



Journal of Materials and Engineering Structures

Research Paper

Mise en Equations des Propriétés Physiques, Mécaniques, et Thermiques des Bétons Contenant des Déchets Plastiques

Establishment of Equations for the Physical, Mechanical and Thermal Properties of Concrete Containing Plastic Waste

Houria TAIBI

Laboratoire LM2SC. Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf Oran, Algérie.

ARTICLE INFO

Historique de l'article :

Reçu : 13 Janvier 2022

Révisé : 30 Août 2022

Accepté : 2 Septembre 2022

Mots clés:

Modélisation

Béton

Déchets plastiques

Caractéristiques

Keywords :

Modeling

Concrete

Plastic wastes

Specifications

RESUME

La recherche concernant les bétons contenant des déchets plastiques, a permis de comprendre leur comportement et à démontrer la pertinence de leur utilisation. Mais force est de constater que des équations qui régissent le comportement de ce type de béton font défaut. Dans cette logique, s'inscrit donc cette étude. L'objectif est alors, de proposer des formules régissant les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des bétons contenant des déchets plastiques. Les formules proposées ont été validées par des valeurs d'essais référencées. Au total, cinq cent vingt-quatre valeurs expérimentales et théoriques ont été traitées et analysées. Les valeurs expérimentales ont été collectées et analysées puis comparées aux valeurs théoriques issues des équations proposées. Les résultats obtenus ont permis de conclure que les équations proposées sont toutes pertinentes.

ABSTRACT

Research on concrete containing plastic waste has made it possible to understand their behavior and to demonstrate the relevance of their use. But it is clear that equations governing the behavior of this type of concrete are lacking. In this logic, this study is in line. The objective is then, to propose formulas governing the physical, mechanical and thermal properties of concrete containing plastic waste. The proposed formulas were validated by referenced test values. In total, five hundred and twenty-four experimental and theoretical values were processed and analyzed. The experimental values were collected and analyzed and compared with the theoretical values from the proposed equations. The results obtained allowed to conclude that the proposed equations are all relevant.

* Corresponding author. Tel.: +213 771797656.

E-mail address: houria.taibi@univ-usto.dz

1 Introduction

Le monde est confronté à la problématique de la récupération et du recyclage des déchets plastiques. Ces déchets plastiques, quels que soit leurs origines, ne sont pas biodégradables et contribuent aujourd'hui à une pollution qui s'avère dangereuse. En parallèle, la demande sur le béton est de plus en plus importante. Cette sollicitation sur le béton induit à une surconsommation des granulats naturels. Ce qui peut entraîner, à bref ou moyen terme, une rareté des gisements naturels locaux. La solution à cette double problématique pourrait être la substitution d'une partie des granulats naturels par des déchets plastiques dans la fabrication des bétons. Dans cette logique, plusieurs chercheurs [1-37] se sont donc penchés sur la question en démontrant la pertinence de remplacer une partie des agrégats naturels par des déchets plastiques. Ils ont étudié les propriétés physiques, mécaniques, ou thermiques de ces nouveaux bétons. Les caractéristiques des déchets plastiques incorporés différaient d'une étude à une autre. Ainsi, pour, certains, ils ont utilisés des déchets en polyéthylène basse densité (LDPE) [1-3], d'autres ont utilisé des déchets plastiques en polyéthylène haute densité (HDPE) [4, 5], autres encore ont utilisés des déchets en polyéthylène téréphtalate (PET) [6-10], ou bien des déchets en polypropylène (PP) ou encore des déchets en polychlorure de vinyle (PVC) [11]. D'autres chercheurs ont utilisés plusieurs types de déchets plastiques pour analyser le comportement des bétons formulés par des déchets plastiques [11-14]. Tandis que d'autres chercheurs ont transformé et utilisé des déchets plastiques issus de l'industrie [15, 16]. La granulométrie, la morphologie et le pourcentage des déchets plastiques sont différents, d'une étude à une autre.

En parallèle, des auteurs ont fait un état des lieux concernant les bétons contenant des déchets plastiques [17-23]. L'engouement des chercheurs sur la possibilité d'incorporer les déchets plastiques dans la fabrication des bétons n'a pas décliné, puisqu'en 2021, plusieurs études, qui traitent de l'amélioration des performances des bétons contenant des déchets plastiques, ont été publiées [24-36].

Après cet état des lieux, il s'avère que les différentes propriétés de ces nouveaux bétons ont été bien définies, mais, il n'en reste pas moins que leurs modélisations numériques font cruellement défaut. Pour parer à cette lacune, Azad [37] a collecté et analysé les données disponibles sur les propriétés mécaniques du béton contenant des déchets de polyéthylène téréphtalate. Il a observé, qu'en général, il existe une bonne corrélation entre les propriétés mécaniques et la résistance à la compression du béton contenant des déchets de polyéthylène téréphtalate. Tandis que, Taibi et al. [5], ont traité de la modélisation des propriétés mécaniques de bétons formulés par des déchets en polyéthylène haute densité. A l'issue de l'analyse, ils ont démontré la linéarité de la variation des propriétés mécaniques de ces bétons. En outre, ils ont montré que le pourcentage d'incorporation des déchets est le seul paramètre qui influence les propriétés mécaniques de ce type de béton et que leurs conclusions peuvent être appliquées à des bétons contenant d'autres types de plastiques.

Après cette revue, bien sûr non exhaustive, de la littérature spécialisée, il est clair que l'utilisation des bétons contenant des déchets plastiques est une solution pertinente et viable pour la valorisation des déchets plastiques et la préservation de ressources naturelles. Mais force est de constater que des équations qui régissent le comportement de ce type de béton font défaut.

Dans cette logique, s'inscrit donc cette étude. L'objectif est donc, de mettre en équations les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des bétons contenant des déchets plastiques.

Ce travail a été mené en plusieurs étapes. Tout d'abord, des équations régissant le comportement des bétons contenant des déchets plastiques ont été posées. Ensuite, la validation de ces équations a été obtenue en comparant les résultats théoriques aux résultats des valeurs d'essais référenciés. Les échantillons des valeurs expérimentales collectés ont été les plus représentatifs que possible des bétons formulés par des déchets plastiques. Ainsi les valeurs expérimentales ont été collectées en considérant, pour les déchets plastiques : tous les types, les différentes morphologies et de dimensions, ainsi que divers taux d'incorporation. A la fin de l'étude, il a été prouvé la pertinence des équations proposées.

2 Mise en équations des propriétés physiques, mécaniques et thermiques des bétons contenant des déchets plastiques

Taibi et al. [5], ont démontré la linéarité des propriétés à l'état frais et l'état durci des bétons contenant des déchets plastiques. Il a été en outre démontré, que le seul paramètre, qui conditionne la linéarité des caractéristiques de ce type de béton, est le pourcentage des déchets de plastique incorporés.

Partant de cette observation, une formule universelle est proposée pour définir les propriétés des bétons formulés par des

déchets plastiques.

Cette formule est sous la forme de l'équation d'une droite avec une ordonnée initiale¹ :

$$Z(x) = Z(0) + \frac{Z(j)-Z(0)}{j} \cdot x \quad (1)$$

Avec :

$$B = \frac{Z(j)-Z(0)}{j} \quad (2)$$

avec : $Z(x)$ est la caractéristique du béton pour un pourcentage (x) de déchets plastiques incorporés. $Z(0)$ est la caractéristique du béton à base de granulats naturels, donc pour 0% de déchets plastiques incorporés. Et, $Z(j)$ est la caractéristique du béton pour un pourcentage (j) de déchets plastiques incorporés. B est le coefficient directeur de la droite.

(x) étant le pourcentage de déchets plastiques qui correspond à la caractéristique à déterminer, tandis que (j) est le pourcentage de la caractéristique déjà connue. Les pourcentages (x) et (j) doivent être introduits dans les formules avec la même unité.

Ainsi, Pour l'affaissement du béton contenant des déchets plastiques, la formule proposée est la suivante² :

$$Y(x) = Y(0) + \frac{Y(j)-Y(0)}{j} \cdot x \quad (3)$$

avec : $Y(x)$ est l'affaissement du béton pour un pourcentage (x) de déchets plastiques incorporés. $Y(0)$ est l'affaissement du béton à base de granulats naturels, donc pour 0% de déchets plastiques incorporés. Et, $Y(j)$ est l'affaissement du béton pour un pourcentage (j) de déchets plastiques incorporés.

Pour la densité des bétons contenant des déchets plastiques, la formule proposée est la suivante :

$$D(x) = D(0) + \frac{D(j)-D(0)}{j} \cdot x \quad (4)$$

avec : $D(x)$ est la densité du béton pour un pourcentage (x) de déchets plastiques incorporés. $D(0)$ est la densité du béton à base de granulats naturels, donc pour 0% de déchets plastiques incorporés. Et, $D(j)$ est la densité du béton pour un pourcentage (j) de déchets plastiques incorporés.

Pour la résistance à la compression à 28 jours, des bétons contenant des déchets plastiques, la formule proposée est la suivante :

$$f_{c28}(x) = f_{c28}(0) + \frac{f_{c28}(j)-f_{c28}(0)}{j} \cdot x \quad (5)$$

avec : $f_{c28}(x)$ est la résistance à la compression à 28 jours du béton pour un pourcentage (x) de déchets plastiques incorporés. $f_{c28}(0)$ est la résistance à la compression à 28 jours, du béton à base de granulats naturels, donc pour 0% de déchets plastiques incorporés. Et, $f_{c28}(j)$ est la résistance à la compression à 28 jours, du béton pour un pourcentage (j) de déchets plastiques incorporés.

Pour la résistance à la traction à 28 jours, des bétons contenant des déchets plastiques, la formule proposée est la suivante :

$$f_{t28}(x) = f_{t28}(0) + \frac{f_{t28}(j)-f_{t28}(0)}{j} \cdot x \quad (6)$$

avec : $f_{t28}(x)$ est la résistance à la traction à 28 jours du béton pour un pourcentage (x) de déchets plastiques incorporés. $f_{t28}(0)$ est la résistance à la traction à 28 jours, du béton à base de granulats naturels, donc pour 0% de déchets plastiques incorporés. Et, $f_{t28}(j)$ est la résistance à la traction à 28 jours, du béton pour un pourcentage (j) de déchets plastiques incorporés.

¹La Formule (1) a été déposée auprès de l'office national des droits d'auteurs à Oran, Algérie (ONDA), le 04/01/2022.

²Les Formules (3 à 6) ont été déposées auprès de l'office national des droits d'auteurs à Oran, Algérie (ONDA), le 17/05/2021.

Pour le module d'élasticité, des bétons contenant des déchets plastiques, la formule proposée est la suivante :

$$E(x) = E(0) + \frac{E(j) - E(0)}{j} \cdot x \quad (7)$$

avec : $E(x)$ est le module d'élasticité du béton pour un pourcentage (x) de déchets plastiques incorporés. $E(0)$ est le module d'élasticité du béton à base de granulats naturels, donc pour 0% de déchets plastiques incorporés. Et, $E(j)$ est le module d'élasticité, du béton pour un pourcentage (j) de déchets plastiques incorporés.

Tableau 1 – Caractéristiques et pourcentages des déchets utilisés pour les essais référenciés recueillis

Essais	Nature des déchets plastiques	Dimensions Déchets (mm)	Forme Des déchets	Pourcentage volumique de déchets plastiques incorporés (%)							Références
				A	B	C	D	E	F	G	
Abdulrahman	LDPE	≤ 5 mm	R	0	5	10	15	20	25	30	[1]
Aldahdooh	LDPE	≤ 5 mm	R	0	15	30	45	-	-	-	[2]
Sheelan(a)	LDPE	≤ 4 mm	I	0	2.5	5	7.5	10	12.5	-	[3]
Sheelan(b)	LDPE	≤ 1 mm	I	0	2.5	5	7.5	10	12.5	-	[3]
Chunchu	HDPI	≤ 3 mm	R	0	10	20	30	40	-	-	[4]
Taibi	HDPE	≤ 5 mm	I	0	10	20	30	40	50	-	[5]
Saikia(a)	PET	≤ 6 mm	I	0	5	10	15	-	-	-	[6]
Saikia(b)	PET	≤ 2 mm	I	0	5	10	15	-	-	-	[6]
Saikia(c)	PET	≤ 4 mm	R	0	5	10	15	-	-	-	[6]
Sadrmomtazi	PET	≤ 5 mm	I	0	5	10	15	-	-	-	[7]
Azdapour	PET	≤ 5 mm	I	0	10	20	30	-	-	-	[8]
Abbas	PET	≤ 5 mm	I	0	5	10	15	20	-	-	[9]
Semiha	PET	≤ 5 mm	I	0	30	40	50	60	-	-	[10]
Faraj(a)	PP	≤ 8 mm	R	0	10	20	30	40	-	-	[11]
Faraj(b)	PP	≤ 8 mm	R	0	10	20	30	40	-	-	[11]
Belmokadem(a)	HDPE	≤ 8 mm	I	0	25	50	75	-	-	-	[12]
Belmokadem(b)	PVC	≤ 8 mm	I	0	25	50	75	-	-	-	[12]
Belmokadem(c)	PP	≤ 8 mm	I	0	25	50	75	-	-	-	[12]
Olofinnade(a)	HDPI	≤ 2 mm	R	0	10	30	50	-	-	-	[13]
Olofinnade(b)	LDPE	≤ 2 mm	R	0	10	30	50	-	-	-	[13]
Herrero(a)	PET	≤ 8 mm	I	0	5	10	20	-	-	-	[14]
Herrero(b)	PVC	≤ 8 mm	I	0	5	10	20	-	-	-	[14]
Herrero(c)	PET+PVC	≤ 8 mm	I	0	5	10	20	-	-	-	[14]
Boucedra(a)	WFSCC	≤ 4 mm	R	0	25	50	75	-	-	-	[15]
Boucedra(b)	WFSCC	≤ 4 mm	R	0	25	50	75	-	-	-	[15]
Bhogayata(a)	MPW	≤ 5 mm	I	0	0.5	1	1.5	2	-	-	[16]
Bhogayata(b)	MPW	≤ 10 mm	I	0	0.5	1	1.5	2	-	-	[16]
Bhogayata(c)	MPW	≤ 20 mm	I	0	0.5	1	1.5	2	-	-	[16]

Pour la conductivité thermique, des bétons contenant des déchets plastiques, la formule proposée est la suivante :

$$\lambda(x) = \lambda(0) + \frac{\lambda(j) - \lambda(0)}{j} \cdot x \quad (8)$$

avec : $\lambda(x)$ est la conductivité thermique du béton pour un pourcentage (x) de déchets plastiques incorporés. $\lambda(0)$ est la conductivité thermique du béton à base de granulats naturels, donc pour 0% de déchets plastiques incorporés. Et, $\lambda(j)$ est la conductivité thermique, du béton pour un pourcentage (j) de déchets plastiques incorporés.

3 Validation des modèles mathématiques proposés

3.1 Base de données expérimentales

Pour valider les modèles empiriques proposés, une base de données d'essais expérimentaux, a été collectée dans la littérature. Les caractéristiques des déchets de plastiques, correspondant aux essais référenciés, sont répertoriées sur le tableau 1. Les natures des déchets y sont mentionnées, à savoir : (HDPE) pour le polyéthylène haute densité, (LDPE) pour le polyéthylène basse densité, (PET) pour le polyéthylène téréphtalate, (PVC) pour le polychlorure de vinyle, (PP) pour le polypropylène, (WFSCC) pour les fibres de déchets de sacs plastiques, (MPW) pour les fibres de polypropylène métallisés, et (HDPI) pour le polystyrène à haute résistance aux chocs. Les dimensions des déchets y sont également citées. Pour chaque essai, la morphologie des déchets y est indiquée, soit régulière (R), soit irrégulière (I). Le pourcentage de substitution des déchets incorporés et les références des essais analysés, y sont également listés.

Cette base de données couvre un large éventail de résultats expérimentaux pour évaluer les modèles mathématiques proposés. Quarante-cinq valeurs d'essais documentées ont été collectées et traitées pour l'affaissement, quarante-cinq valeurs pour la densité, soixante valeurs pour la résistance à la compression à 28 jours, trente-cinq valeurs pour la résistance à la traction à 28 jours, quarante-trois valeurs pour le module d'élasticité, et trente-quatre valeurs pour la conductivité thermique.

3.2 Vérifications des modèles mathématiques proposés

Pour examiner la précision des modèles proposés, deux indices statistiques sont utilisés, à savoir la valeur moyenne (essai/calcul) (μ) et l'erreur relative absolue (Δ). Ces indices sont calculés par les expressions suivantes :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{EXPI}{n} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{MODI}{n} \right)} \quad (9)$$

$$\Delta = \left| \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{EXPI}{n} \right) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{MODI}{n} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{EXPI}{n} \right)} \right| \quad (10)$$

Où ($MODI$ et $EXPI$) sont les résultats prédits et les résultats expérimentaux, et n : est le nombre total d'ensembles de données.

4 Interprétation des résultats de validations des modèles mathématiques proposés

Les valeurs des modèles numériques ont été calculées par les formules (3 à 8). Leurs validités a été établies par les valeurs des deux indices statistiques μ et Δ , calculés par les formules (9 et 10).

Pour tous les calculs des valeurs numériques, et pour le calcul du coefficient directeur B de la formule 2, le pourcentage « j » des déchets plastiques a été pris égal au pourcentage final pour chaque essai considéré.

4.1 Interprétation des résultats de validations des modèles proposés pour l'affaissement

Les valeurs des indices statistiques μ et Δ , indiquent une très bonne conformité entre le modèle numérique proposé pour l'affaissement par rapport aux valeurs expérimentales. Ainsi, le ratio de la moyenne des valeurs expérimentales et la moyenne des valeurs calculées (μ), de Bhogayata (a), est égal à l'unité, et par conséquent l'erreur relative absolue (Δ) est nulle, ce qui signifie qu'il existe une concordance parfaite entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées. Pour les autres valeurs de (μ), il est à remarquer que le ratio donnent respectivement une différence de 4%, 1%, 1%, 3%, 4%, 2%, 8% et 1% pour les essais de Aldahdooh, Sheelan(a), Sheelan(b), Bhogayata(b), Bhogayata(c), Olofinnade(a), Olofinnade(b), et Taibi. Dans ces cas, les différences varient entre 0 et 8%. Le modèle numérique est pertinent puisque 100% des valeurs expérimentales

de l'essai de Bhogayata (a) sont concordantes aux valeurs du modèle numérique, et au minimum à 92% des valeurs expérimentales de l'essai Olofinnade (b) sont concordantes aux valeurs du modèle proposé.

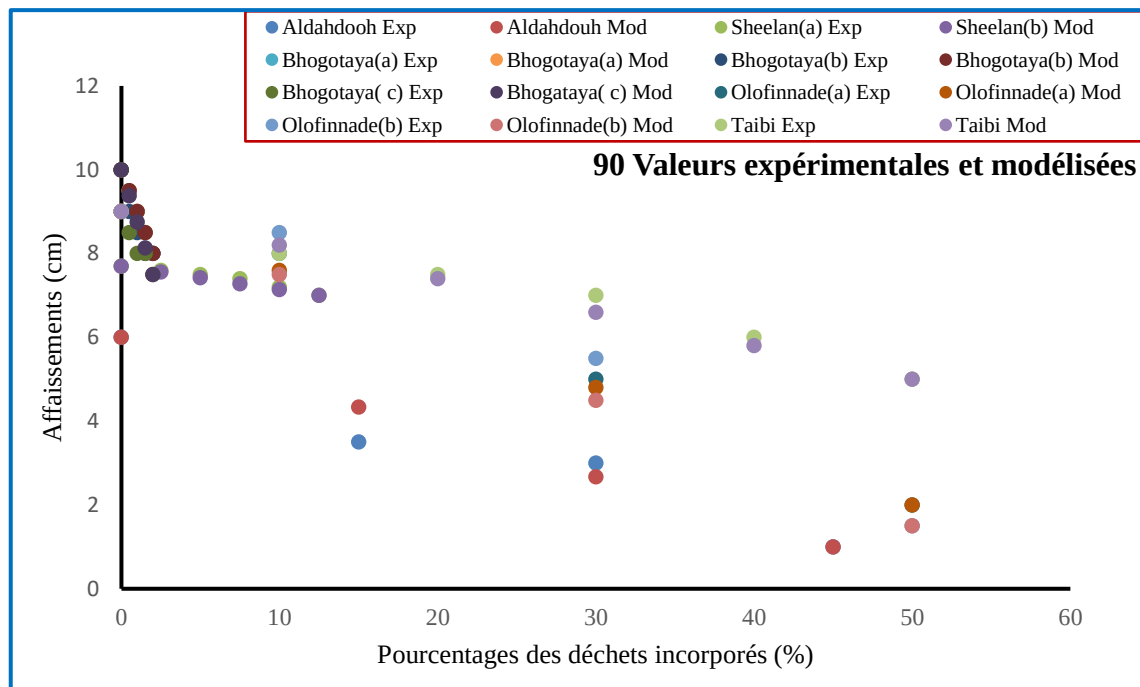


Fig. 1 – Valeurs expérimentales et modélisées des affaissements des bétons contenant des déchets plastiques

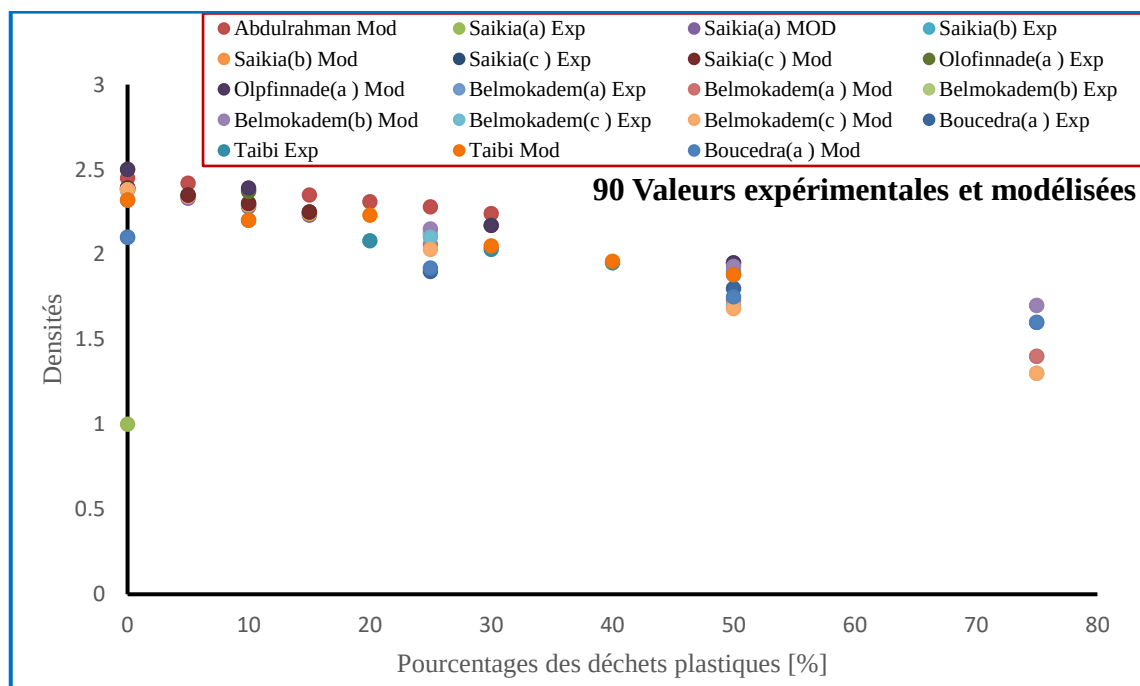


Fig. 2 – Valeurs expérimentales et modélisées des densités des bétons contenant des déchets plastiques

De même, les valeurs de l'erreur relative absolue (Δ) varient entre 0 et 8%. Ce sont des valeurs très faibles qui indiquent une très bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées.

Cette constatation est visible sur la figure 1, qui comporte les variations des affaissements des essais référenciés et la variation des valeurs calculées des affaissements. Les courbes sont parfaitement superposées pour le cas Bhogayata (a), et quasiment juxtaposées pour les autres cas.

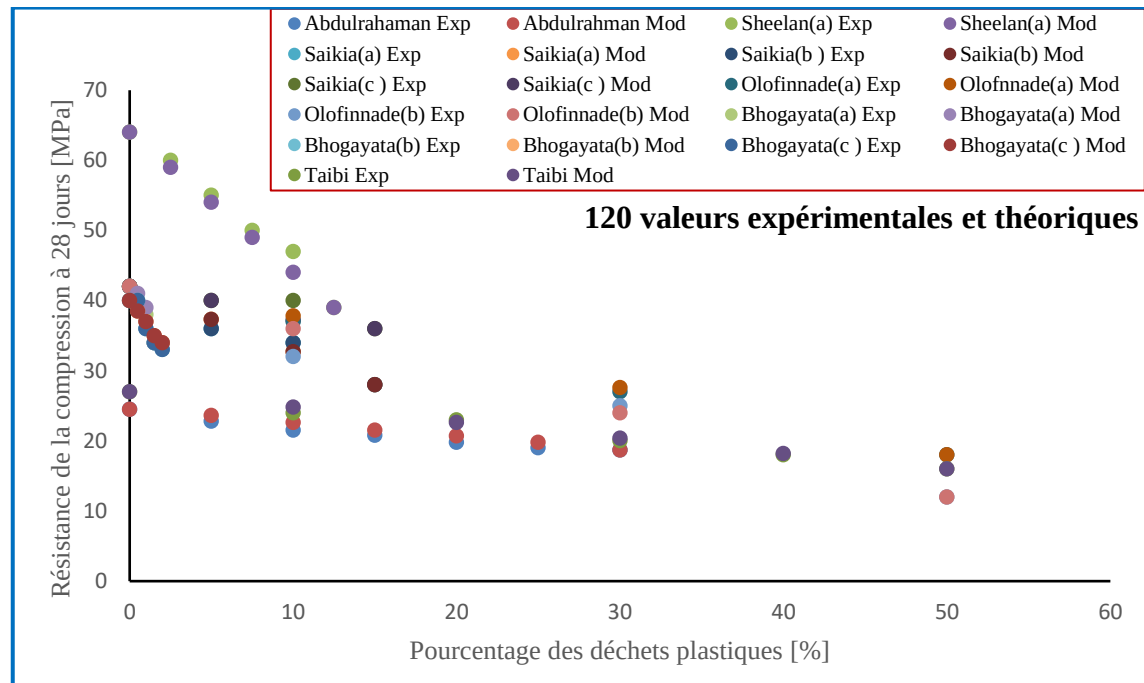


Fig. 3 – Valeurs expérimentales et modélisées des résistances à la compression à 28 jours

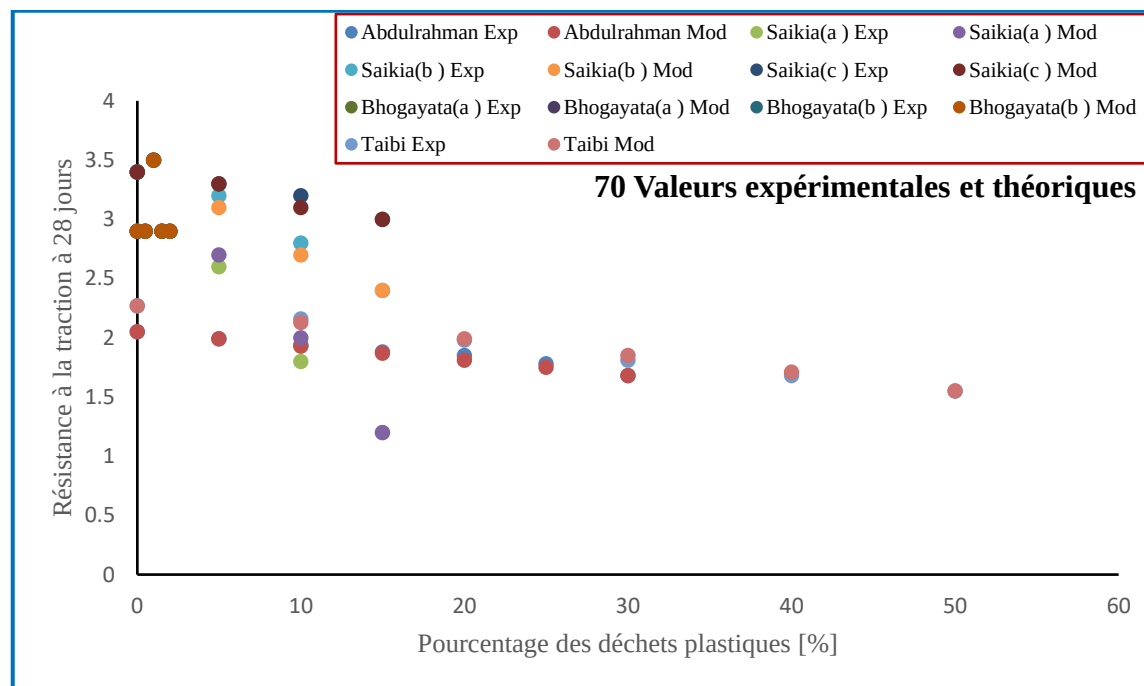


Fig. 4 – Valeurs expérimentales et modélisées des résistances à la traction à 28 jours des bétons contenant des déchets plastiques

4.2 Interprétation des résultats de validations des modèles proposés pour la densité

Les valeurs des indices statistiques, indiquent une très bonne conformité entre le modèle numérique proposé pour la densité par rapport aux valeurs expérimentales. Il a été noté que 40% de l'indice statistique μ sont égaux à l'unité, et par conséquent 40% de l'erreur relative absolue (Δ) est nulle, ce qui signifie qu'il existe une concordance parfaite entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées pour 40% des cas étudiés. Pour les autres valeurs de μ , il a été remarqué que le maximum de la valeur est égal à 95% pour l'essai de Belmokadem (c). Finalement, dans tous les cas étudiés, les différences

varient entre 0 et 5%. Le modèle numérique est donc pertinent puisque 100% des valeurs expérimentales des essais de Saikia (a), Saikia (b), Saikia (c) et Olofinnade (a) sont concordantes avec les valeurs calculées du modèle numérique et au minimum à 95% des valeurs expérimentales de l'essai Belmokadem (c) sont concordantes aux valeurs du modèle proposé.

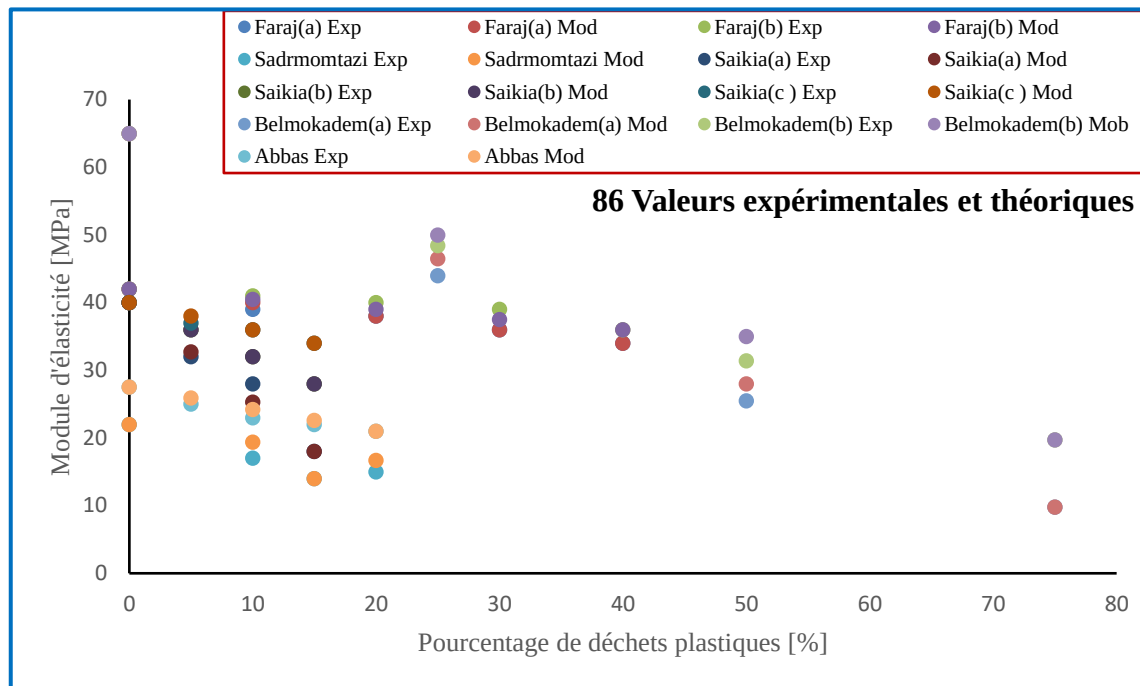


Fig. 5 – Valeurs expérimentales et théoriques des modules d'élasticité des bétons contenant des déchets plastiques

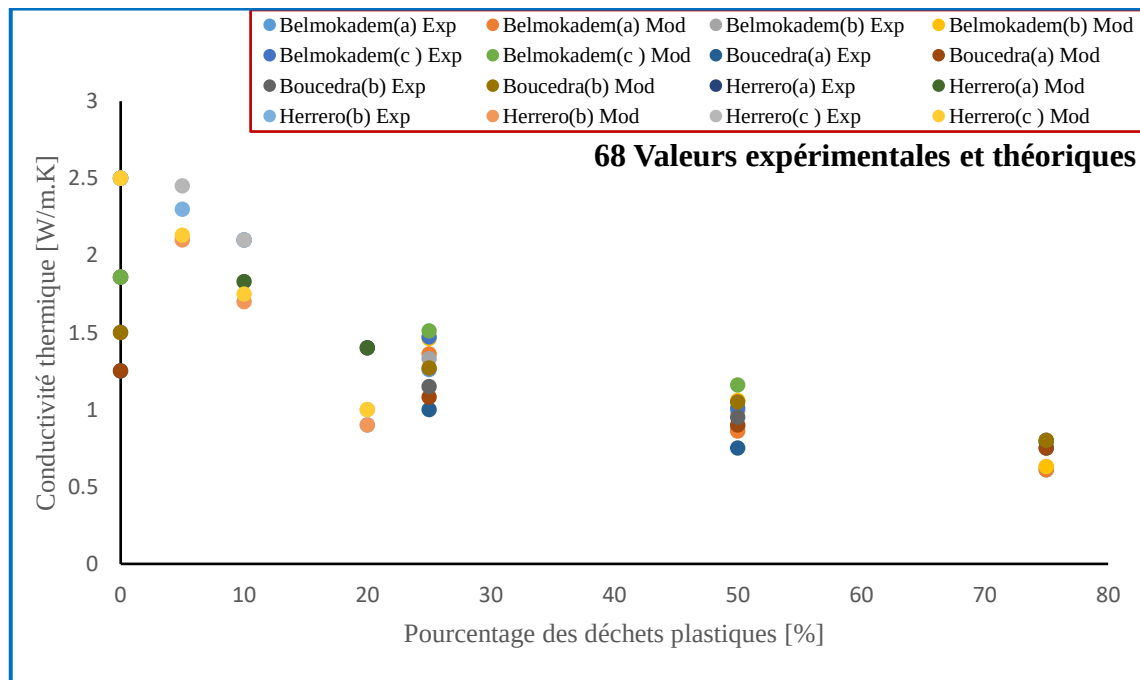


Fig. 6 – Valeurs expérimentales et théoriques des conductivités thermiques des bétons contenant des déchets plastiques

De même, les valeurs de l'erreur relative absolue (Δ) varient entre 0 et 5%. Ce sont des valeurs très faibles qui indiquent une très bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées.

Cette constatation est visible sur la figure 2, qui comporte les variations des densités des essais référenciés et la variation des valeurs calculées des densités. Les courbes sont parfaitement superposées pour les cas Saikia (a), Saikia (b), Saikia (c) et Olofinnade (a), et quasiment juxtaposées pour les autres cas.

4.3 Interprétation des résultats de validations des modèles proposés pour la résistance à la compression à 28 jours

Les indices statistiques calculés, indiquent une très bonne conformité entre le modèle numérique proposé pour la résistance à la compression à 28 jours, par rapport aux valeurs expérimentales. Ainsi, 50% des valeurs du quotient (μ) ne dépassent pas les 99%. Ce qui signifie que la différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées ne dépassent pas 1% pour 50% des valeurs des essais traités. Pour les autres essais traités les différences entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées varient entre 2% et 4%. On peut conclure donc que le modèle numérique est pertinent, puisque au minimum 96% des valeurs expérimentales sont concordantes aux valeurs du modèle proposé. Cette conclusion est perceptible à partir des valeurs de (Δ) qui varient entre 1 et 4%. Ce sont des valeurs très faibles qui indiquent une très bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées.

Cette constatation est visible sur la figure 3, qui comporte les variations des résistances à la compression à 28 jours des essais référenciés et la variation des valeurs calculées. Les courbes sont quasiment juxtaposées pour tous les cas étudiés.

4.4 Interprétation des résultats de validations des modèles proposés pour la résistance à la traction à 28 jours

Les indices statistiques indiquent une très bonne conformité entre le modèle numérique proposé pour la résistance à la traction à 28 jours, par rapport aux valeurs expérimentales. Ainsi, les ratio de la moyenne des valeurs expérimentales et la moyenne des valeurs calculées (μ), de Bhogayata (a) et Bhogayata (b), sont égaux à l'unité, et par conséquent les erreurs relatives absolues (Δ) sont nulles, ce qui signifie qu'il existe une concordance parfaite entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées. Pour les autres valeurs de (μ), il est à remarquer que le ratio donnent respectivement une différence de 1%, 3%, 2%, 1% et 1% pour les essais de Abdulrahman, Saikia(a), Saikia(b), Saikia(c), et Taibi. Dans ces cas, les différences varient entre 0 et 3%. Le modèle numérique est donc pertinent puisque 100% des valeurs expérimentales des essais de Bhogayata (a) et Bhogayata (b), sont concordantes aux valeurs du modèle numérique, et au minimum à 97% des valeurs expérimentales de l'essai Saikia (a) sont concordantes aux valeurs du modèle proposé.

De même, les valeurs de l'erreur relative absolue (Δ) varient entre 0 et 3%. Ce sont des valeurs très faibles qui indiquent une très bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées.

Cette constatation est visible sur la figure 4, qui comporte les variations des résistances à la traction à 28 jours, des essais référenciés et la variation des valeurs calculées. Les courbes sont parfaitement superposées pour les cas Bhogayata (a) et Bhogayata (b), et quasiment juxtaposées pour les autres cas.

4.5 Interprétation des résultats de validations des modèles proposés pour le module d'élasticité

Les indices statistiques calculés, indiquent une très bonne conformité entre le modèle numérique proposé pour le module d'élasticité, par rapport aux valeurs expérimentales. Ainsi, les ratios de la moyenne des valeurs expérimentales et la moyenne des valeurs calculées (μ), de Saiki(b), sont égaux à l'unité, et par conséquent l'erreur relative absolue (Δ) est nulle, ce qui signifie qu'il existe une concordance parfaite entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées. Pour les autres cas analysés, pour les valeurs de (μ), il est à remarquer que le ratio donne une différence qui varie entre 1% et 4%. Le modèle numérique est donc pertinent puisque 100% des valeurs expérimentales de l'essai Saikia(b), sont concordantes aux valeurs du modèle numérique, et au minimum à 96% des valeurs expérimentales de l'essai Sadrmtomtazi sont concordantes aux valeurs du modèle proposé.

De même, les valeurs de l'erreur relative absolue (Δ) varient entre 0 et 4%. Ce sont des valeurs très faibles qui indiquent une très bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées.

Cette constatation est visible sur la figure 5, qui comporte les variations des modules d'élasticité, des essais référenciés et la variation des valeurs calculées. Les courbes sont parfaitement superposées pour le cas Saikia(b), et quasiment juxtaposées pour les autres cas.

4.6 Interprétation des résultats de validations des modèles proposés pour la conductivité thermique

De même, les indices statistiques calculés, indiquent une très bonne conformité entre le modèle numérique proposé pour la conductivité thermique, par rapport aux valeurs expérimentales. Ainsi, toutes les valeurs du quotient (μ) ne dépassent pas les 92%. Ce qui signifie que la différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées ne dépasse pas 8% pour toutes les valeurs des essais traités. On peut conclure donc que le modèle numérique est pertinent, puisque au minimum 92% des valeurs expérimentales sont concordantes aux valeurs du modèle proposé.

Cette conclusion est perceptible à partir des valeurs de (Δ) qui varient entre 1 et 8%. Ce sont des valeurs très faibles qui indiquent une très bonne concordance entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées.

Cette constatation est visible sur la figure 6, qui comporte les variations des conductivités thermiques des essais référenciés et la variation des valeurs calculées. Les courbes sont quasiment juxtaposées pour tous les cas étudiés.

5 Conclusion

Ce travail a été mené en plusieurs étapes. Tout d'abord, des équations régissant le comportement des bétons contenant des déchets plastiques ont été posées. Ensuite la validation de ces équations a été obtenue en comparant les résultats théoriques aux résultats des valeurs d'essais référenciés. Les échantillons des valeurs expérimentales collectés ont été les plus représentatifs que possible des bétons formulés par des déchets plastiques. Les valeurs expérimentales ont été collectées en considérant, pour les déchets plastiques : tous les types, les différentes morphologies et de dimensions, ainsi que divers taux d'incorporation.

Il a été constaté les résultats suivants :

Pour l'affaissement, la densité, la résistance à la compression à 28 jours, la résistance à la traction à 28 jours, module d'élasticité et conductivité thermique des bétons formulés par des déchets plastiques, les valeurs calculées par le modèle proposé ont été conformes à au moins 92%, 95%, 96%, 97%, 96% et 92% des valeurs expérimentales référenciées, respectivement.

On peut donc conclure que les modèles numériques sont pertinents puisque, entre 100% et au minimum 92%, des valeurs expérimentales sont concordantes aux valeurs des modèles proposés.

Enfin, il convient de signaler qu'une formule universelle peut être proposée pour définir les propriétés des bétons formulés par des déchets plastiques.

REFERENCES

- [1]- A. Mohammed, T.K.M. Ali, N. Rajab, N. Hilal, Mechanical properties of concrete and mortar containing low density polyethylene waste particles as fine aggregate. J. Mat. Eng. Str. «JMES», 7(1) (2020) 57-72.
- [2]- M.A.A. Aldahdooh, A. Jamrah, A. Alnuaimi, M.I. Martini, M.S.R. Ahmed, A.S.R. Ahmed, Influence of various plastics-waste aggregates on properties of normal concrete. J. Build. Eng., 17 (2018) 13-22. doi:10.1016/j.job.2018.01.014.
- [3]- S.M. Hama, N.N. Hilal, Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste as partial replacement of sand. Int. J. Sust. Built Env., 6(2) (2017) 299-308. doi:10.1016/j.ijbsbe.2017.01.001.
- [4]- B.R.K. Chunchu, J. Putta, Rheological and Strength Behavior of Binary Blended SCC Replacing Partial Fine Aggregate with Plastic E-Waste as High Impact Polystyrene. Buildings, 9(2) (2019) 50. doi:10.3390/buildings9020050.
- [5]- H. Taibi, B. Nasser, A. Aattache, Z. Draoua, Modeling the Mechanical Properties of Concrete Containing High Density Polyethylene Wastes. J. Mat. Eng. Str. «JMES», 8(2) (2021) 177-196.
- [6]- N. Saikia, J. de Brito, Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. Constr. Build. Mater., 52 (2014) 236-244. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049.
- [7]- A. Sadrmomtazi, S. Dolati-Milehsara, O. Lotfi-Omran, A. Sadeghi-Nik, The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. J. Cleaner Prod., 112 (2016) 2363-2373. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.107.

-
- [8]- A.M. Azhdarpour, M.R. Nikoudel, M. Taheri, The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Constr. Build. Mater.*, 109 (2016) 55-62. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.01.056.
- [9]- A.O. Dawood, H. Al-Khazraji, R.S. Falih, Physical and mechanical properties of concrete containing PET wastes as a partial replacement for fine aggregates. *Case Stud. Constr. Mater.*, 14 (2021) e00482. doi:10.1016/j.cscm.2020.e00482.
- [10]- S. Akçaözoglu, K. Akçaözoglu, C.D. Atiş, Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA). *Composites Part B*, 45(1) (2013) 721-726. doi:10.1016/j.compositesb.2012.09.012.
- [11]- R.H. Faraj, A.F.H. Sherwani, A. Daraei, Mechanical, fracture and durability properties of self-compacting high strength concrete containing recycled polypropylene plastic particles. *J. Build. Eng.*, 25 (2019) 100808. doi:10.1016/j.job.2019.100808.
- [12]- M. Belmokaddem, A. Mahi, Y. Senhadji, B.Y. Pekmezci, Mechanical and physical properties and morphology of concrete containing plastic waste as aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 257 (2020) 119559. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119559.
- [13]- O. Olofinnade, S. Chandra, P. Chakraborty, Recycling of high impact polystyrene and low-density polyethylene plastic wastes in lightweight based concrete for sustainable construction. *Mater. Today: Proc.*, 38 (2021) 2151-2156. doi:10.1016/j.matpr.2020.05.176.
- [14]- J.L. Ruiz-Herrero, D. Velasco Nieto, A. López-Gil, A. Arranz, A. Fernández, A. Lorenzana, S. Merino, J.A. De Saja, M.Á. Rodríguez-Pérez, Mechanical and thermal performance of concrete and mortar cellular materials containing plastic waste. *Constr. Build. Mater.*, 104 (2016) 298-310. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.005.
- [15]- A. Boucedra, M. Bederina, Y. Ghernouti, Study of the acoustical and thermo-mechanical properties of dune and river sand concretes containing recycled plastic aggregates. *Constr. Build. Mater.*, 256 (2020) 119447. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119447.
- [16]- A.C. Bhogayata, N.K. Arora, Impact strength, permeability and chemical resistance of concrete reinforced with metalized plastic waste fibers. *Constr. Build. Mater.*, 161 (2018) 254-266. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.135.
- [17]- S. Bahij, S. Omary, F. Feugeas, A. Faqiri, Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste – A review. *Waste Manage. (Oxford)*, 113 (2020) 157-175. doi:10.1016/j.wasman.2020.05.048.
- [18]- X. Li, T.-C. Ling, K. Hung Mo, Functions and impacts of plastic/rubber wastes as eco-friendly aggregate in concrete – A review. *Constr. Build. Mater.*, 240 (2020) 117869. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117869.
- [19]- R. Sharma, P.P. Bansal, Use of different forms of waste plastic in concrete – a review. *J. Cleaner Prod.*, 112 (2016) 473-482. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.042.
- [20]- R.H. Faraj, H.F. Hama Ali, A.F.H. Sherwani, B.R. Hassan, H. Karim, Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. *J. Build. Eng.*, 30 (2020) 101283. doi:10.1016/j.job.2020.101283.
- [21]- H. Mohammed, M. Sadique, A. Shaw, A. Bras, The influence of incorporating plastic within concrete and the potential use of microwave curing; A review. *J. Build. Eng.*, 32 (2020) 101824. doi:10.1016/j.job.2020.101824.
- [22]- L. Gu, T. Ozbakkaloglu, Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Manage. (Oxford)*, 51 (2016) 19-42. doi:10.1016/j.wasman.2016.03.005.
- [23]- S. Yin, *Development of recycled polypropylene plastic fibres to reinforce concrete*. London: Springer, 2017.
- [24]- H.M. Adnan, A.O. Dawood, Recycling of plastic box waste in the concrete mixture as a percentage of fine aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 284 (2021) 122666. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122666.
- [25]- B. Balasubramanian, G.V.T. Gopala Krishna, V. Saraswathy, K. Srinivasan, Experimental investigation on concrete partially replaced with waste glass powder and waste E-plastic. *Constr. Build. Mater.*, 278 (2021) 122400. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122400.
- [26]- K. Ali, M.I. Qureshi, S. Saleem, S.U. Khan, Effect of waste electronic plastic and silica fume on mechanical properties and thermal performance of concrete. *Constr. Build. Mater.*, 285 (2021) 122952. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122952.
- [27]- Z. Ullah, M.I. Qureshi, A. Ahmad, S.U. Khan, M.F. Javaid, An experimental study on the mechanical and durability properties assessment of E-waste concrete. *J. Build. Eng.*, 38 (2021) 102177. doi:10.1016/j.job.2021.102177.
- [28]- S. Suriya, M. Madhan Kumar, Strength studies on FRC with partial replacement of plastic waste as coarse aggregate. *Mater. Today: Proc.*, 46 (2021) 3418-3422. doi:10.1016/j.matpr.2020.11.754.

-
- [29]- S.M. Malkapur, S.S. Ghodke, P.N. Sujatha, Y. Singh, K.S. Shivakumar, M. Sen, M.C. Narasimhan, A.V. Pulgur, Waste-polymer incorporated concrete mixes for neutron and gamma radiation shielding. *Prog. Nuclear Energy*, 135 (2021) 103694. doi:10.1016/j.pnucene.2021.103694.
- [30]- M. Manjunatha, D. Seth, K.V.G.D. Balaji, Role of engineered fibers on fresh and mechanical properties of concrete prepared with GGBS and PVC waste powder – An experimental study. *Mater. Today: Proc.*, 47 (2021) 3683-3693. doi:10.1016/j.matpr.2021.01.605.
- [31]- S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, R. Roychand, G. Zhang, Preliminary evaluation of the feasibility of using polypropylene fibres from COVID-19 single-use face masks to improve the mechanical properties of concrete. *J. Cleaner Prod.*, 296 (2021) 126460. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126460.
- [32]- K. Srinivas, K.R. Akula, V. Mahesh, Experimental investigation on lightweight concrete by replacing the coarse aggregate with coconut shell and expanded polystyrene beads and using polypropylene fiber. *Mater. Today: Proc.*, 46 (2021) 838-842. doi:10.1016/j.matpr.2020.12.834.
- [33]- S. İpek, A. Diri, K. Mermerdaş, Recycling the low-density polyethylene pellets in the pervious concrete production. *J. Mater. Cycles Waste Manage.*, 23(1) (2021) 272-287. doi:10.1007/s10163-020-01127-x.
- [34]- R. Wei, Y. Sakai, Experimental investigation on bending strength of compacted plastic-concrete. *Resour. Conserv. Recycl.*, 169 (2021) 105521. doi:10.1016/j.resconrec.2021.105521.
- [35]- Kamaliah, N. Handayani, Utilization Plastic Waste Type PET (PolyEthylene Terephthalate) in the Making of Low-Quality Concrete in the City of Palangkaraya. *J. Phys. Conf. Ser.*, 1764(1) (2021) 012179. doi:10.1088/1742-6596/1764/1/012179.
- [36]- B. Kumar Gupta, K. Kapoor, M. Nazeer, M. Kaur. *Waste Plastic Aggregates as a Replacement of Natural Aggregates*. Cham: Springer International Publishing. (2021), 249-258. doi:10.1007/978-3-030-51354-2_22.
- [37]- A.A. Mohammed, Modelling the mechanical properties of concrete containing PET waste aggregate. *Constr. Build. Mater.*, 150 (2017) 595-605. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.154.