

# PARAMETRI OTTIMIZZATI DI PROCESSO E TEST VALIDAZIONE DELL'ASFALTO RICICLATO NOBILITATO

## *Risultati del Progetto SARR*

Lingua	Parole Chiave
IT	Economia Circolare, Plastiche di fondovasca, Trattamento Rifiuti, NORMA UNI 10667-14:2016, Asfalto

**Data:** Marzo 2021

**Autori:** Vari

**DSMN Università Cà Foscari di Venezia**

**Crossing srl**

**Chimicambiente srl**

**IFAF SPA**

**Elite Ambiente srl**



## Allegato A2



Un moltiplicatore di opportunità.  
Da non lasciarsi sfuggire.

# **DELIVERABLE PROGETTO SARR AZ. 2.4**

*Parametri ottimizzati di processo e test validazione  
dell'asfalto riciclato nobilitato*

APRILE 2021

Università Cà Foscari di Venezia  
Crossing srl  
Chimicambiente srl  
IFAF spa  
Elite Ambiente srl



## Introduzione

Grazie alla loro versatilità d'uso, alle loro caratteristiche tecniche, al basso peso e al basso prezzo, le plastiche sono il materiale più utilizzato e diffuso nel mondo. Sfortunatamente, sono anche il materiale più resistente e meno biodegradabile tra quelli noti. Negli ultimi 65 anni, circa 8300 milioni di tonnellate di polimeri fossil-based sono stati prodotti e, di questi, più della metà sono stati destinati alla discarica, inceneriti o dispersi nell'ambiente (Geyer et al., 2017). Oceani, animali e umani sono inevitabilmente esposti all'inquinamento plastico (Kabir et al., 2020; Mercado et al., 2017; Nkanga et al., 2016; Jambeck et al., 2015). Nel XXI secolo, i cambiamenti climatici hanno richiesto un'attenzione sempre maggiore, spingendo la ricerca scientifica verso il concetto di Economia Circolare in cui la produzione e l'organizzazione dei rifiuti sono al primo posto, per uno sviluppo sostenibile delle industrie, per raggiungere una produzione senza rifiuti, sostenibile per l'ambiente (Pratico et al., 2020; Rigamonti et al., 2020; Zhao et al., 2020; Kirchherr et al., 2017).

A tal proposito, le ultime statistiche di Corepla riportano che nel 2018 più di 1.2 milioni di tonnellate di plastica sono state recuperate in Italia, +13.6% rispetto al 2017 (Corepla, 2018).

Recentemente, tuttavia, la domanda di prodotti fossil-based è in continuo aumento, non solo per la produzione di plastica, ma anche per altre applicazioni come il trasporto, le infrastrutture e le pavimentazioni stradali. In particolare, il settore delle strade è promettente sia dal punto di vista economico che per lo smaltimento sicuro dei rifiuti. Il mercato globale degli additivi per asfalti, infatti, raggiungerà 5.3 bilioni di dollari nel 2027, crescendo del 5.1% tra il 2020 e il 2027 (Allied Market Research, 2020). Le miscele di asfalto a caldo per il manto stradale (usura 0/12) sono quelle più usate nel mondo. L'asfalto è una miscela complessa generalmente composta per il 95% in peso di aggregati e un 5% in peso di bitume (Asphalt Institute Inc. & European Bitumen Association–Eurobitume, 2015). La richiesta sempre crescente di nuovi manti stradali sta spingendo il mercato ad adottare un asfalto ad alta resistenza, dalla migliore durata e dai costi di mantenimento ridotti. A tal proposito, l'uso dei rifiuti plastici per la pavimentazione stradale sta concentrando sempre più l'attenzione scientifica ma anche la sensibilità comune, in quanto in grado di migliorare le caratteristiche delle miscele di asfalto e rimediare in parte al problema della gestione e del recupero degli scarti. Vari esempi di recupero degli scarti (gomma, plastica, fibre naturali e sintetiche, vetro o ceneri) e del loro nuovo utilizzo come additivi nella produzione di asfalto sono riportati in letteratura (Rahman et al., 2020; Jamshidi & White, 2020; Zahoor et al., 2020; Zakaria et al., 2018; Poulikakos et al., 2017). In molti casi, l'aggiunta dei rifiuti può migliorare le caratteristiche



dell'asfalto come la resistenza all'usura e la silenziosità. La maggior parte degli esempi riportati in letteratura impiegano la gomma di scarto come additivo efficiente per la produzione di asfalto ad alte prestazioni (Haider et al., 2020; Xiao et al., 2020; Zhao et al., 2020; Bressi et al., 2019; Cao et al., 2019; Gupta et al., 2019; Ling et al., 2019; Tahami et al., 2019; Yu et al., 2019; Rahman et al., 2017). Meno noti, invece, sono i casi in cui gli additivi sono sostituiti dal rifiuto plastico, come il PET riciclato (Leng et al., 2018; Mosa, 2017; Sojobi et al., 2016), il PVC (Manju et al., 2017; Chhabra & Marik, 2014) e il polietilene a bassa ed alta densità, il polipropilene o il polistirene (Haider et al., 2020; Vila-Cortavitarte et al., 2018; Wang et al., 2018; Dalhat & Al-Abdul Wahhab, 2017; Angelone et al., 2016; Rajasekaran et al., 2013; Vasudevan et al., 2012). Il recupero e l'uso della plastica di scarto come additivo per asfalto, infatti, richiede una selezione, separazione e riprocesso attento. Inoltre, la maggior parte delle frazioni polimeriche utilizzate nella letteratura può essere venduta come Materia Prima Secondaria (MPS) e proprio a causa di questo suo valore aggiunto non è economicamente sostenibile il suo utilizzo nell'asfalto. La frazione polimerica di scarto residua, rimanente dal recupero dell'MPS, può essere ambientalmente ed economicamente sostenibile come fonte di additivi plastici per l'asfalto. La plastica da Fondo Vasca (PFV) è perlopiù incenerita o inviata in discarica.

In questo deliverable si descrive il lavoro condotto durante il progetto SARR AZ2.4. Si riporterà, nello specifico, lo studio effettuato sulla PFV come additivo per miscele bituminose, in confronto all'MPS. In particolare, verranno descritte le analisi fisico-chimiche condotte su diverse miscele di asfalto a caldo, modificato con la plastica di recupero, e il loro scale up.

## **La Plastica di Fondo Vasca e le miscele di asfalto modificato**

L'MPS è recuperato dalla vasca di flottazione dopo il riciclo dello scarto plastico, previo raffinamento e lavaggio. La frazione plastica residua (non galleggiante) è la plastica di fondo vasca, la quale, separata dai componenti metallici, è lavata con acqua. L'MPS e la PFV è stata fornita da Elite Ambiente srl, a differenti dimensioni: in flakes e spezzettata a 1.5-4 mm (Figura 1).



Figura 1. MPS (a, b) e PFV (c, d) in flakes e spezzettata.

Si è proceduto alla caratterizzazione delle plastiche fornite da Elite Ambiente srl, mediante DSC (Differential Scanning Calorimetry) e ATR FT-IR (Attenuated Total Reflectance analysis). Dalle analisi effettuate si evidenzia che l'MPS è una miscela 88/12 di HDPE e PP. La PFV, invece, è un materiale altamente eterogeneo e, per questo, i risultati ottenuti sono una media di caratterizzazioni effettuate su diversi batch di plastiche di scarto fornite nel tempo. Principalmente la PFV è composta di PE, PP, EVA e PET.

Una volta caratterizzate le plastiche, si è proceduto al confezionamento di cinque diversi campioni di miscele di asfalto a caldo, la cui composizione è riportata in Tabella 1:

Tabella 1. Composizione delle miscele di asfalto a caldo modificate e non.

Componenti	Miscela 1	Miscela 2 <sup>a</sup>	Miscela 3 <sup>a</sup>	Miscela 4 <sup>b</sup>	Miscela 5 <sup>c</sup>
	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%
Aggregati	Pietra Calcarea 8/12	30	30	30	30
	Pietra Calcarea 4/8	24	24	24	24
	Sabbia	32	32	32	32
	Filler	4	4	4	4
	Fresato	10	10	10	10
Bitume	Bitume 50/70	5.5	5.5	5.5	5.5
Additivo Plastico	MPS	-	5	10	4
	PFV	-	-	-	4

<sup>a</sup> MPS in flakes. <sup>b</sup> MPS spezzettato. <sup>c</sup> PFV spezzettato.

Le miscele sopra riportate sono state confezionate su scala di laboratorio. Dopo varie analisi, le miscele più performanti sono state prodotte nell'impianto di IFAF spa in un batch da 6 tonnellate e posate su campo. Sono state condotte le analisi di emissione in atmosfera.

## Analisi effettuate sulle miscele a caldo di asfalto

### 1. DENSITA' E INDICE DEI VUOTI

La misurazione della densità e dell'indice dei vuoti è effettuata per la verifica delle prestazioni meccaniche dovute all'aggiunta della plastica nella miscela bituminosa. In Tabella 2 si riportano i risultati per le cinque miscele di asfalto modificato e non ottenuti:

**Tabella 2. Valori di densità, indice dei vuoti e volume delle miscele bituminose confezionate.**

Miscela	Densità (g/cm <sup>3</sup> )			Indice dei Vuoti (g/cm <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>			Volume (cm <sup>3</sup> )		
	10 rot.	120 rot.	210 rot.	10 rot.	120 rot.	210 rot.	10 rot.	120 rot.	210 rot.
<b>1</b>	2250	2475	2499	11.8	2.9	2.0	1.133	1.030	1.020
<b>2</b>	2173	2302	2318	12.3	7.1	6.5	1.141	1.077	1.069
<b>3</b>	2071	2136	2148	12.7	9.9	9.4	1.145	1.110	1.104
<b>4</b>	2218	2462	2492	13.0	3.5	2.3	1.150	1.036	1.023
<b>5</b>	2201	2445	2482	13.6	4.0	2.5	1.157	1.041	1.026

<sup>a</sup> Il valore dell'indice dei vuoti, secondo il CSA ANAS, deve essere tra 11-13 dopo 10 rotazioni (rot.), 3-6 dopo 120 rot. e  $\geq 2$  dopo 210 rot., con una velocità di rotazione di 30 rpm.

I test sono stati condotti anche sulle miscele contenenti l'MPS in flakes e in diverse concentrazioni rispetto il bitume per definire le condizioni ottimali di impiego e verificare che i valori fossero paragonabili a quelli riportati in letteratura (Miscela 1-4, Tabella 2). L'MPS, infatti, è già un prodotto riciclato con un proprio mercato mentre la PFV richiede ancora delle autorizzazioni per l'uso, in quanto ancora classificato come scarto.

La densità è generalmente influenzata dalla capacità di impacchettamento degli aggregati, dall'usura del bitume e dal filler (Nkanga et al., 2016). Poiché tutto ciò rimane costante, è la plastica ad influenzarne la variazione di valore. Si evince subito che il valore di densità diminuisce quando la concentrazione di MPS in flakes aumenta. A 10 rot., per esempio, la densità diminuisce da 2173 a 2071 g/cm<sup>3</sup> per la miscela 2 e 3, confrontando con i 2250 g/cm<sup>3</sup> della miscela di confronto 1. Lo stesso può essere verificato per le altre rot. Questo può essere causato da una ridotta omogeneità tra gli

aggregati e la miscela di plastica. Infatti, in presenza del 4% in peso di PFV e MPS spezzettate, i valori della densità aumentano grazie proprio alla ridotta granulometria della plastica, che permette un'interazione migliore tra il bitume e l'additivo plastico. Le miscele di asfalto più prestazionali sono, così, la 4 e la 5.

Un altro parametro importante è l'indice dei vuoti che indica la stabilità e la durata delle miscele di asfalto. Un valore alto è sinonimo di cracking prematuro del manto stradale. I migliori risultati sono ottenuti per le miscele 4 e 5 (4% in peso di MPS e PFV spezzettate). Valori meno soddisfacenti sono quelli ottenuti per le miscele 2 e 3, con l'MPS in flakes, evidenziando ulteriormente come la granulometria dell'additivo plastico influenzi l'omogeneità di tutta la massa bituminosa. La granulometria risulta così cruciale. La durata e la stabilità delle miscele 4 e 5 sono paragonabili a quelli riportate in letteratura e, per questo motivo, lo scale up è stato effettuato solo per queste miscele.

## 2. MARSHALL TEST, RESISTENZA ALLA TRAZIONE INDIRETTA (ITS) E COEFFICIENTE DI TRAZIONE INDIRETTA (ITC)

Si riportano i risultati in Tabella 3.

**Tabella 3. Valori di ITS, ITC e stabilità di Marshall delle miscele bituminose confezionate.**

Miscela	ITS (kPa) <sup>a</sup>	ITC (MPa) <sup>b</sup>	Stabilità di Marshall (kN) <sup>c</sup>
1	1059 ± 10	91 ± 1	15.13 ± 0.15
2	1875 ± 17	233 ± 2	25.05 ± 0.27
3	1678 ± 16	133 ± 1	29.63 ± 0.29
4	1415 ± 14	165 ± 1	16.03 ± 0.16
5	1529 ± 15	180 ± 2	15.35 ± 0.15

<sup>a</sup> ITS CSA ANAS UNI EN 12697-23:2018. ITS: 720 ÷ 1400 kPa.

<sup>b</sup> ITC CSA ANAS UNI EN 12697-23:2018. ITC ≥ 65 MPa.

<sup>c</sup> Stabilità di Marshall UNI EN 12697-34:2012. Stabilità di Marshall > 12 kN.

Anche in questo caso, si evidenzia come la granulometria della plastica sia fondamentale per le prestazioni del manto stradale. Ciò dipende fortemente dal ruolo di rinforzo dell'additivo polimerico (Mosa, 2017), massimo più è piccola la grandezza della frazione plastica aggiunta, in quanto l'omogeneità della miscela bituminosa aumenta.



È importante considerare, inoltre, che la PFV è una miscela plastica eterogenea che contiene diverse frazioni plastiche con diversi punti di fusione. L'uso di questa frazione plastica di scarto è, proprio per questo motivo, in grado di aumentare le prestazioni della miscela bituminosa. Il confezionamento delle miscele di asfalto avviene a circa 160°C. A questa temperatura, una frazione della PFV si fonde mentre l'altra rimane solida. La parte fusa si comporta da modificatore di binder, migliorando le proprietà flussanti e i valori del test di Marshall mentre la parte non fusa riduce parzialmente l'indice dei vuoti, migliorando la resistenza alla deformazione permanente ed evitando il cracking prematuro.

### 3. SCALE UP E TEST DI EMISSIONE E LEACHING

Le miscele 4 e 5 sono state sottoposte ad una prova di scale up con un batch di 6 tonnellate e posate su campo nella sede IFAF spa. Le due miscele sono state scelte in base agli incoraggianti risultati ottenuti dalle analisi fisico meccaniche effettuate. Per un confronto anche la miscela 1 è stata prodotta e stesa. Durante la produzione delle miscele, sono state valutate le emissioni e, successivamente, sulle carote di ciascun manto stradale sono stati effettuati i test di leaching.

Le emissioni delle miscele modificate sono in linea con il regolamento italiano e lo stesso vale per i test di leaching. Questo verifica il basso impatto ambientale delle plastiche nel conglomerato bituminoso, in quanto non si evidenzia un peggioramento nell'inquinamento atmosferico o ambientale.

### Bibliografia

Allied Market Research, 2020. Asphalt Additives Market by Type (Polymerized Asphalt Cement, Novophalt, Multigrade Asphalt Cement, Polyester Modifier and Others) and Application (Road Construction, Road Paving, Airport Runway, Parking Lots, Roofing and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2020–2027. <https://www.marketresearch.com/Allied-Market-Research-v4029/Asphalt-Additives-Type-Polymerized-Cement-13438146/> (accessed 07/08/2020).

Angelone, S., Cauhapè Casaux, M., Borghi, M., Martinez, F.O., 2016. Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures. *Mater. Struct.* 49, 1655–1665. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0602-x>.



- Asphalt Institute Inc. & European Bitumen Association–Eurobitume, 2015. The Bitumen Industry - A Global Perspective, third edition. <https://www.eurobitume.eu/nc/publications/documents/?keyword=The%20Bitumen%20Industry%20-%20A%20Global%20Perspective> (accessed 07/08/2020).
- Bressi, S., Fiorentini, N., Huang, J., Losa, M., 2019. Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements: State of the Art and Statistics. *Coatings*. 9, 384–406. <https://doi.org/10.3390/coatings9060384>.
- Cao, R., Leng, Z., Yu, H., Hsu, S.C., 2019. Comparative life cycle assessment of warm mix technologies in asphalt rubber pavements with uncertainty analysis. *Resour., Conserv. Recycl.* 147, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.04.031>.
- Chhabra, R.S., Marik, S., 2014. A review literature on the use of waste plastics and waste rubber tyres in pavement. *Int. J. Core Eng. Manag.* 1, 1–5 ISSN: 2348-9510.
- Corepla, 2018. Il 2018 di Corepla in sintesi. <https://www.corepla.it/il-2018-di-corepla-sintesi> (accessed 07/08/2020).
- Dalhat, M.A., Al-Abdul Wahhab, H.I., 2017. Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia. *Int. J. Pavement Eng.* 18, 349–357 <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2015.1088150>.
- Geyer, R., Jambeck, J.R., Lavender Law, K., 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Gupta, A., Hernandez, J.R., Fresno, D.C., 2019. Incorporation of Additives and Fibers in Porous Asphalt Mixtures: A Review. *Materials*. 12, 3156–3176. <https://doi.org/10.3390/ma12193156>.
- Haider, S., Hafeez, I., Jamal, Ullah, R., 2020. Sustainable use of waste plastic modifiers to strengthen the adhesion properties of asphalt mixtures. *Constr. Build. Mater.* 235, 117496–117510. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117496>.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L., 2015. Marine Pollution. Plastic Waste Inputs from Land into the Ocean. *Science*. 347 (6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>.
- Jamshidi, A., White, G., 2020. Evaluation of Performance and Challenges of Use of Waste Materials in Pavement Construction: A Critical Review. *Appl. Sci.* 10, 226–238. <https://doi.org/10.3390/app10010226>



- Kabir, E., Kaur, R., Lee, J., Kim, K. H., Kwon, E. E., 2020. Prospects of biopolymer technology as an alternative option for nondegradable plastics and sustainable management of plastic wastes. *J. Cleaner Prod.* 258, 120536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120536>.
- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resour., Conserv. Recycl.* 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- Leng, Z., Padhan, R.K., Sreeram, A., 2018. Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt. *J. Cleaner Prod.* 180 (10), 682–688. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.171>.
- Manju, R., Sathya, S., Sheema K., 2017. Use of Plastic Waste in Bituminous Pavement, *Int. J. Chem. Tech. Res.* 10, 804–811. ISSN: 0974-4290.
- Mercado, G., Dominguez, M., Herrera, I., Melgoza, R.M., 2017. Are Polymers Toxic? Case Study: Environmental Impact of a Biopolymer. *J. Environ. Sci. Eng. B.* 6, 121–126. <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2017.03.002>.
- Mosa, A.M., 2017. Modification of hot mix asphalt using polyethylene terephthalate (PET) waste bottles. *SUST Journal of Engineering and Computer Sciences*, 18 (1), 62–73.
- Nkanga, U.J., Joseph, J.J., Adams, F.V., Uche, O.U., 2016. Characterization of Bitumen/Plastic Blends for Flexible Pavement Application. *Procedia Manufacturing.* 7, 490–496. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.051>.
- Poulikakos, L.D., Papadaskalopoulou, C., Hofko, B., Gschösser, F., Cannone Falchetto, A., Bueno, M., Arrigada, M., Sousa, J., Ruiz, R., Petit, C., Loizidou, M., Partl, M.N., 2017. Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction. *Resour., Conserv. Recycl.* 116, 32–44. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>.
- Praticò, F.G., Giunta, M., Mistretta, M., Gulotta, T.M., 2020. Energy and Environmental Life Cycle Assessment of Sustainable Pavement Materials and Technologies for Urban Roads. *Sustainability.* 12, 704. <https://doi.org/10.3390/su12020704>.
- Rahman, M.T., Hainin, M.R., Wan Abu Bakar, W.A., 2017. Use of waste cooking oil, tire rubber powder and palm oil fuel ash in partial replacement of bitumen. *Constr. Build. Mater.* 150, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.216>.
- Rahman, M.T., Mohajerani, A., Giustozzi, F., 2020. Recycling of Waste Materials for Asphalt Concrete and Bitumen: A Review. *Materials*, 13, 1495. <https://doi.org/10.3390/ma13071495>.



- Rajasekaran, S. Vasudevan, R., Paulraj, S., 2013. Reuse of Waste Plastics Coated Aggregates-Bitumen Mix Composite For Road Application – Green Method, *Am. J. Eng. Res.* 2 (11), 2320–0936.
- Rigamonti, L., Taelman, S.E., Huysveld, S., Sfez, S., Ragaert, K., Dewulf, J., 2020. A step forward in quantifying the substitutability of secondary materials in waste management life cycle assessment studies. *Waste Manage.* 114, 331–340. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.015>.
- Sojobi, A.O., Nwobodo, S.E., Aladegboye, O.J., 2016. Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete. *J. Cleaner Prod.* 3, 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.051>.
- Tahami, S.A., Mirhosseini, A.F., Dessouky, S., Mork, H., Kavussi, A., 2019. The use of high content of fine crumb rubber in asphalt mixes using dry process. *Constr. Build. Mater.* 222, 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.180>.
- Vasudevan, R., Sekar, A.R.C., Sundarakannan, B., Velkennedy, R., 2012. A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements. *Constr. Build. Mater.* 28, 311–320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.03>.
- Vila-Cortavitarte, M., González, P.L., Pérez, M.A.C., Vega, I.I., 2018. Analysis of the influence of using recycled polystyrene as a substitute for bitumen in the behaviour of asphalt concrete mixtures. *J. Cleaner Prod.* 170, 1279–1287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.232>.
- Wang, J., Yuan, J., Xiao, F., Li, Z., Wang, J., Xu, Z., 2018. Performance investigation and sustainability evaluation of multiplepolymer asphalt mixtures in airfield pavement. *J. Cleaner Prod.* 189, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.208>.
- Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Wei, J., Amirkhani, S., 2020. Physical and chemical properties of plasma treated crumb rubbers and high temperature characteristics of their rubberised asphalt binders. *Road Mater. Pavement Des.* 21, 587–606. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1507922>.
- Yu, H., Zhu, Z., Leng, Z., Wu, C., Oeser, M., 2019. Effect of mixing sequence on asphalt mixtures containing waste tire rubber and warm mix surfactants. *J. Cleaner Prod.* 246, 119008. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119008>.
- Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., Giustozzi, F., 2020. Sustainable Asphalt Rejuvenation using Waste Cooking Oil: a Comprehensive Review. *J. Cleaner Prod.* <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123304>. (in press)



Zakaria, N.M., Hassan, M.K., Ibrahim, A.N.H., Rosyidi, S.A.P., Yuso, N.I.M., Mohamed, A.A., Hassan, N., 2018. The use of mixed waste recycled plastic and glass as an aggregate replacement in asphalt mixtures. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*. 80, 79–88.

Zhao, Z., Xiao, F., Amirkhanian, S., 2020. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. *Waste Manage.* 108, 78–105. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.024>.