ : ٤ إلى ١ : ٤ أو أعلى، وقد يشكل الماء قدرًا يصل إلى ٣٠-٣٥٪ من كتلة الطين. (Rice, 2015, p. 99)

ويتكون الطين إلى حد كبير من نوع واحد أو أكثر من المعادن التي تنتمي إلى فئات السيليكات والأكسيد والهيدروكسيد والتي توجد بوفرة في قشرة الأرض، فبعضها شديد الاستقرار في البيئة السائدة فوق سطح الأرض أو بالقرب منه حيث يتشكل الطين في هذه البيئة. ويمكن تقسيم المكونات المعدنية للطين إلى النوعين التاليين: (Mukherjee, 2013, p. 7)

١. **معادن الطين Clay minerals**: وهي المعادن التي تضيف اللدونة على الطين وتتصلب عند التجفيف أو الحرق. منها: كاولينيت kaolinite، مونت موريلونيت Montmorillonite، إيليت Illite، إلخ.
٢. **المعادن المصاحبة Associated minerals**: وهي المكونات المعدنية والتي لا تضيف اللدونة للطين، وتشمل معادن السيليكات Silicate، والأكاسيد والهيدروكسيدات Oxides And Hydroxides.

دور مكونات الطين في تحسين الإنتاج الخزفي:

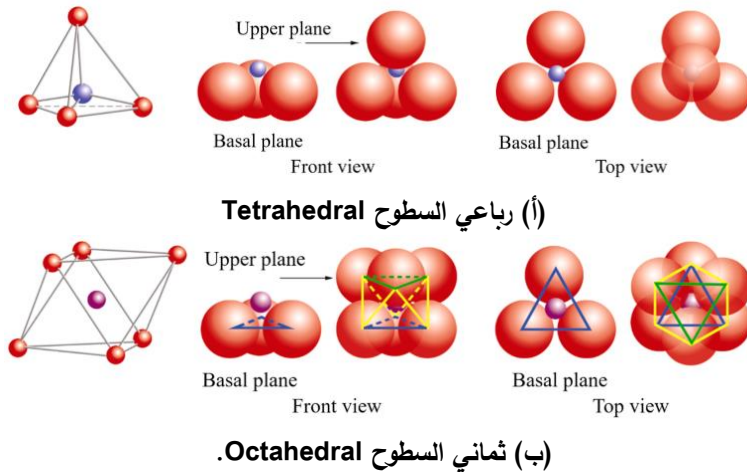
تلعب مكونات الطين دورًا حاسمًا في تحسين جودة الإنتاج الخزفي من خلال تأثيرها على اللدونة، التماسك، والتحمل الحراري. فمن خلال التحكم الدقيق في مكونات الطين ونسبها، يمكن تحسين الجودة النهائية للمنتجات الخزفية، سواء من حيث المتانة أو المظهر أو القدرة على تحمل الظروف المختلفة. ويمكن تفصيل دور هذه المكونات كما يلي:

- **الألومينا (Al₂O₃):** تعزز الألومينا من مقاومة المنتج الخزفي للحرارة والتآكل مما يزيد من مقاومة المنتج. وأيضًا يساهم وجود نسبة مناسبة من الألومينا في تحسين صلابة الهيكل للمنتج الخزفي النهائي وتقليل قابليته للتشقق.
- **السيليكا (SiO₂):** تعمل السيليكا على تعزيز الثبات الهيكلي من خلال التماسك وتقليل انكماش المنتج الخزفي أثناء الحرق. كما أن وجود السيليكا يرفع درجة الحرارة المطلوبة للحرق، مما يجعل المنتج أكثر قوة واستقرارًا.
- **معادن الطين:** تضيف المعادن مثل الكاولينيت والمونتموريلونيت على الطين خاصية اللدونة التي تسهل تشكيله. كما أن هذه المعادن تتصلب بعد التجفيف والحرق، مما يعطي المنتج الخزفي شكله النهائي ومثابته.
- **المعادن المصاحبة:** تعزز المعادن غير اللدنة مثل السيليكات والأكاسيد من ثبات المنتج وتزيد من مقاومته للتآكل. وتؤثر هذه المعادن أيضًا على اللون النهائي للمنتج الخزفي.
- **التوازن بين المكونات:** يساهم التوازن بين نسب الألومينا والسيليكا والماء والمعادن الأخرى في تقليل العيوب السطحية مثل التشققات والمسامات، وتعطي المنتج الخزفي قوة تحمل وصلابة، مع تحسين قابليته للزخرفة.

ثانيًا: معادن الطين:

يتكون الطين الموجود في التربة من جزيئات معدنية يقل قطرها المكافئ عن ٢ مايكرومتر. وتتبلور هذه "المعادن الطينية" على سطح الأرض من الأيونات المكونة المنبعثة عن طريق إذابة التجوية للمعادن الأولية التي تشكلت تحت حرارة وضغط شديدين، وتتميز معادن الطين على أساس تراكيبها البلورية المختلفة، وهناك علاقة وثيقة بين التركيب البلوري والخصائص الفيزيائية والكيميائية المقابلة لنوع معين من الطين. ويمكن أن يشير الطين إلى كل من الحجم والفئة من المعادن؛ كمصطلح الحجم، يشير إلى جميع مكونات التربة الأصغر من حجم معين، عادةً ٠.٠٠٢ مم (٢ مايكرومتر) وكمصطلح معدني، يشير إلى معادن طينية محددة تتميز بحجم جزيء صغير، وشحنة كهربائية سالبة صافية، واللدونة عند مزجها بالماء. ومقاومة عالية للعوامل الجوية. (Mitchell & Soga, 2005, p. 35) وتعد المعادن الطينية هي مواد بلورية، عبارة عن سيليكات الألومنيوم المائية التي تحتوي أيضًا على أيونات معدنية أخرى، وتنتمي معادن الطين إلى عائلة معدنية أكبر تسمى فيلوسيليكات phyllosilicates.

وتتكون معادن الطين من مزيج من نوعين من هياكل الطبقات التي هي عبارة عن تنسيق لأنيونات الأكسجين مع كاتيونات مختلفة، وهناك نوعان من الصفائح وفق عدد الأنيونات، أحدهما من تنسيق ذي ستة أضعاف (رباعي السطوح) والآخر تنسيق ثماني أضعاف (تنسيق ثماني السطوح). (Velde & Meunier, 2008, p. 4) وتختلف بنية وتكوين المعادن الطينية الرئيسية اختلافاً كبيراً على الرغم من أنها تتكون من صفائح ثمانية Octahedral ورباعية Tetrahedral السطوح باعتبارها اللبنة الأساسية، ويعتبر ترتيب وتكوين الصفائح مسؤولة عن معظم الاختلافات في خواصها الفيزيائية والكيميائية، شكل (١). (عبد الموجود، ٢٠٢٤)



● أكسجين (O) ● سليكون (Si) ● مغنيسيوم (Mg) / ألومنيوم (Al).

شكل (١): الصفائح رباعية وثمانية السطوح Tetrahedral & Octahedral.

١. الصفائح رباعية السطوح (صفحة السيليكات) Tetrahedral sheet:

تتكون من كاتيون سيليكون واحد (Si^{4-}) محاط بأربعة أنيون أكسجين (O^{2-})، كيميائياً يحتوي رباعي السطوح Si-O على شحنة كهربائية صافية قدرها (-4) ($(SiO_4)^{4-}$)، لذلك تتم موازنتها بإضافة كاتيونات أخرى لتحديد شحناتها، شكل (٢)-أ؛ لذلك ينتمي كل رأس من المستوى القاعدي إلى اثنين من رباعي السطوح، حيث إن كل ذرة أكسجين تتسق مع اثنين من ذرات السيليكون، مكوّنة طبقات رباعي السطوح موزعة تحت تكوين السداسي، شكل (٢)-أ؛ وصفحة السيليكات (phyllosilicates) يتم الحصول عليها عندما ترتبط ثلاث ذرات أكسجين على كل رباعي السطوح ترتبط مع رباعي السطوح الأخرى لتشكيل مستويات رباعية السطوح. (Franco-Urquiza, 2021, p. 2) وتُعرف ذرات الأكسجين هذه بالأكسجين القاعدي

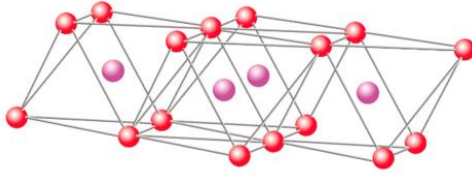
Basal الذي يربط أزواج من كل رباعي السطوح معًا (أكثر أو أقل) في مستوى واحد بينما الأكسجين الرابع تظل الذرة حرة وتشكل الرابطة مع العناصر الأخرى متعددة السطوح المعروفة باسم الأكسجين القمي Apical، وتوجد جميع ذرات الأكسجين القمي في مستوى منفصل وتوفر رابطاً بين صفيحة ثماني ورباعي السطوح، ونظرًا لوجود O قمي واحد فقط لكل رباعي السطوح فإن كل رباعي السطوح يشترك في الزاوية مع ثماني السطوح في الصفيحة ثمانية السطوح. (Kumari & Mohan, 2021, p. 4)

٢. الصفائح ثمانية السطوح Octahedral sheet:

تحتوي صفائح ثماني السطوح على كاتيونات ثنائية التكافؤ وثلاثية التكافؤ (Mg^{2+} أو Al^{3+})، وتتكون صفائح ثماني السطوح من مثمّنات فردية تشترك في الحواف المكونة من مجموعات أنيون الأكسجين والهيدروكسيل hydroxyl، مع Mg أو Al عادة بمثابة الكاتيون المنسق، شكل (٢) -ب. (Franco-Urquiza, 2021, p. 3) وتوجد الصفائح ثمانية السطوح في شكلين: صفيحة ثنائية ثماني السطوح أو ثلاثية ثماني السطوح، كما يلي: (Kumari & Mohan, 2021, p. 5)

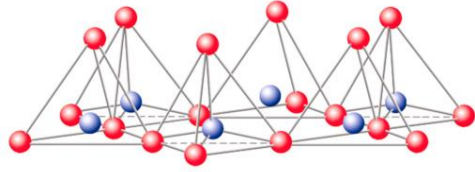
١. الصفيحة ثنائية ثماني السطوح: تكون Al^{3+} هي الذرة الرئيسية المهيمنة مع $Al_2(OH)_6$ وهي صيغة خلية حيث يتم تنسيق ذرتين Al^{3+} مع ست أيونات أكسجين أو هيدروكسيل، وتتشكل الصفيحة ثمانية السطوح يحتوي الألومنيوم على ثلاثة تكافؤات موجبة في صفيحة ثمانية السطوح وحينها يتم ملء ثلثي المواقع فقط بحيث تكون الشحنات متوازنة مما يؤدي إلى تكوين صفيحة ثنائية ثماني السطوح، وكذلك عندما يكون للمغنيسيوم تكافؤين موجبين أي شحنة موجبة تمتلئ المواضع الثلاثة لموازنة الشحنة التي ينتج عنها تكوين صفيحة ثلاثية ثماني السطوح، شكل (٣) -أ.

٢. الصفيحة ثلاثية ثماني السطوح: تكون في الصفيحة ثلاثية ثماني السطوح Mg^{2+} هي الذرة المهيمنة الرئيسية حيث يتم تنسيق ثلاث ذرات Mg^{2+} مع ست أيونات أكسجين أو هيدروكسيل لها صيغة خلية وحدة $Mg_3(OH)_6$ (تكتب أيضًا بـ $(Mg(OH)_2)$). وتتشكل الصفيحة ثمانية السطوح من خلال مشاركة اثنين من الأكسجين لكل ثماني وجوه عندما يتم ربط مختلف ثماني السطوح معًا أفقيًا، شكل (٣) -ب.



(ب) ثماني السطوح Octahedral:

أكسجين (O) سيليكون (Si)



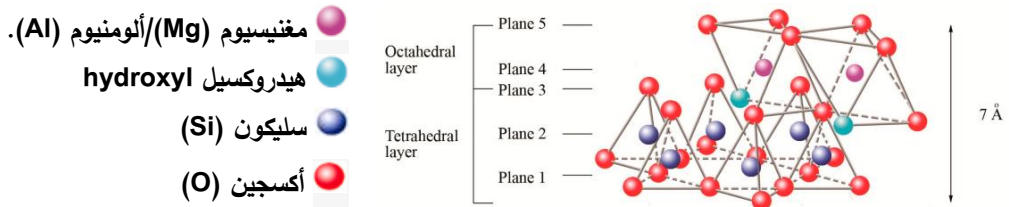
(أ) رباعي السطوح Tetrahedral:

مغنيسيوم (Mg) / ألومنيوم (Al)

شكل (٢): هياكل الصفائح رباعية وثمانية السطوح Tetrahedral & Octahedral.

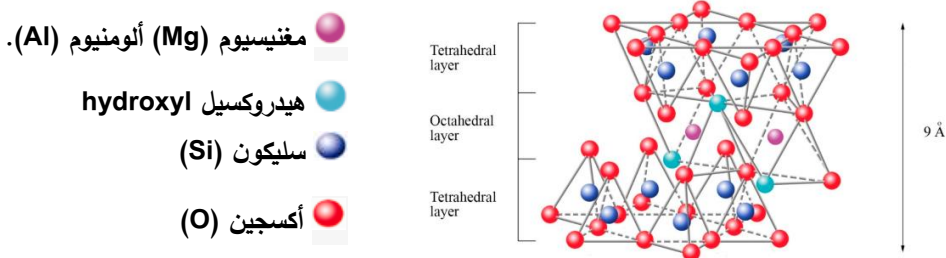
ترتبط كتل البناء الأساسية هذه في معادن الطين لتشكل صفائح من رباعي السطوح من السيليكا أو ثماني السطوح من الألمنيوم أو المغنيسيوم، وترتبط صفيحة رباعي السطوح (T) وصفيحة ثماني السطوح (O) بطريقتين: (Theng, 2019, p. 7)

١. هيكل الطبقة (١:١): وتتكون من (T-O) الكاولينيت والسرينتيت منها النماذج الأولية ثنائية ثماني السطوح وثلاثي ثماني السطوح، على التوالي، شكل (٣).



شكل (٣): هيكل الطبقة (١:١).

٣. هيكل الطبقة (١:٢): وتتكون من (T-O-T) حيث تكون الصفيحة ثماني السطوح محصورة بين صفحتين رباعي السطوح موجهتين للداخل، يتم تمثيل الهياكل النموذجية ثنائية ثماني السطوح المقابلة وثلاثي ثماني السطوح بواسطة البيروفيلايت والتلك، على التوالي، شكل (٤).



شكل (٤): هيكل الطبقة (١:٢).

وتصنف معادن الطين وفق مقترح تصنيف معادن الطين بواسطة Grim (1962)، هذا التصنيف أساساً أصبح لتوضيح المصطلحات والاختلافات بين معادن الطين المختلفة، هو كما يلي: (Ismadji & et.al. , 2015, p. 7)

جدول (1): تصنيف معادن الطين clay mineral classifications.

مجموعة الألوфан		غير متبلور Amorphous	
الكاولينيت	مجموعة الكاولين	متساوي الأبعاد	ذو طبقتين (1:1)
الديكيت الناكرت		ممدود	
مجموعة هالويسيت			
مونتموريلونيت	مجموعة السميكتايت	متساوي الأبعاد	شعيرية متوسعة
وبايدلايت			
الفيرميكلويت		ممدود	ذو ثلاث طبقات (1:2)
نونترونيت			
سابونيت			
هيكثوريت			
إيليت	مجموعة إيليت	شعيرية غير متوسعة	
الجلوكونيت			
	مجموعة الكلوريت		مختلط الطبقات
	سببولايت		
	باليغورسكايت (أتابولجيت)		بنية سلسلية

دور معادن الطين في تحسين الإنتاج الخزفي:

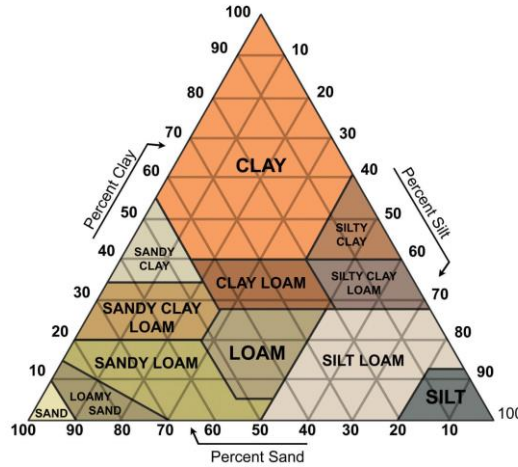
تعد معادن الطين العنصر الأساسي الذي يحدد خصائص الطين المستخدم في الصناعة الخزفية. اختيار نوعية الطين المناسبة، التي تحتوي على معادن طينية متوازنة التركيب، يمكن أن يحسن من جودة الإنتاج الخزفي ويزيد من متانته ومقاومته للعوامل البيئية، مع تحقيق المظهر الجمالي المطلوب. حيث تلعب معادن الطين دوراً حيوياً في تحسين جودة الإنتاج الخزفي من خلال تأثيرها على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للطين المستخدم في الصناعة. ويمكن تفصيل دور معادن الطين فيما يلي:

- **تحسين اللدونة وسهولة التشكيل:** تتميز معادن الطين، مثل الكاولينيت والمونتموريلونيت، بخاصية اللدونة العالية، مما يسهل تشكيل الطين إلى أشكال معقدة دون تكسر، مما يجعل الطين مناسبًا للتطبيقات اليدوية أو الآلية.
- **تأثير الهيكل البلوري على الخصائص:** تتكون معادن الطين من صفائح رباعية (Tetrahedral) وثمانية (Octahedral) السطوح، مما يمنحها استقرارًا فيزيائيًا وكيميائيًا، ما يعزز من مقاومة المنتجات النهائية للتشقق والانكماش أثناء الحرق؛ فمعادن الطبقة (١:١) مثل الكاولينيت تساهم في استقرار الخزف الحراري، بينما الطبقة (١:٢) مثل المونتموريلونيت ترفع من قدرته على الاحتفاظ بالماء وتحسين اللدونة.
- **خصائص مقاومة الحرارة:** تتحمل معادن الطين، خاصة الكاولينيت، درجات حرارة عالية مما يعزز من متانة المنتج ومقاومته للتغيرات الحرارية أثناء الحرق. كما يساعد التركيب المعدني لمعادلات الطين على تقليل التغيرات المفاجئة في البنية خلال الحرق، ما يضمن الحصول على منتج خزفي أكثر تجانسًا.
- **التحكم في الخصائص الفيزيائية:** تسهم الجسيمات الدقيقة في معادن الطين في تقليل مسامية المنتج، مما يعزز من قوته ويمنحه سطحًا أملسًا. فالمعادن مثل الإيليت تسهم في تحسين التماسك، ما يجعل المنتج الخزفي أكثر صلابة وثباتًا.
- **دور المعادن المصاحبة:** تسهم المعادن المصاحبة، مثل السيبوللايت والباليفورسكايت، في تحسين خصائص خاصة مثل المتانة ضد التآكل أو إضافة لمسات جمالية بسبب ألوانها الطبيعية. كما يساعد وجود المعادن المصاحبة في تحقيق توازن كيميائي في المنتج النهائي، مما يقلل من ظهور العيوب السطحية.
- **المحور الثاني: توصيف الطين:**

أولاً: الطين ونسيج التربة:

يصف نسيج التربة النسبة التقديرية لجزيئات حجم الحبيبات المختلفة في التربة وعادة ما يتم تمثيلها بالنسب النسبية لمحتويات الرمل Sand والطيني Silt والطين Clay. (Twarakavi, 2010, p. 1) وأحد الأسباب الرئيسية لشعبية تصنيف التربة القائم على النسيج هو أن الخصائص التركيبية هي من بين خصائص التربة التي يسهل قياسها، ويعد نظام وزارة

الزراعة الأمريكية (USDA) والذي استند إلى الحدود الميكانيكية لجزيئات التربة الأكثر استخداماً على نطاق واسع. ويصنف نظام وزارة الزراعة الأمريكية (USDA) نسيج التربة إلى اثنتي عشرة فئة، ويتم تحديد حدود نسيج التربة من خلال النسب المئوية الثابتة من الرمل "Sand" أو الطمي "Silt" أو الطين "Clay" (خطوط مستقيمة، موازية لحواف المثلث). (Groenendyk & et.al., 2015, pp. 3-4). شكل (٥).



شكل (٥): مثلث نسيج التربة التابع لوزارة الزراعة الأمريكية (USDA).

ويتم تعيين مجموعات الطين والطيني والرمل وفقاً لحجم الجسيمات المعدنية لنظام وزارة الزراعة الأمريكية (USDA) من حيث قطر الجسيمات (مم)، فيتراوح قطر الجسيمات للرمل (٠.٠٥-٢ مم) وللطيني (٠.٠٥-٠.٠٠٢ مم) وللطين (أقل من ٠.٠٠٢ مم). وأوضح Laborczy & et.al., (2019) أن هناك ثلاث مجموعات أساسية من التربة: التربة الرملية Sandy والطفالية Loamy والطينية Clayey لوصف النسيج فيما يتعلق بالفئة النسيجية للتربة. (p. 361)؛ وفيما يلي المجموعات النسيجية، جدول (٢)، لوصف نسيج التربة بالنسبة للفئات النسيجية للتربة: (Phogat & et.al., 2015, p. 140)

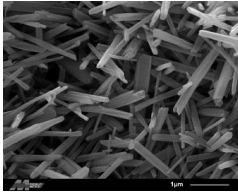
جدول (٢): مجموعات نسيجية لوصف النسيج بالنسبة للفئات النسيجية للتربة (USDA).

المجموعات النسيجية	النسيج	الفئات النسيجية
Sandy رملي	Coarse خشن	Sand رمل
Loamy طفالي	متوسط الخشونة Moderately Coarse	Loamy Sand رمل طفالي Sandy Loam طفال رملي

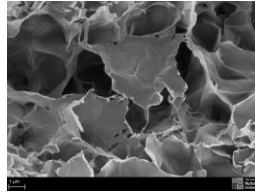
Loam طُفال		
Silt Loam طمي طُفالي	Medium متوسط	
Silt طمي		
Sandy Clay طُفال طيني رملي		
Loam	متوسط النعومة	
Clay Loam طُفال طيني	Moderately Fine	
Silty Clay طُفال طيني طمي		
Loam		
Sandy Clay طين رملي		
Silty Clay طين طمي	Fine ناعم	طيني Clayey
Clay طين		

ثانيًا: شكل الجسيمات Particle shape:

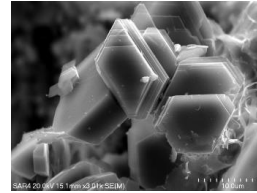
تنقسم أشكال جسيمات الطين إلى ثلاث مجموعات: رقائق Flakes: صفائح ذات أبعاد متساوية في اتجاهين وسماكة ٢٠/١ في الإتجاه الآخر، شرائح Laths: صفائح ذات جانب خطي حيث يكون العرض كبيرًا في اتجاه واحد وأقل بكثير في الإتجاه الآخر. السماكة دائمًا أقل بكثير من الإتجاهين الآخرين، الإبر Needles: اتجاهان متشابهان في الأبعاد بينما الأخير أكبر بكثير. هذه نادرة. (Velde, 1995, p. 11). شكل (٦) (Mineralogical Society of the UK and Ireland, 2023)



Needles



Laths



Flakes

شكل (٦): أشكال جسيمات الطين القياسية.

ويتم معرفة أحجام الجسيمات وأشكال معادن الطين من خلال الدراسات التفصيلية باستخدام المجهر الإلكتروني النافذ والماسح (TEM / SEM)، ويؤثر حجم وشكل جسيمات المعادن الطينية وخصائصها الكلية على الخصائص الفيزيائية للطين.

ثالثاً: حجم الجسيمات Particle size:

تعتمد طريقة مقياس كثافة السوائل hydrometer على قانون ستوكس Stokes' law الذي يحكم السرعة التي تستقر بها الجسيمات في المعلق، فكلما كانت الجسيمات أكبر، زادت سرعات استقرارها والعكس صحيح، ويفترض القانون أن جزيئات التربة (صلبة، كروية، وناعمة، وغير منتظمة الشكل مثل معظم الجسيمات الرملية والغرينية، أو صفيحة أو أنبوبية كجزيئات طينية. ولها كثافة مماثلة. ومستقلة عن بعضهما البعض. ولا تتفاعل أثناء الترسيب). (Wen, 2002, p. 2)

دور توصيف الطين في تحسين الإنتاج الخزفي:

يعد توصيف الطين، من أهم العوامل المؤثرة في جودة المنتجات الخزفية؛ فالطين يمثل المادة الأساسية في الإنتاج الخزفي، فنسيج التربة وحجم وشكل الجسيمات يحدد خصائصه الفيزيائية والميكانيكية. دور هذه العوامل يمكن تلخيصها في النقاط التالية:

- **خصائص الطين المناسبة للتشكيل:** الطين ذو النسبة العالية من الجسيمات الدقيقة (أقل من 0.002 مم) يتمتع بلدونة جيدة مما يسهل عملية التشكيل. ووفقاً لتصنيف وزارة الزراعة الأمريكية (USDA)، التربة الطينية (Clay) هي الأنسب لصناعة الخزف بسبب قدرتها على الاحتفاظ بالماء واستقرارها أثناء التجفيف والحرق.
- **التوازن بين المكونات:** قد تحتوي التربة المثالية للإنتاج الخزفي على نسب من الرمل والطين بجانب الطين لتحسين التماسك وتقليل التشققات أثناء التجفيف. ويُعتبر النسيج الطفالي (Loamy) خياراً جيداً بسبب توازنه بين الخشونة والنعومة.
- **تأثير النسيج على عملية الحرق:** النسيج يؤثر على كثافة الخزف بعد الحرق، فالتربة ذات النسيج الناعم تعطي منتجات أكثر كثافة وأقل مسامية، مما يعزز من قوة المنتج النهائي ومقاومته للعوامل الخارجية.
- **التجانس في المزيج:** الاعتماد على توصيف دقيق لنسيج التربة يضمن الحصول على مزيج متجانس من المكونات، مما يقلل العيوب السطحية ويعزز جودة للمنتجات الخزفية.
- **أشكال وأحجام جسيمات الطين:** يساعد تحليل أشكال جسيمات الطين إلى رقائق (Flakes)، شرائح (Laths) وإبر (Needles) في اختيار الطين الأنسب لتحقيق التوازن بين اللدونة والثبات. يحدد قياس حجم الجسيمات باستخدام طرق مثل قانون ستوكس سرعة

استقرار الجسيمات في المعلق. الجسيمات الأصغر تعزز اللدونة والتماسك بينما الأكبر تقلل التشققات.

المحور الثاني: خصائص الطين وطرق تحليلها:

أولاً: تحليل الخصائص الكيميائية:

التحليل الكيميائي:

يتم تحديد التركيبات الكيميائية للطين من خلال إجراء التحليل الكيميائي للطين باستخدام مطيافية تشتت الطاقة بالأشعة السينية (ED-XRF)، لتحديد المكونات الكيميائية التالية بالنسبة المئوية بالوزن: SiO_2 ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، CaO ، TiO_2 ، MgO ، Na_2O ، K_2O (Jock & et.al., 2013, p. 190) وأيضاً تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) الذي يستخدم لتحديد البنية المعدنية والبلورية الموجودة في الطين، والتي تؤثر على خصائصه الفيزيائية والكيميائية.

الفقد بالاشتعال (LOI):

يعد الفقد بالاشتعال (LOI) أحد أكثر الطرق المستخدمة على نطاق واسع لقياس محتوى المادة العضوية في التربة. (Hoogsteen & et.al., 2015, p. 320)، حيث يتم وضع العينة في بوتقة سيليكاً موزونة مسبقاً ويتم تسخينها إلى 1000 درجة مئوية في فرن لمدة ساعة، ثم تبريدها ووزنها مرة أخرى، ثم حساب الخسارة في الوزن. (Lydia & et.al., 2019, p. 55) من خلال معادلة (1) كالتالي:

$$LOI(\%) = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100 \quad \text{معادلة (1)}$$

حيث: W_i وزن العينة قبل الحرق، W_f وزن العينة بعد الحرق.

دور تحليل الخصائص الكيميائية في تحسين الإنتاج الخزفي:

يعد تحليل الخصائص الكيميائية للطين خطوة أساسية لتحسين جودة الإنتاج الخزفي وضمان توافق المواد الخام مع متطلبات الإنتاج. فيما يلي توضيح لأهمية هذا التحليل ودوره في تحسين الإنتاج:

- فهم التركيب الكيميائي للطين: يوفر تحليل الطين باستخدام مطيافية تشتت الطاقة بالأشعة السينية (ED-XRF) معلومات دقيقة حول العناصر الكيميائية الأساسية الرئيسية مثل

SiO₂، Al₂O₃، Fe₂O₃، وغيرها. كما يساعد في ضبط نسب المواد مثل الألومينا والسيليكا، والتي تؤثر بشكل مباشر على متانة المنتج وقابليته للتشكيل.

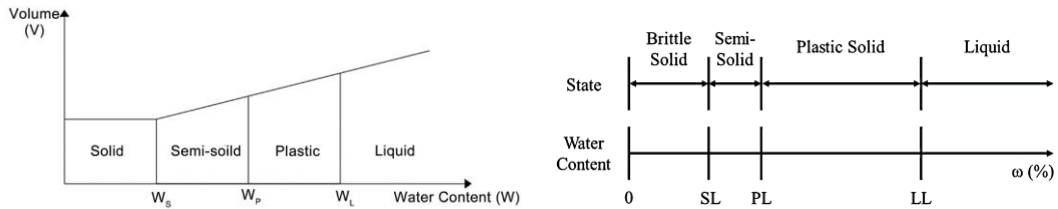
- **تحليل البنية المعدنية والبلورية:** يحدد تحليل حيود الأشعة السينية (XRD) البنية البلورية والمعادن المكونة للطين، مما يساعد على التنبؤ بسلوك الطين أثناء التشكيل والحرق. مما يساهم في اختيار المواد المناسبة لتجنب العيوب كالتشققات أو التشوهات أثناء الإنتاج.
- **التحكم في الخواص الفيزيائية والكيميائية:** تحديد نسبة Fe₂O₃ يساعد في تحسين لون المنتج النهائي، خاصةً إذا كان الهدف إنتاج خزف بألوان فاتحة. وكذلك تحليل Na₂O و K₂O يساعد في التحكم بدرجة انصهار الطين.
- **قياس الفقد بالاشتعال (LOI):** توفر تقديرًا دقيقًا لمحتوى المادة العضوية التي تؤثر على ثبات المنتج أثناء الحرق. كما يساعد في معرفة المواد الطيارة التي قد تؤدي إلى ظهور عيوب مثل الفراغات أو المسامية الزائدة.
- **ضبط عمليات الحرق والتجفيف:** يساعد تحليل كميات الأكسيد على ضبط درجات الحرارة المناسبة أثناء الحرق لتحسين الكثافة وتقليل التشققات. كما يساهم التركيب الكيميائي الدقيق في إنتاج خزف مقاوم للحرارة والتآكل.
- **زيادة الكفاءة الإنتاجية وتقليل التكاليف:** يمكن من خلال معرفة التركيب الكيميائي الدقيق، تقليل الأخطاء والتكاليف المرتبطة بإعادة العمل. كم يوفر التحليل الكيميائي بيانات دقيقة تُستخدم لتحسين وصفات الطين وإنتاج خزف.

ثانياً: تحليل الخصائص الفيزيائية:

اللدونة Plasticity:

هي الخاصية التي تسمح للمادة بأن تتشكل بدون تشقق أو تكسر وتحتفظ بشكلها الأخير عند زوال المؤثر عنها. (جرد، ٢٠١٤، ص ١١٣٢) وترتبط العوامل الرئيسية التي تؤثر على مرونة الطين بالخصائص الفيزيائية للمادة الصلبة، لا سيما توزيع حجم الجسيمات ومساحة سطحها المحددة، وخصائص الماء (اللزوجة، التوتر السطحي، وما إلى ذلك.)، والتركيب المعدني الصلب (نوع المعدن الطيني، ونسبة المعادن غير اللدنة، وما إلى ذلك)، وحالة تشتت الجزيئات التي تعتمد على قدرة التغيير الأيوني وطبيعة، والعوامل ذات الصلة بالعملية التي تؤثر على مرونة الطين هي تطبيق الضغط ودرجة حرارة الجسم وخصائص المواد المضافة

المستخدمة. (Andrade & et.al., 2010, p. 395) وتقوم خاصية اللدونة للطين على تشكيل جزيئات الطين المعدنية الشبيهة بالصفائح التي تنزلق فوق الجسيمات الأخرى عند إضافة الماء، والتي تعمل كمواد تشحيم، ومع زيادة المحتوى المائي للطين تزداد اللدونة إلى أقصى حد، اعتمادًا على طبيعة الطين. (Andrade & et.al., 2011, p. 1) والعلاقة بين حجم الجسيمات المعدنية للطين واللدونة تتناسب عكسياً، لأن مساحة السطح المحددة الأصغر للجزيئات الأكبر تقلل من كمية الماء المُمتزَّ Water Adsorbed (Modesto & Bernardin, 2008, p. 16) وتلعب حدود اتربرج (Atterberg limits) دورًا كبيرًا في تقييم الطين وتصنيفه من حيث سلوك الطين إلى أنواع اعتمادًا على المحتوى المائي للطين. (Grønbech & et.al., 2011, p. 1) وتتضمن حدود Atterberg حد السيولة (LL) Liquid Limit هو أدنى محتوى مائي يتصرف فيه خليط الطين والماء كسائل لزج، أي الحد الأدنى من محتوى الماء الذي تتدفق فيه جزيئات الطين تحت وزنها؛ وحد اللدونة (PL) Plastic Limit هو أقل محتوى مائي يتصرف فيه خليط الطين والمياه كمادة لدنة، أي الحد الأدنى من محتوى الماء الذي يتم فيه تشكيل الطين دون أن ينكسر؛ مؤشر اللدونة (PI) Plasticity index هو الفرق العددي بين حد السيولة وحد اللدونة، ويشير إلى نطاق محتويات الماء التي يتصرف الطين من خلالها كمادة لدنة. **شكل (٧)**، كما يلي: (Holtz & et.al., 2011, pp. 39-40)، (Gorączko & Olchawa, 2017, p. 165)

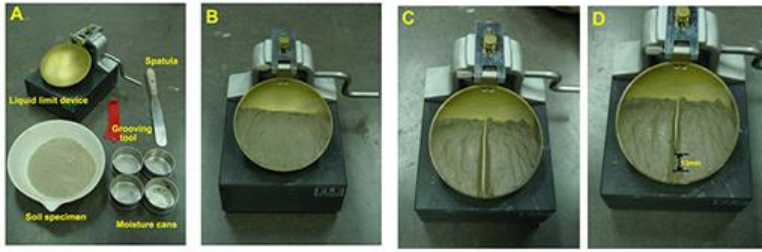


شكل (٧): حدود اتربرج Atterberg limits.

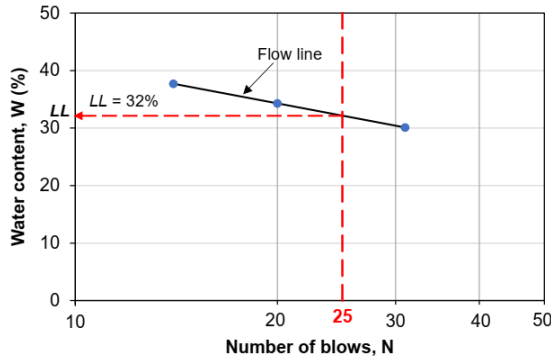
ومع زيادة محتوى الماء، يتغير سلوك الطين من مادة صلبة هشة إلى شبه صلبة، إلى مادة صلبة لدنة، إلى سائل لزج، وأخيراً إلى سائل حقيقي. وتتوقف حدود اتربرج بناءً على نوع المعدن الطيني، وبنيته، ونوع الكاتيونات المتغيرة، كمية المادة العضوية، شدة الحمل السطحي، مكافئ الماء، شكل الجسيمات، والخصائص الكيميائية. (Otcu & et.al., 2017, p. 166) وتتخلص عملية تحديد حدود اتربرج في الإجراءات التالية: (ASTM D4318-17, 2018)

(أ). إجراءات حد السيولة:

تجلب عينة من مسحوق الطين ونخلها بمنخل #40 mesh، ثم خلطها بالماء. ثم يوضع جزء من المعجون في جهاز كازاجراندي "Casagrande" ويبسط جيداً بحيث يكون سطحه موازياً لمستوى سطح الصحن، ثم يتم إحداث فاصل بواسطة أداة تحزيز. ثم يتم تشغيل الجهاز وتسجيل عدد الضربات (N) التي لزمته لإحداث التثام الجزأين المفصولين في الصحن مسافة 13 ملم، تعاد العملية مرة أخرى للحصول على قراءتين، مع الاحتفاظ بوزن معلوم من كل عينة لتحديد محتوى الرطوبة له. ثم إعادة التجربة أربع مرات على الأقل، مع إضافة كمية بسيطة من الماء ويخلط مرة أخرى وتعاد التجربة مع تسجيل عدد الضربات ومحتوى الرطوبة في كل مرة، شكل (8). ويرسم منحنى العلاقة بين عدد الضربات ونسبة الرطوبة، شكل (9).



شكل (8): إجراءات تحديد حد السيولة.



شكل (9): منحنى العلاقة بين عدد الضربات ونسبة الرطوبة.

ويصنف معدل سيولة الطين وفقاً لحد السيولة، جدول (3)، على النحو التالي: (Asuri

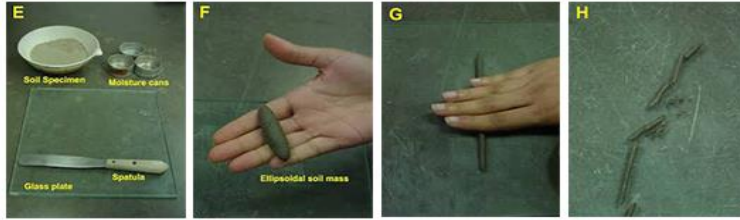
& Keshavamurthy, 2016, p. 30)

جدول (3): تصنيف معدل سيولة الطين وفقاً لحد السيولة.

معدل سيولة الطين	ضعيف	متوسط	كبير
مؤشر حد سيولة	أقل من 50	50-60	أكبر من 60

(ب). إجراءات حد اللدونة:

أخذ عينة من التربة المنخولة على المنخل رقم (٤٠) ويتم خلطها جيداً بالماء حتى يتم الحصول على معجون لدن بدرجة تسمح بتشكيله لكرات. ثم تشكل كرة الطين باليد ويتم تدويرها حتى تظهر على سطحها بعض الشقوق، تقسم الكرة الى جزأين وكل جزء يقسم الى أربعة أقسام. ثم عمل كرة صغيرة من كل جزء ثم يتم تحويلها إلى خيط أو حبل قطره ٣ مم حتى تبدأ التشققات بالظهور على سطح الخيط، عندها يتم اعتبار أن التربة قد بلغت حد اللدونة وتؤخذ عينات منها لقياس متوسط Average محتوى الرطوبة للعينات، شكل (١٠).



شكل (١٠): إجراءات حد اللدونة.

مؤشر اللدونة (PI) plasticity index:

هو مقياس لدونة التربة وهو حجم نطاق محتويات الماء حيث يُظهر الطين خصائص لدنة، ويمثل الفرق بين حد السيولة وحد اللدونة. (Mukherjee, 2013, p. 64) ويتم حساب مؤشر اللدونة من المعادلة التالية:

$$PI = LL - PL \quad \text{معادلة (٢):}$$

حيث PL حد اللدونة، LL حد السيولة.

ويوضح جدول (٤) توصيف أنواع اللدونة وفقاً لمؤشر اللدونة.

جدول (٤): أنواع اللدونة.

مؤشر اللدونة	صفر	(١-٥)	(٥-١٠)	(١٠-٢٠)	(٢٠-٤٠)	أكبر من ٤٠
اللدونة	منعدم	ضعيف	منخفض	متوسط	مرتفع	مرتفع جداً

مؤشر فاعلية الطين:

يتم حساب مؤشر فاعلية الطين عادة كنسبة مؤشر اللدونة للتربة إلى النسبة المئوية لحجم الطين في التربة. (Asuri & Keshavamurthy, 2016, p.31) ويتم حساب مؤشر فاعلية الطين من خلال معادلة (٣).

$$AI = \frac{PI}{Clay\ fraction\ (\%)} \quad \text{معادلة (3):}$$

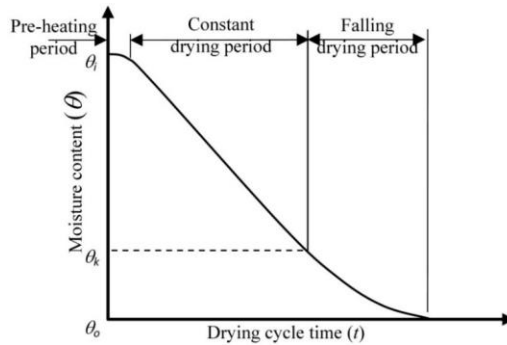
حيث (PI) مؤشر اللدونة، ($Clay\ fraction\ (\%)$) نسبة حجم الطين في التربة. ويمكن تصنيف الطين بناءً على فاعليته وفقاً لمؤشرات الفاعلية. (Özdemir & Gülser, 2017, p.308) كما في جدول (٥).

جدول (٥): أنواع الطين وفقاً لقيمة الفاعلية.

نوع الطين	طين غير فعال	طين عادي	طين فعال
الفاعلية	أقل من ٠,٧٥	٠,٧٥-١,٢٥	أكبر من ١,٢٥

الجفاف Drying:

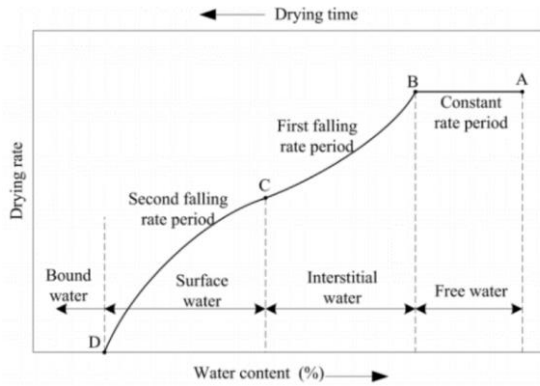
التجفيف هو إزالة الماء والرطوبة من الجسم. (McColm, 2013, p. 164) كما أنه عملية ديناميكية حرارية يتم من خلالها تقليل الرطوبة من خلال الطاقة الحرارية لتبخير الماء. (Lima & et.al., 2021, p. 2) وتحتوي المادة الطينية الرطبة على جزيئات الماء الحرة الموجودة في الفراغات بين الخلايا الحبيبية وبين مسام المادة والتي يمكن إزالتها، والمياه المتحددة كيميائياً والتي لا يمكن إزالتها من المادة الصلبة الموجودة في الداخل. (Araújo & et.al., 2017, p. 10) وبالنظر إلى أن الهدف الرئيسي من التجفيف هو استخراج الماء من الجسم، فإن إحدى الطرق لوصف عملية التجفيف هي معدل التجفيف. حيث يعرف معدل التجفيف على أنه التغير في محتوى الرطوبة في الجسم الخزفي لكل وحدة زمنية، شكل (١١). (Brosnan & Robinson, 2003, p. 63)



شكل (١١): معدل التجفيف "محتوى الرطوبة مقابل الزمن".

وتمر عملية تجفيف الجسم الخزفي الأخضر في ظل ظروف ثابتة (درجة الحرارة والرطوبة النسبية وسرعة الهواء) بمرحلتين هما المعدل الثابت (CRP) ومعدل السقوط (FRP).

ويمكن وصف سلوك التجفيف خلال المرحلتين وصفاً بيانياً، شكل (١٢). كما يلي: (Nwoye, 2009, p. 649), (Hubert & et.al., 2018, pp. 212-213), (Oummadi, 2019, pp. 33-34)



شكل (١٢): مراحل عملية التجفيف.

١. **المعدل الثابت (CRP):** يكون معدل التبخر وسطح التبخر ثابتان، وخلال هذه المرحلة تُستخدم حرارة الهواء بالكامل لتبخير الماء السائل على سطح العينة، ويتأثر نقل البخار والحرارة فقط بالظروف الخارجية، أي درجة حرارة التجفيف وسرعة الهواء، وخلال هذه المرحلة يحدث الانكماش. حيث ينخفض محتوى الرطوبة بشكل خطي في بداية التجفيف، لأن ميل منحنى الوزن ثابت بشكل أساسي (من A إلى B).

٢. **معدل السقوط (FRP):** ينخفض معدل التجفيف بسبب انخفاض النفاذية مع تشبع الوسط وتقوم الجسيمات بالتلاحم أثناء إزالة الماء، مما يؤدي إلى توقف الانكماش، وتنقسم فترة معدل السقوط إلى فترتين، تُظهر فترة معدل السقوط الأولى تناسباً بين معدل التجفيف ومحتوى الرطوبة (من B إلى C)، وتقابل فترة معدل السقوط الثانية استخراج آخر بقايا محتوى الرطوبة في الجسم. (C إلى D).

ويُطلق على محتوى الرطوبة عند النقطة B محتوى الرطوبة الحرج (M_c) لأن الانكماش يحدث مع استمرار التجفيف إلى B، ولكن الانكماش لا يكاد يذكر تحت B. (Khalili & et.al., 2014)

ويعتمد إجراء اختبار التجفيف على إحضار عينة تربة معلومة الوزن تم نخلها بمنخل رقم ٤ وتحديد وزن المادة الصلبة الجافة (M)، ثم إضافة الماء إلى عينات التربة

لتشكيل معجون وتحديد محتوى الرطوبة الأولية (W_1) أي بعد إضافة الماء للمادة الصلبة الجافة. ثم تحديد محتوى الرطوبة الحرجة (W_2) أي محتوى الرطوبة الذي يتحقق أثناء عملية التجفيف عندما لم يعد سطح المادة الصلبة بأكمله مرطبًا، ويمكن استخدام أوراق الترشيح. ثم تحديد محتوى الرطوبة المتوازن (W_3) أي المحتوى النهائي للرطوبة في المادة الصلبة بعد ملامستها لتدفق الهواء لمدة كافية للوصول إلى التوازن. ثم تسجيل البيانات في نطاقين، الأول محتوى الرطوبة مقابل الزمن، والثاني محتوى الرطوبة مقابل معدل التجفيف. ثم رسم منحنى معدل التجفيف النموذجي لظروف التجفيف الثابت.

ويتم تحديد معدل وزمن التجفيف من خلال المعادلات التالية: (Geankoplis & et.al., 2018, pp. 1556-1574)

يتم حساب محتوى الرطوبة:

$$W = \frac{(M_1 - M)}{M_1} \quad \text{معادلة (٤)}$$

ويتم حساب معدل التجفيف الثابت (CRP):

$$DR_c = \frac{M}{A} \times \frac{W_1 - W_2}{T_c} \quad \text{معادلة (٥)}$$

ويتم حساب معدل التجفيف المتناقص (FRP):

$$DR_f = \frac{M}{A} \times \frac{W_2 - W_3}{T_f} \quad \text{معادلة (٦)}$$

ويتم حساب زمن التجفيف المتناقص من المعادلة التالية:

$$T_f = \frac{M W_3}{A DR_c} \ln \frac{W_2}{W_3} \quad \text{معادلة (٧)}$$

ويتم حساب الزمن الكلي للتجفيف:

$$T = T_c + T_f \quad \text{معادلة (٨)}$$

حيث M_1 وزن العينة لينة، M وزن العينة (مسحوق الطين) جافة، A مساحة السطح المكشوفة للتجفيف، W_1 محتوى الرطوبة الأولي، W_2 محتوى الرطوبة الحرج، W_3 محتوى الرطوبة المتوازن، T_c زمن التجفيف بمعدل ثابت (الزمن المستغرق من W_1 الى محتوى W_2)، T_f زمن التجفيف بمعدل متناقص.

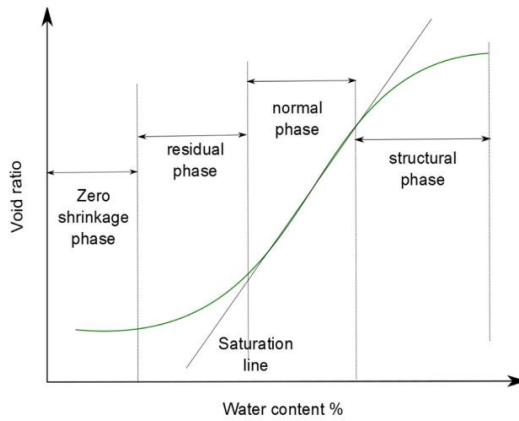
الانكماش Shrinkage:

يُعرّف الانكماش بأنه تغيير الحجم المحدد للطين بالنسبة إلى محتواه المائي. (Boivin & et.al., 2004, p. 1145) وهو النقص في أبعاد الجسم أو المادة أثناء التجفيف أو الحرق، وأيضا التقلص في المادة في حالة اللدونة أو قبل أن تتطور وتصبح ذات قوام ملموس بعد أن تصبح المادة جامدة. (McColm, 2013, p. 308) ويُفقد الماء خلال الانكماش على مرحلتين، المرحلة الأولى يتبخر الماء المضاف في التكوين بحرية مما يؤدي إلى الانكماش (انكماش الجفاف)، والمرحلة الثانية يتم إزالة الماء المتحد كيميائياً من حول جزيئات الطين وتقترب من بعضها البعض حتى تتلامس في النهاية وتبدأ في الالتصاق فلا يقلص الطين (انكماش الحريق). (Garrison, 2016, p. 188) وتتسبب القوى الدافعة للانكماش إلى فقد الماء عبر المسام أثناء فترة معدل الثبات في إعادة تنظيم الجزيئات وتغييرات في أبعاد المسام التي يتخللها الماء، وتتمثل هذه القوى في الضغط الشعري Capillary Pressure الفرق بين ضغط الماء والهواء. ويضمن هجرة الماء من الداخل إلى السطح، والضغط الاسموزي Osmotic Pressure انتقال الماء من المناطق ذات تركيز الملح المنخفض إلى المناطق ذات تركيز الملح الأعلى من خلال غشاء شبه نافذ دون أي تغيير في الطور، والضغط الفاصل Disjoining Pressure يصف حالة الأغشية السائلة أو الغازية المحصورة بين سطحين من المادة.. (Oummadi, 2019, p. 36) وينقسم الانكماش إلى نوعين هما: انكماش الجفاف Drying shrinkage، وانكماش الحريق Firing shrinkage.

١. انكماش الجفاف Drying shrinkage:

هو تقلص جسم رطب أثناء عملية التجفيف، معبراً عنه بنسبة خطية من الطول أو الحجم الأصلي في الحجم الأصلي. (McColm, 2013, p. 164) ويصاحب إزالة الماء انكماش الجسم، لأن الماء يخرج من المراكز الخلالية الموجودة بين الجسيمات فتقترب من بعضها البعض، فتزداد قوى الجذب بينها وتصبح متانة الجسم الطيني الجاف أعلى بكثير من متانة الجسم الطيني الرطب. (دفع لله، ٢٠١٢، ص. ٣٥) ويحدث انكماش الجفاف عندما يتبخر الماء من الجسم الطيني خلال المرحلة الخضراء Greenware Stage إلى التجليد Leather-hard Stage، وكلما زادت اللدونة في جسم الطين زاد انكماش الجفاف، ويتراوح

معدل الانكماش النموذجي للطين بين ٤٪ و ١٠٪. (Mat Nawi, 2013, p. 20) ويحتوي منحنى الانكماش النموذجي للطين، **شكل (١٣)**، على أربع مراحل وهي الانكماش الهيكلية structural shrinkage يحدث فيه فقدان الماء من خلال المسام الكبيرة، مما يؤدي إلى انخفاض محدود في الحجم، والانكماش الطبيعي normal shrinkage يحدث خلالها معظم الانكماش حيث يكون تغيير الحجم مساوياً لفقد الماء، والانكماش المتبقي residual shrinkage يحدث أثناء الاقتراب من حد الانكماش والذي يتميز بمعدل تغيير حجم أقل، والانكماش الصفري zero shrinkage يظل حجم الطين دون تغيير أثناء التجفيف الإضافي. (Gapak & et.al., 2017, p. 554)، (Wang & et.al., 2013, p. 1)



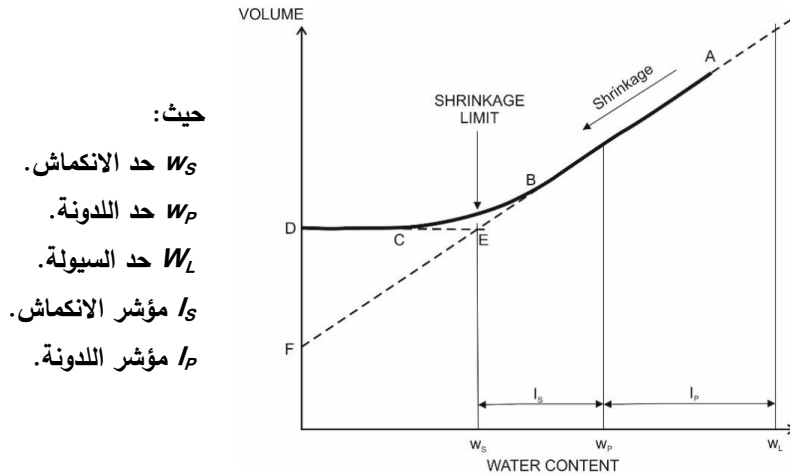
شكل (١٣): منحنى الانكماش النموذجي للطين.

ويمكن وصف سلوك الانكماش أثناء التجفيف خلال ثلاث مراحل وصفاً بيانياً، **شكل (١٤)**، كما يلي: (Hobbs & et.al., 2018, p. 220)، (Oummadi & et.al., 2020, pp. 2-4)

- أ. **مرحلة اللدونة:** بين النقطتين A و B تمثل الانكماش المطرد، ويرتبط الانكماش ارتباطاً مباشراً بمحتوى الرطوبة، حيث يتطابق فيه تقلص الحجم مع فقد الماء؛ ويمثل ميل الخط AB الدرجة الأولية للتشبع S_n ، وتعبّر نسبة الانكماش RS عن تغيير الحجم كنسبة فراغات أو تغيير الحجم كنسبة مئوية من الحجم الجاف.
- ب. **مرحلة التجليد leather-hard:** بين النقطتين B و C، لم يعد الانكماش خطياً، خلال هذه الفترة تبدأ الجسيمات بالتلامس تدريجياً مع بعضها البعض مما يقلل الكمية الإجمالية للانكماش. وتعرف المياه الخلالية في النقطة E عند التقاطع البياني للخطين AB و CD

بالمحتوى الرطوبي الحرج "حد الانكماش" لأنه يفصل الفترة التي يكون فيها الانكماش الكبير عن تلك التي يكون فيها الانكماش ضئيلاً، تسمى بالتجلد leather-hard حيث يمكن عند هذه النقطة التعامل مع الجسم الخزفي الأخضر دون خوف من التشويه. وتمثل النقطة B التي يشار إليها عادةً بـ"نقطة دخول الهواء" محتوى الماء الذي يتجاوز فيه فقد الماء تقليل الحجم وتبدأ درجة التشبع في الانخفاض بشكل كبير، كما يتزامن حد الانكماش أيضاً مع نقطة ذروة الكثافة الظاهرية.

ج. **مرحلة الجفاف:** بين النقطتين C وD، حيث يكون الانكماش ضئيلاً، تكون الجسيمات كلها على اتصال مع بعضها البعض، ويتم استبدال الماء الموجود في المسام تدريجياً بالهواء، وتمثل النقطة D حالة التجفيف بالفرن (105°C).



حيث:
 W_s حد الانكماش.
 W_p حد اللدونة.
 W_l حد السيولة.
 I_s مؤشر الانكماش.
 I_p مؤشر اللدونة.

شكل (١٤): تحديد حد الانكماش (محتوى الماء مقابل الحجم)

٢. انكماش الحرق Firing shrinkage:

هو النقص أو النقص في أبعاد المادة أو الجسم أثناء المعالجة الحرارية. (McColm, 2013, p. 274) وخلال المعالجة الحرارية يحدث تفكك وإزالة للماء المتحد كيميائياً والمواد العضوية والكربونات والأملاح مع استمرار لفقدان الوزن وانكماش جسم الطين إلى ما بعد التجفيف الأولي. (Rice, 2015, p. 203) ويعد التحكم في المعالجة الحرارية عامل مهم يؤثر على درجة الانكماش أثناء عملية الحرق، فقد يؤدي الانكماش الكبير إلى حدوث تشققات وعيوب في الأبعاد. (Abdeen, 2016, p. 50) وهناك عوامل تؤثر انكماش الحرق منها اللدونة وحجم الحبيبات. (Mat Nawi, 2013, p. 11)

حد الانكماش (SL) Shrinkage limit:

هو أقل محتوى مائي تجاوزه لا يحدث أي تغيير آخر في الحجم عندما يجف خليط الطين والماء. (Holtz & et.al., 2011, p. 40) وعليه لا يؤدي الانخفاض المستمر في محتوى الماء إلى أي تغيير إضافي في الحجم. ويتم تحديد حد الانكماش من خلال المعادلة التالية: (ASTM D4943-08, 2018)

$$SL = W \left[\frac{(V_p - V_d)P_w}{M_2} \right] \times 100 \quad \text{معادلة (٩)}$$

حيث W محتوى الرطوبة (الماء الأولي)، V_p حجم العينة لينة، V_d حجم العينة جافة، P_w كثافة الماء، M_2 وزن العينة بعد التجفيف.

ويتطلب تحديد حد الانكماش في ضوء المعادلة السابقة تحديد كل من محتوى الماء (W_1) ويمكن الحصول عليها من خلال المعادلة التالية:

$$W_1 = \left[\frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \right] \times 100 \quad \text{معادلة (١٠)}$$

حيث M_1 وزن العينة لينة، M_2 وزن العينة بعد التجفيف.

ويتم تحديد نسبة الانكماش shrinkage ratio من خلال المعادلة التالية:

$$R = \frac{M_2}{(V_d \times P_w)} \quad \text{معادلة (١١)}$$

حيث V_d الحجم بعد التجفيف، P_w كثافة الماء، M_2 الكتلة بعد التجفيف.

مؤشر الانكماش (SI) Shrinkage Index:

هو الفرق بين حد اللدونة وحد الانكماش. (Asuri & Keshavamurthy, 2016, p. 30) ويتم حساب مؤشر الانكماش من خلال المعادلة التالية: (Nelson & et.al., 2015)

$$SI = Pl - Sl \quad \text{معادلة (١٢)}$$

حيث Pl حد اللدونة، Sl حد الانكماش

ويصنف معدل انكماش الطين وفقاً لمؤشر الانكماش، **جدول (٦)**، على النحو التالي:

جدول (٦): تصنف معدل انكماش الطين وفقاً لمؤشر الانكماش.

معدل انكماش الطين	ضعيف	متوسط	كبير	كبير جداً
مؤشر الانكماش	أقل من ١٥	٣٠-١٥	٦٠-٣٠	أكبر من ٦٠

يوجد طريقتان لتحديد انكماش الطين هما الانكماش الخطي Linear Shrinkage، والانكماش الحجمي volume Shrinkage.

١. اختبار الانكماش الخطي Linear shrinkage test:

يعبر الانكماش الخطي عن تناقص طول العينة أثناء التجفيف أو الحرق. (McColm, 2013, p. 247) ويعتمد إجراء اختبار الانكماش الخطي على النحو التالي: (Pratama & Osarenmwind, 2014, p. 154), et.al., 2021, p. 316)

إحضار عينة تربة معلومة الوزن تم نخلها منخل رقم ٤. ثم تشكيل عينات التربة بالماء المقطر لتشكيل معجون. ثم وضع العينة وتسويتها على قالب الانكماش، وتحديد خط مائل بطول ١٠ سم قطرياً (L_p)، شكل (١٥). ثم قياس محتوى الرطوبة الأولي ووزنه قبل التجفيف في درجة حرارة الغرفة لمدة ٢٤ ساعة تقريباً. ثم التجفيف في الفرن عند درجة حرارة لا تزيد عن ٦٥ درجة مئوية حتى يتوقف الانكماش إلى حد كبير، ثم عند حوالي ١٠٥-١١٠ درجة مئوية لمدة ٢٤ ساعة لإكمال التجفيف. ثم قياس طول الخط المرسوم عبر المحور القطري على العينة المجففة بالفرن (L_d)، وذلك في حالة قياس انكماش الجفاف الخطي Linear Drying Shrinkage (LS_d). ثم وضع العينة للاختبار داخل الفرن وإطلاقها حتى ١٠٠٠ درجة مئوية. ثم قياس الخط المرسوم عبر المحور القطري للعينة لتحديد طول النهائي (L_f) بعد الحريق. وذلك في حالة قياس انكماش الحريق الخطي Linear Firing Shrinkage (LS_f).



شكل (١٥): قالب الانكماش الخطي.

يتم حساب النسبة المئوية للانكماش الخطي من خلال المعادلة التالية: (ASTM C326-09, 2018)

حيث يتم حساب انكماش الجفاف الخطي:

$$LS_d(\%) = \left[\frac{L_p - L_d}{L_p} \right] \times 100 \quad \text{معادلة (١٣)}$$

ويتم حساب انكماش الحريق الخطي:

$$LS_f(\%) = \left[\frac{L_d - L_f}{L_d} \right] \times 100 \quad \text{معادلة (١٤)}$$

حيث L_p طول الخط على العينة لدنة، L_d طول الخط على العينة جافة، L_f طول الخط على العينة بعد الحرق.

٢. اختبار الانكماش الحجمي Volumetric Shrinkage Test:

يعبر الانكماش الحجمي عن تقلص الجسم اللدن أثناء التجفيف أو عملية الحرق أو كليهما كنسبة الحجم من الحجم الأصلي. (McColm, 2013, p. 505)

يعتمد إجراء اختبار الانكماش الخطي على النحو التالي: (ASTM C326-09,

2018)

إحضار عينة تربة معلومة الوزن تم نخلها منخل رقم ٤. ثم تشكيل عينات التربة بالماء المقطر لتشكيل معجون. ثم وضع العينة وتسويتها على قالب الانكماش وتحديد حجمها (V_p)، شكل (١٧). ثم قياس محتوى الرطوبة الأولي ووزنه قبل التجفيف في درجة حرارة الغرفة لمدة ٢٤ ساعة تقريبًا. ثم التجفيف في الفرن عند درجة حرارة لا تزيد عن ٦٥ درجة مئوية حتى يتوقف الانكماش إلى حد كبير، ثم عند حوالي ١٠٥ درجة مئوية إلى ١٠٠ درجة مئوية لمدة ٢٤ ساعة لإكمال التجفيف. ثم قياس أبعاد العينة المجففة بالفرن لتحديد الحجم (V_d). وذلك في حالة قياس انكماش الجفاف الحجمي Volumetric Drying Shrinkage (VS_d). ثم وضع العينة الاختبار داخل الفرن وإطلاقها حتى ١٠٠٠ درجة مئوية. ثم قياس أبعاد العينة لتحديد الحجم النهائي (V_f) بعد الحريق. وذلك في حالة قياس انكماش الحريق الحجمي Volumetric Firing Shrinkage (VS_f).



شكل (١٦): قالب الانكماش الحجمي.

ويتم حساب النسبة المئوية للانكماش الحجمي من خلال المعادلات التالية:
(Prasanna & et.al., 2022, p. 250)

حيث يتم حساب انكماش الجفاف الحجمي:

$$VS_d(\%) = \left[\frac{V_p - V_d}{V_p} \right] \times 100 \quad \text{معادلة (١٥):}$$

ويتم حساب انكماش الحريق الحجمي:

$$VS_f(\%) = \left[\frac{V_d - V_f}{V_d} \right] \times 100 \quad \text{معادلة (١٦):}$$

حيث V_p حجم العينة لدنة، V_d حجم العينة جافة، V_f حجم العينة بعد الحرق. كما يمكن حساب النسبة المئوية للانكماش الحجمي عن طريق الانكماش الخطي من خلال المعادلات التالية: (ASTM C326-09, 2018)

حيث يتم حساب انكماش الجفاف الحجمي:

$$VS_d(\%) = [(1 - LS_d)^3] \times 100 \quad \text{معادلة (١٧):}$$

ويتم حساب انكماش الحريق الحجمي:

$$VS_f(\%) = [(1 - SL_f)^3] \times 100 \quad \text{معادلة (١٨):}$$

حيث VS_d انكماش الجفاف الحجمي، LS_d انكماش الجفاف الخطي، VS_f انكماش الحريق الحجمي، SL_t انكماش الحريق الخطي

الكثافة الظاهرية Bulk Density:

تعرف الكثافة الظاهرية بأنها "نسبة كتلة جسم أو مادة إلى حجمه الكلي، بما في ذلك مساحة المسام". (McColm, 2013, p. 66) وتعرف أيضًا على أنها "مقياس لنسبة وزن مادة مقاومة للحرارة إلى الحجم الذي تشغله". (Janet J. Kipsanai, 2017, p. 173) وتكمن أهمية الكثافة الظاهرية في علاقتها المباشرة بالبنية المجهرية الداخلية للجسم الخزفي، سيؤدي التوزيع غير الملائم للكثافة الظاهرية إلى انكماش غير منتظم، مما قد يؤدي إلى عدم استقرار الأبعاد في المنتج النهائي، مثل الروابط غير المنتظمة أو التقوسات أو اختلافات في الحجم. (Amorós & et.al., 2010, p. 2927) وتؤدي الزيادة في الكثافة الظاهرية لمادة معينة إلى زيادة ثبات حجمها وسعتها الحرارية. (Kipsana, 2018, p. 22)

اختبار الكثافة الظاهرية Bulk density test:

يتم قياس الكثافة الظاهرية للأشكال المقاومة للحرارة منتظمة الشكل من خلال الوزن وحجم الكتلة الذي يتم حسابه من الأبعاد المقاسة. ويعتمد إجراء اختبار الكثافة الظاهرية على النحو التالي:

• **الكثافة الظاهرية الرطبة (BD_w):** إحضار عينة تربة معلومة الوزن تم نخلها منخل رقم

٤. ثم تشكيل عينات التربة بالماء المقطر لتشكل معجون. ثم وضع المعجون وتساويتها في قالب معلوم الحجم والوزن. ثم تحديد وزن M_1 وحجم العينة V_p . ويتم حساب الكثافة الظاهرية الرطبة من خلال المعادلة التالية: (Ahmadi & Ghaur, 2013, p. 137)

$$BD_w(g/cm^2) = \frac{M_1}{V_p} \quad \text{معادلة (١٩)}$$

حيث V_p حجم العينة لدنة، M_1 وزن العينة الرطبة.

• **الكثافة الظاهرية الجافة (BD_d):** تجفيف العينة (المجففة بالهواء مسبقاً) مرة أخرى في

الفرن عند ($110^\circ C$). ثم تبريد العينة ووزنها بدقة 0.01 من أجل تحديد وزنها المجفف (M_2). ثم قياس الأبعاد الخاصة بالعينات باستخدام القدمة ذات الورنية، ثم تم استخدام

الأبعاد لحساب حجم العينة (V_d). (McCarty & et.al., 2016, p. 15) ويتم حساب الكثافة الظاهرية الجافة من خلال المعادلة التالية: (ASTM C830-00, 2016)

$$BD_d(g/cm^2) = \frac{M_2}{V_d} \quad \text{معادلة (٢٠)}$$

حيث V_d حجم العينة جافة، M_2 وزن العينة جافة.

• **الكثافة الظاهرية الصلبة (BD_s):** حرق العينة في الفرن عند ($1000^\circ C$). ثم تجفيف

العينة بالهواء لمدة ٢٤ ساعة ثم تجفيفها عند ($110^\circ C$). ثم تبريد العينة ووزنها بدقة

0.01 من أجل تحديد وزنها المجفف (M_3). ثم نقل العينات إلى دورق وغليها بالماء

لمدة ٣٠ دقيقة للمساعدة في إطلاق الهواء المحبوس ثم أخذ الوزن المنقوع (M_4). ثم

تعليق العينات في الماء باستخدام دورق موضوع على ميزان، ثم أخذ الوزن المعلق (M_5).

ويعتمد إجراء اختبار الكثافة الظاهرية الصلبة (Osarenwindu & Abel, 2014, p. 25)

من خلال المعادلة التالية: (ISO-18754, 2020)

$$BD_s(g/cm^2) = \frac{M_3}{M_4 - M_5} p_w \quad \text{معادلة (٢١)}$$

حيث M_3 وزن العينة جافة، M_4 وزن العينة منقوعة، M_5 وزن العينة معلقة، p_w كثافة الماء.

المسامية الظاهرية **Apparent Porosity**:

تعرف المسامية بأنها "نسبة حجم الفراغات إلى الحجم الإجمالي لكتلة التربة ، معبراً عنها كنسبة مئوية". (Bobrowsky & et.al., 2018, p. 110) وتعرف أيضاً بأنها "نسبة مساحة المسام المفتوحة للجسم إلى حجم كتلته ، معبراً عنها بالنسبة المئوية". (McColm, 2013, p. 66) وتؤثر مسامية هيكل الجسم الخزفي على سلوكه أثناء المعالجة (التجفيف، الحرق، والترجيح) وتحدد إلى حد كبير خصائص المنتج النهائي (الأبعاد، الانحناء، القوة الميكانيكية، تشطيب السطح ، إلخ.). وهذا يجعل التحكم الكامل في مسامية الجسم أمراً ضرورياً أثناء التشكيل، بهدف إجراء مزيد من المعالجة المناسبة والحفاظ على خصائص المنتج النهائي. (Amorós & et.al., 2010, p. 2927) وتزداد الكثافة الظاهرية مع زيادة قوة الانضغاط ومقاومة نفاذية الخبث مع تقليل المسامية، ونقل الموصلية الحرارية مع زيادة المسامية. (Otunniyi, 2013) ويعتمد إجراء اختبار المسامية الظاهرية من خلال طريقتين على النحو التالي:

- **الطريقة الأولى:** إحضار عينة تربة معلومة الوزن تم نخلها منخل رقم ٤، وخط عينات التربة بالماء المقطر لتشكيل معجون، وتشكيلها باستخدام قالب. ثم تجفيف العينات في الهواء لإزالة الرطوبة، ثم وضع العينات بعد ذلك في فرن يعمل عند (110 °C) لمدة ١٢ ساعة لإزالة كل الرطوبة المتبقية. ثم حرق العينات في الفرن عند (1000 °C). ثم تبريد العينة ووزنها بدقة ٠.٠١ من أجل تحديد وزنها المجفف (M_3) وقياس أبعاد العينة لحساب حجم العينة (V_f). ثم غمر عينات الاختبار في الماء لمدة ٢٤ ساعة، ثم إزالتها وتنظيفها وتسجيل الأوزان النهائية (M_4). (Lomertwala & et.al., 2019, p. 601)، (Arthur & Gikunoo, 2020) ويتم حساب المسامية الظاهرية من كل عينة من خلال المعادلة التالية: (ASTM C20-00, 2022)

$$P_a(\%) = \frac{M_4 - M_3}{V_f} \times 100 \quad \text{معادلة (٢٢):}$$

حيث M_3 وزن العينة جافة، M_4 وزن العينة منقوعة، V_f حجم العينة بعد الحرق.

- **الطريقة الثانية:** تشكيل معجون العينات بالشكل والحجم المطلوبين باستخدام قالب وضغطها جيداً، ثم تجفيفها في الهواء. ثم تجفيف العينات عند (100 °C) لمدة ٢٤ ساعة. ثم حرق العينات لمدة ١٢ ساعة عند (1000 °C). ثم تجفيف داخل الفرن عند (100 °C) وقياس الوزن الجاف (M_3) لكل عينة. ثم غمر العينات إلى دورق سعة ٢٥٠ مل وعليلها لمدة ٣٠ دقيقة مع التحريك من وقت لآخر للمساعدة في إطلاق فقاعات الهواء المحاصرة. ثم تسجيل الأوزان المنقوعة (M_4). ثم وزن العينات معلقة (M_5) في الماء باستخدام الدورق على الميزان. (OkpanachiP, (Olalere & et.al., 2019), & et.al., 2017) ويتم حساب المسامية الظاهرية من كل عينة من خلال المعادلة التالية: (ASTM C20-00, 2022)

$$P_a(\%) = \frac{M_4 - M_3}{M_4 - M_5} \times 100 \quad \text{معادلة (٢٣)}$$

حيث M_3 وزن العينة جافة، M_4 وزن العينة منقوعة، M_5 وزن العينة معلقة. كما يمكن حساب المسامية الظاهرية من كل عينة من خلال المعادلة التالية: (ISO-18754, 2020)

$$P_a(\%) = \frac{M_4 - M_3}{M_4 - M_5} p_w \quad \text{معادلة (٢٤)}$$

حيث M_3 وزن العينة جافة، M_4 وزن العينة منقوعة، M_5 وزن العينة معلقة، p_w كثافة الماء.

دور تحليل الخصائص الفيزيائية للطين في تحسين الإنتاج الخزفي

تحليل الخصائص الفيزيائية للطين يلعب دوراً مهماً في تحسين جودة المنتجات الخزفية وضمان ملائمة المواد الخام لعمليات التصنيع المختلفة. النقاط التالية توضح أهمية تحليل الخصائص الفيزيائية للطين ودوره في تحسين الإنتاج:

- **اللدونة:** الطين عالي اللدونة يمكن تشكيله بسهولة دون تشققات، مما يحسن من مرونة المنتج أثناء التصنيع. كما تحدد حدود أتبرج (Atterberg Limits) حد السيولة وحد اللدونة نطاق المحتوى المائي الذي يظهر فيه الطين خصائص لدنة، مما يساعد على تحسين عملية التشكيل.

- **التجفيف:** يساعد تحليل معدل التجفيف في تحديد الوقت المناسب لإزالة الرطوبة دون التسبب في تشققات أو انكماش مفرط. كما يساعد تحديد النقاط الحرجة مثل المحتوى الرطوبي الحرج (MC) على التحكم في الانكماش أثناء التجفيف.
- **الانكماش:** التحكم في انكماش الجفاف انكماش والحريق يقلل من العيوب في المنتج النهائي. كما يساعد تحديد حد الانكماش في ضبط عملية التجفيف لضمان استقرار الأبعاد وتقليل التشققات.
- **الكثافة الظاهرية والمسامية:** يُنتج الطين ذو الكثافة العالية منتجات أكثر صلابة وأقل مسامية، مما يزيد من مقاومة المنتج للحرارة والتآكل. كما يحسن التحكم في نسبة المسامية يضمن جودة السطح النهائي للمنتجات من مقاومة العوامل البيئية.
- **تأثير الخصائص الفيزيائية على المنتج النهائي:** تعطي جسيمات الطين الدقيقة سطحًا أملسًا وخاليًا من العيوب. كما يضمن الطين الذي يحتوي على توزيع متوازن للجسيمات منتجًا خزفيًا قويًا ومستقرًا.

آليات عملية لتطبيق نتائج توصيف وتحليل الطينات لتحسين الإنتاج الخزفي:

١. اختيار الطينات المناسبة:

- استخدام نتائج التحليل الكيميائي لتحديد نسب الألومينا (Al_2O_3) والسيليكا (SiO_2) ومحتوى المواد العضوية لتصنيف الطينات المناسبة.
- تطبيق التحليل الفيزيائي لتحديد الطينات ذات اللدونة العالية والمسامية المناسبة لتحقيق منتجات متجانسة ومتينة.

٢. ضبط عملية التشكيل:

- استخدام نتائج تحليل اللدونة وحدود أتربرج (Atterberg Limits) لضبط كمية الماء اللازمة أثناء التشكيل.
- اختيار تقنيات التشكيل (مثل القوالب أو العجلات اليدوية) المناسبة بناءً على طبيعة الطين.

٣. تحسين عملية التجفيف:

- استخدام بيانات معدل التجفيف لتحديد الفترات الزمنية والظروف المثلى لتجنب التشققات.

- ضبط المحتوى الرطوبي للطين بناءً على محتوى الرطوبة الحرج (Mc) لتقليل الانكماش أثناء التجفيف.
- ٤. تقليل الانكماش والعيوب السطحية:
 - تعديل مكونات الطين بناءً على نسب المعادن الطينية والمعادن المصاحبة لتقليل انكماش الجفاف والحرق.
 - استخدام طينات ذات نسيج مناسب أو خلط الطينات بنسب محددة لتجنب التشوهات.
- ٥. تحسين عمليات الحرق:
 - ضبط درجات حرارة الحرق باستخدام نتائج تحليل مكونات الطين لضمان تفاعل المكونات بشكل مثالي وتقليل الفراغات الداخلية.
 - استخدام الطينات التي تتحمل درجات الحرارة العالية لإنتاج منتجات مقاومة للتآكل والحرارة.
- ٦. إدارة المسامية والكثافة الظاهرية:
 - تعديل نسب الطين والرمل والظمي بناءً على التحليل الفيزيائي لتحقيق توازن بين الكثافة الظاهرية والمسامية للحصول على سطح ناعم ومنتجات متينة.
 - استخدام إضافات طبيعية أو صناعية لتحسين مسامية المنتج النهائي.
- ٧. تحسين الجمالية النهائية:
 - تحليل محتوى المعادن المصاحبة (مثل أكاسيد الحديد) لضبط ألوان المنتج النهائي.
 - اختيار معادن طينية متجانسة تعزز من نعومة الأسطح النهائية للمنتجات.
- ٨. تطوير عمليات الخلط والمعالجة الأولية:
 - دمج بيانات توصيف الطينات لضبط نسب المكونات أثناء عملية الخلط.
 - تطبيق تقنيات المعالجة الأولية (مثل الطحن والترشيح) لتحسين تجانس المواد الخام.
- ٩. تعزيز مراقبة الجودة والإنتاج:
 - اعتماد معايير التحليل الكيميائي والفيزيائي كأداة لتقييم جودة الطينات المستوردة أو المحلية.

- تدريب العاملين في المصنع على قراءة وتحليل نتائج التوصيف لتحسين الأداء في جميع مراحل الإنتاج.

المناقشة:

من خلال البحث التفصيلية لطرق توصيف وتحليل الطينيات، اتضح أن التحليل الشامل للخصائص الكيميائية والفيزيائية للطين هو الأساس لتحسين جودة الإنتاج الخزفي. وتعددت المحاور التي تمت مناقشتها لتشمل فهم طبيعة الطين، مكوناته، ومعادنه، بالإضافة إلى أساليب تحليل خصائصه وتأثير هذه العوامل على العمليات التصنيعية المختلفة. ومن الملاحظ أن العلاقة التكاملية بين المكونات الكيميائية والخصائص الفيزيائية تلعب دوراً جوهرياً في تحسين الخواص النهائية للمنتجات الخزفية، سواء من حيث المتانة، الجمالية، أو المقاومة للظروف البيئية.

الاستنتاجات:

أكدت البحث أن توصيف وتحليل الطينيات خطوة أساسية لتحقيق إنتاج خزفي عالي الجودة. من خلال فهم الخصائص الكيميائية والفيزيائية ومعرفة تأثيرها على العمليات التصنيعية، يمكن للصناعات الخزفية تحقيق تحسينات كبيرة في الجودة وتقليل التكاليف والفاقد. تطبيق النتائج والآليات المقترحة سيعزز من تنافسية هذه الصناعات ويسهم في استدامتها.

النتائج:

1. يحدد التركيب الكيميائي للطين (مثل نسب الألومينا والسيليكا) مقاومته للحرارة، صلابته، ومتانته.
2. يؤثر محتوى الحديد والعناصر القلوية بشكل كبير على لون المنتج النهائي وخصائصه الجمالية.
3. تتحكم الخصائص الفيزيائية مثل اللدونة والانكماش بشكل مباشر في جودة التشكيل والتجفيف.
4. تلعبان الكثافة الظاهرية والمسامية دوراً رئيسياً في تحسين قوة المنتج النهائي وسطحه الخارجي.
5. تعزز المعادن الطينية مثل الكاولينيت والمونتموريلونيت من لدونة الطين وسهولة تشكيله.

٦. يساعد وجود المعادن المصاحبة في تحسين الخصائص الميكانيكية والجمالية للمنتج.
٧. يتيح تطبيق التحاليل الكيميائية والفيزيائية تحسين عمليات التشكيل، التجفيف، والحرق.
٨. يقلل التوازن بين مكونات الطين المختلفة من العيوب السطحية ويزيد من تجانس المنتج النهائي.

التوصيات:

١. استخدام نتائج التحليل الكيميائي لضبط نسب المواد الخام وضمان توافقها مع التطبيقات المختلفة.
٢. اعتماد تقنيات تجفيف وحرق متقدمة لتقليل التشققات والانكماش وتحسين متانة المنتجات.
٣. وضع معايير موحدة لتوصيف وتحليل الطينات لضمان جودة المواد الخام.
٤. تدريب العاملين في مجال صناعة الخزف على تقنيات تحليل الطينات وقراءة النتائج بفعالية.
٥. تشجيع الدراسات المستمرة لتحليل تأثير معادن الطين والمعادن المصاحبة على خصائص الخزف.
٦. استكشاف استخدام طينات محلية جديدة من خلال تحليل خصائصها وتحديد مدى ملاءمتها للإنتاج.
٧. تقليل الفاقد في المواد الخام من خلال تحسين عمليات التشكيل والتجفيف.
٨. تطوير تقنيات إعادة تدوير الطينات والمنتجات التالفة لإعادة استخدامها في الإنتاج.

المصادر والمراجع:

المصادر والمراجع العربية:

١. جرد، حسام صباح. (٢٠١٤). استخدام طينة الكاؤولين الحمراء لإنتاج خزف واطئ الحرارة. مجلة جامعة بابل للعلوم الإنسانية، المجلد ٢٢، العدد ٥، ص ١١٣٢، ١١١٧-١١٢٩.
٢. دفع لله، محمد خالد. (٢٠١٢). نماذج من أطيان السودان الصالحة لإنتاج الخزف دراسة حالة: (جريف سلوه والقريقریب). رسالة ماجستير. السودان: كلية الدراسات العليا، جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا.

٣. عبد الموجود، ابراهيم دسوقي. (٢٠٢٤). معالجة الطينات المحلية لنتاج خزفيات معاصرة باستخدام تقنية الطباعة الخزفية ثلاثية الأبعاد. رسالة دكتوراة. كلية التربية النوعية، جامعة جنوب الوادي. doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.35203.11047>

المصادر والمراجع الاجنبية:

4. Abdeen, H. H. (2016). Properties of Fired Clay Bricks Mixed with Waste Glass. *Master Thesis*. Palestine: The Islamic University–Gaza.
5. Ahmadi, I., & Ghaur, H. (2013). Silage-corn harvesting machinery traffic effects on soil bulk density and water permeability. *Research in Agricultural Engineering, Vol. 59, No. 4*, pp. 136-140. doi: <https://doi.org/10.17221/2/2013-RAE>
6. Amorós, J., & et.al. (2010). Non-destructive measurement of bulk density distribution in large-sized ceramic tiles. *Journal of the European Ceramic Society, Volume 30, Issue 14*, pp. 2927-2936. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.033>
7. Andrade, F. A., & et.al. (2010). Measuring and Modeling the Plasticity of Clays. *Materials Research, Vol. 13(3)*, 395-399. doi: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392010000300019>
8. Andrade, F., & et.al. (2011). Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science Volume 51, Issues 1–2*, 1-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.10.028>
9. Araújo, M. V., & et.al. (2017). On the Use of CFD in Thermal Analysis of Industrial Hollow Ceramic Brick. *Diffusion Foundations, Vol. 10*, pp. 70-82. doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DF.10.70>
10. Arthur, E. K., & Gikunoo, E. (2020). Property analysis of thermal insulating materials made from Ghanaian anthill clay deposits. *Cogent Engineering, Volume 7*, 1827493, pp. 1-20. doi: <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1827493>
11. ASTM C20-00. (2022). *Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water*. USA: ASTM Compass. doi: <https://doi.org/10.1520/C0020-00R22>

12. ASTM C326-09. (2018). *Standard Test Method for Drying and Firing Shrinkages of Ceramic Whiteware Clays*. USA: ASTM Compass. doi: <https://doi.org/10.1520/C0326-09R18>
13. ASTM C830-00. (2016). *Standard Test Methods for Apparent Porosity, Liquid Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Refractory Shapes by Vacuum Pressure*, ASTM Compass. USA: ASTM Compass. doi: <https://doi.org/10.1520/C0830-00R16>
14. ASTM D4318-17. (2018). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. USA: ASTM Compass.
15. ASTM D4943-08. (2018). *Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Wax Method*. USA: ASTM Compass. doi: <https://doi.org/10.1520/D4943-08>
16. Asuri, S., & Keshavamurthy, P. (2016). Expansive Soil Characterisation: an Appraisal. *INAEL 1*, pp. 29–33. doi: <https://doi.org/10.1007/s41403-016-0001-9>
17. Bobrowsky, P. T., & et.al. (2018). *Encyclopedia of Engineering Geology: Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Germany: Springer.
18. Boivin, P., & et.al. (2004). Relationship between Clay Content, Clay Type, and Shrinkage Properties of Soil Samples. *Soil Science Society of America, Volume68, Issue4*, pp. 1145-1153. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1145>
19. Bradbery, J. (2020). *Oxford Advanced Learner's Dictionary* (10th Edition ed.). USA: Oxford University Press.
20. Brosnan, D. A., & Robinson, G. (2003). *Introduction to Drying of Ceramics: With Laboratory Exercises*. Wiley-American Ceramic Society.
21. Franco-Urquiza, E. A. (2021). Clay-Based Polymer Nanocomposites: Essential Work of Fracture. *Polymers, Vol.13*. doi: <https://doi.org/10.3390/polym13152399>
22. Gapak, Y., & et.al. (2017). Laboratory determination of volumetric shrinkage behavior of bentonites: A critical appraisal. *Applied Clay Science, Volume 135*, pp. 554-566. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.10.038>

23. Garrison, E. (2016). *Techniques in Archaeological Geology: Natural Science in Archaeology* (Vol. 2nd Edition). Springer: Germany.
24. Geankoplis, C. J., & et.al. (2018). *Transport Processes and Separation Process Principles: International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences* (Vol. 5th Edition). USA: Pearson.
25. Gorączko, A., & Olchawa, A. (2017). The Amounts of Water Adsorbed to the Surface of Clay Minerals at the Plastic Limit. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, Vol. 64, No. 3-4, P. 165., 155-162. doi: <https://doi.org/10.1515/heem-2017-0010>
26. Groenendyk, D. G., & et.al. (2015). Hydrologic-Process-Based Soil Texture Classifications for Improved Visualization of Landscape Function. *PLoS ONE* 10(6),e0131299, 1-7. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131299>
27. Grønbech, G. L., & et.al. (2011). Comparison of Liquid Limit of Highly Plastic Clay by Means of Casagrande and Fall Cone Apparatus. *14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 64th Canadian Geotechnical Conference, October 2-6*. Toronto, Ontario, Canada.
28. Hamer, F., & Hamer, J. (2015). *The Potter's Dictionary of Materials and Techniques*. USA: University of Pennsylvania Press.
29. Hobbs, P., & et.al. (2018). Shrinkage limit test results and interpretation for clay soils. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, Volume 52, pp. 220 - 229. doi: <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-100>
30. Holtz, R. D., & et.al. (2011). *An Introduction to Geotechnical Engineering* (2nd Edition ed.). UK: Pearson.
31. Hoogsteen, M. J., & et.al. (2015). Estimating soil organic carbon through loss on ignition: effects of ignition conditions and structural water loss. *European Journal of Soil Science*, Volume 66, Issue 2, 320 – 328. doi: <https://doi.org/10.1111/ejss.12224>

32. Hubert, J., & et.al. (2018). Comprehensive study of the drying behavior of Boom clay: Experimental investigation and numerical modeling. *Int J Numer Anal Methods Geomech, Volume 42, Issue 2*, pp. 211-230. doi: <https://doi.org/10.1002/nag.2715>
33. Ismadji, S., & et.al. . (2015). *Clay Materials for Environmental Remediation*. UAS: Springer.
34. ISO-18754. (2020). *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) Determination of density and apparent porosity*. Vernier, Geneva, Switzerland.
35. Janet J. Kipsanai, e. (2017). A Study of Selected Kenyan Anthill Clays for Production of Refractory Materials. *International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 7, Issue 9*, pp. 169-179.
36. Jock, A. A., & et.al. (2013). Development of Refractory Bricks from Nigerian Nafuta Clay Deposit. *International Journal of Materials, Methods and Technologies, Vol. 1, No. 10, p.190.*, 189-195.
37. Khalili, K., & et.al. (2014). Numerical simulation of drying ceramic using finite element and machine vision. *Procedia Technology, Vol. 12, P.390.*, pp. 388-393. doi: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.504>.
38. Kipsana, J. J. (2018). A Study of the Refractory Properties of Selected Clay deposit in Chavakali, Kenya. *International Journal of Scientific and Technical Research in Engineering (IJSTRE), Volume 3, Issue 1*, pp. 19-27.
39. Kumari, N., & Mohan, C. (2021). Basics of Clay Minerals and Their Characteristic Properties. In G. M. Nascimento (Ed.), *Clay and Clay Minerals*. UK, p.4.: IntechOpen. doi: <https://doi.org/10.5772/intechopen.97672>
40. Lima, E. S., & et.al. (2021). Drying and Heating Processes in Arbitrarily Shaped Clay Materials Using Lumped Phenomenological Modeling. *Energies, Volume 14, Issue 14*. doi: <https://doi.org/10.3390/en14144294>
41. Lomertwala, H. M., & et.al. (2019). Characterization of Clays from selected sites for Refractory Application. *International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 9, Issue 11*, pp. 600-

603. doi: <https://doi.org/10.29322/IJSRP.9.11.2019.p9581>
42. Lydia, J. S., & et.al. (2019). Statistical Analysis on Physico-Chemical Properties of Some Nigerian Clay Deposits. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering Vol.7 No.8*. doi: <https://doi.org/10.4236/msce.2019.78007>
43. Mat Nawi, A. (2013). Effect of waste plaster of paris on physical and mechanical properties of ceramic pottery body. *Master Thesis*. Malaysia: Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
44. McCarty, L. B., & et.al. (2016). *Applied Soil Physical Properties, Drainage, and Irrigation Strategies*. Germany: Springer.
45. McColm, I. (2013). *Dictionary of Ceramic Science and Engineering*. Germany: Springer Science & Business Media.
46. McColm, I. (2013). *Dictionary of Ceramic Science and Engineering*. New York: Springer.
47. Mineralogical Society of the UK and Ireland. (2023, 17). *Images of Clay*. Retrieved from Mineralogical Society of the UK and Ireland: <https://www.minersoc.org/images-of-clay.html>
48. Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior* (3rd Edition ed.). USA: Wiley.
49. Modesto, C. d., & Bernardin, A. (2008). Determination of clay plasticity: Indentation method versus Pfefferkorn method. *Applied Clay Science, Volume 40, Issues 1-4*, 15-19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.06.007>
50. Mukherjee, S. (2013). *Science of Clays: Applications in Industry Engineering and Environment*. USA: Springer.
51. Nelson, J. D., & et.al. (2015). *Foundation Engineering for Expansive Soils*. New Jersey, USA: Wiley & Sons, Inc.
52. Nwoye, C. I. (2009). Model for Predicting the Quantity of Water Evaporated during Initial Stage Drying of Wet Clay Designated for Production of Bricks. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, Vol. 8, No. 8*, pp. 647-658. doi: <https://doi.org/10.4236/jmmce.2009.88056>
53. OkpanachiP, C. O., & et.al. (2017). Performance Assessment of The Physical Properties of Kadna, Tagwai and Gbakoita Clay Deposits

- as Refractory for Furnace Lining. *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 4 Issue, pp. 2348 – 7968.
54. Olalere, A. A., & et.al. (2019). Evaluation of the chemical and thermo-physical properties of locally aggregated kaolin-based refractory materials. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, Volume 13, Issue 1, pp. 4743-4755. doi: <https://doi.org/10.15282/jmes.13.1.2019.27.0397>
55. Osarenmwinda, J., & Abel, C. (2014). Performance Evaluation of Refractory Bricks produced from locally sourced Clay Materials. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, Vol. 18 No. 2 , P. 154., pp. 151-157. doi: <https://doi.org/10.4314/jasem.v18i2.1>
56. Otçu, N. Ü., & et.al. (2017). Determination of the Plasticity Index of Soils with Fine-Grained Soils Using Methylene Blue Test. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 5, 165-181. doi: <https://doi.org/10.4236/gep.2017.53012>
57. Otunniyi, I. O. (2013). In Situ Determination of Surface Porosity and Pore Characterization in Refractories. *Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, Volume 3, Issue 3, pp. 14-22.
58. Oummadi, S. (2019). Drying behaviour of ceramic green bodies: experimental characterization and numerical modelling. *Ph.D. Thesis*. France: Université De Limoges.
59. Oummadi, S., & et.al. (2020). Optical Method for Evaluation of Shrinkage In Two Dimensions During Drying of Ceramic Green Bodies. *Open Ceramics Volume 2, 100016.*, pp. 1-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2020.100016>
60. Phogat, V., & et.al. (2015). Soil Physical Properties. In e. Rattan R.K. (Ed.), *Soil Science: An Introduction*. New Delhi: Indian Society of Soil Science.
61. Prasanna, H. S., & et.al. (2022). A Study on Volumetric Shrinkage of Compacted Fine-Grained Soils Subjected to Various Energy Levels. In L. Nandagiri, & et.al., *Sustainability Trends and Challenges in Civil Engineerin*. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 162, Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2826-9_17

62. Pratama, I. T., & et.al. (2021). Linear Shrinkage and its Correlation to the Shrinkage Limit and Index Properties of Kaolinite, Bentonite, and Eight Bandung FineGrained Soils”, . *25th Annual National Conference on Geotechnical Engineering* , (pp. 315-320). Jakarta.
63. Rautureau, M., & et.al. (2013). “*Clays and Health: Properties and Therapeutic Uses*. USA: Springer.
64. Rice, P. M. (2015). *Pottery Analysis* (2nd Edition ed.). USA: University of Chicago Press.
65. Schulze, D. G. (2005). Clay Minerals. In D. Hillel (Ed.), *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier (pp. 246-254). Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00189-2>
66. Theng, B. K. (2019). *Clay Mineral Catalysis of Organic Reactions*. UAS: CRC Press.
67. Twarakavi, N. K. (2010). Can texture-based classification optimally classify soils with respect to soil hydraulics? *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 46, W01501, P. 1., 1-11. doi: <https://doi.org/10.1029/2009WR007939>
68. Velde, B. (1995). *Origin and Mineralogy of Clays: Clays and the Environment*. USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
69. Velde, B., & Meunier, A. (2008). *The Origin of Clay Minerals in Soils and Weathered Rocks*. Germany: Springer.
70. Wang, Y., & et.al. (2013). Shrinkage behaviour of a compacted lime-treated clay. *Géotechnique Letters*, Volume 10, Issue 2, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00006>
71. Wen, B. (2002). A Comparative Study of Particle Size Analyses by Sieve-Hydrometer and Laser Diffraction Methods. *Geotechnical Testing Journal*, Dec, Vol. 25, No. 4. doi: <https://doi.org/10.1520/GTJ11289J>