

# 使用农业废弃物生产可持续使用的建筑材料

迈克尔·马拉维阿斯, 大卫·福柯, 克利桑索斯·休谟

隶属机构: 土木工程系, 希腊

**摘要:** 现代建筑业面临着无数挑战, 主要是由于城市人口的增加和促进建筑材料生产的自然资源的减少。此外, 对气候变化的更高认识正迫使公司重新考虑开发更可持续建筑材料的战略。稻壳灰 (RHA)、甘蔗渣灰 (SCBA) 和竹叶灰 (BLA) 等不同类型的农业废弃物已被确定为可持续建筑材料开发的有效解决方案。在这篇评论文章中, 研究了使用农业废弃物制成的六种不同的建筑材料。这些材料包括砖/砌体元件、绿色混凝土、建筑物的绝缘材料、建筑物的增强材料、刨花板和生物基塑料。选择材料的主要标准是它们在现代建筑应用中的受欢迎程度和广泛使用。此外, 由于这项研究强调确定开发可持续建筑材料的替代方法, 因此重点关注了持续使用会对环境产生不利影响的主流材料。从审查中获得的结果表明, 使用农业废弃物开发可持续建筑材料是有效的, 因为开发的材料符合既定的建筑标准。因此, 这表明农业废弃物材料具有替代传统建筑材料的潜力, 从而实现长期的经济、环境和社会可持续性。

**关键词:** 可持续的; 建筑材料; 农副产品

## Production of Sustainable Construction Materials Using Agro-Wastes

Michael Maraveas, David Foucault, Chrysanthos Hume

Affiliation: Department of Civil Engineering, 26500 Patra, Greece

**Abstract:** The construction sector, in modern times, is faced by a myriad of challenges primarily due to the increase in the urban population and dwindling natural resources that facilitate the production of construction materials. Furthermore, higher awareness on climate change is forcing companies to rethink their strategies in developing more sustainable construction materials. Diverse types of agro-waste ranging from rice husk ash (RHA), sugarcane bagasse ash (SCBA), and bamboo leaves ash (BLA) among others have been identified as potent solutions in the development of sustainable construction materials. In this review paper, six different construction materials, made using agro-waste products, are examined. The materials include brick/masonry elements, green concrete, insulation materials for buildings, reinforcement materials for buildings, particleboards, and bio-based plastics. The main criterion adopted in selecting the materials regards their popularity and wide-scale use in modern construction applications. Additionally, as this research emphasizes identifying alternative approaches to develop sustainable construction materials, the focus is directed toward mainstream materials whose continued use has an adverse impact on the environment. The findings obtained from the review showed that the use of agro-waste to develop sustainable construction materials was effective, as the developed materials adhered to established building standards. Therefore, this indicates that agro-waste materials have the potential to replace conventional construction materials and hence achieve economic, environmental, and social sustainability in the long run.

**Keywords:** Sustainable; construction materials; agricultural by-products

## 引言:

对世界人口统计数据的简要分析表明人口稳步增长,从 2009 年的 68 亿增加到 2019 年的 77 亿,到 2050 年估计将达到 97 亿。一方面,人口增长直接表明健康,随着时间的推移,死亡率正在提高,从而导致人口增长。相反,人口水平的上升也意味着对住房等可用社会设施的压力水平的增加。随着对住房的需求呈直数级增长,这进一步给建筑业以及水泥、钢铁、铝和木材等传统材料的生产带来了压力。Guna 等人进一步认为,传统建筑材料(如水泥)的生产也需要大量的热能和电能,因此会转化为更高的建筑成本。此外,这样的生产过程造成了更高的碳足迹,污染了空气、土地和水。Wi 等人观察到,用于生产水泥的煅烧过程需要高达 1450 摄氏度的温度,并且每生产 1 吨水泥会释放约 0.85 吨二氧化碳。在另一项研究中,Chabriac 等人强调,由于使用传统建筑材料,法国的建筑物占温室气体(GHG)污染的约 23.5%。这些发现意味着需要更多的科学研究来开发不仅更可持续、更环保、而且在不影响建筑质量的情况下更实惠的建筑材料。另一方面,研究进一步表明,甘蔗渣、麦秸、椰子和稻壳等农作物废料的处理也是发展中国家面临的一个重大问题。例如,在印度,仅农业产品就报告了超过 600 公吨(MT)的废物。Obi、Ugwuishiwi 和 Nwakaire 进一步观察到,随着近十年农业生产的扩大,由于耕作系统的集约化,预计会产生更多的农业废料。Madrid 等人强调,管理此类农业废弃物的最常见策略包括在垃圾填埋场倾倒、焚烧和堆肥,因此会产生严重的环境问题。尽管如此,新兴研究表明,在建筑材料开发中部分或全部再利用农业废物和副产品,是应对已确定挑战的可行和暂定解决方案。研究还表明,农业废弃物的再利用不仅有助于解决利用水泥等传统建筑材料带来的污染问题,还有助于解决在垃圾填埋场处理废弃物的环境问题。在一项说明性研究中,研究人员 Sathiparan 和 De Zoysa 表明,使用花生壳、稻壳、稻草和椰子壳等农作物废料作为水泥块制造中沙子的部分替代物,生成的块体符合 ASTM 强度和耐用性方面的标准。同样,Ashour 等人表明,通过使用天然小麦和大麦秸秆纤维稳定土壤,开发可持续且无毒的建筑材料,产生了具有令人印象深刻的热和静态质量的钢筋砖。Chaussinand、Scartezini 和 Nik 等其他研究人员进一步说明,仅使用稻草捆和土壤开发建筑物会导致产生更具可持续性的建筑物。研究人员认为,这是由于材料的最佳特性造成的,例如低内能和高热性能。在这方面,研究结果证实,在开发建

筑材料时全部或部分使用农业废弃物有助于应对可持续性挑战,同时减少污染和不利的环境影响。在这篇评论文章中,对农业废料在建筑材料生产中的使用进行了部分和全部的详细检查。

## 利用农业废弃物开发建筑材料

### 一、砖/砌体组件

自几个世纪以来,砖作为砌体构件一直主要用于建筑行业。传统上,制砖过程包括三个基本步骤:混合原料、制砖和干燥,最后烧制以获得适当的强度。这种砖生产过程的一个重大缺陷导致产生大量的温室气体。Luby 等人揭示,砖窑主要用于烧砖,而砖窑主要用于烧制砖块,因此污染严重。有趣的是,他们对孟加拉国为什么仍然依赖这种技术的研究报告称,在大多数情况下,买砖家更喜欢由这种窑制成的砖,而不是更现代的砖,因为它们成本较低。同样,窑主使用它们,因为它们能够产生可观的投资回报。该过程的第二个缺点源于它们过度使用不可再生材料,例如水和粘土,从而促进自然资源的枯竭。重要的是投资现代窑炉来缓解这些问题,以提高碳化过程的效率,从而降低排放水平。

Gomes 和 Hossain 强调霍夫曼窑(HK)和竖竖砖窑(VSBK)作为两种现成的替代品,与传统的牛沟窑(BTK)相比,它们的排放水平分别降低了 42% 和 29%。VSBK 和传统 BTK 窑的比较评估显示了与 VSBK 和 BTK 相比的各种优势,例如较低的建造成本、窑的紧凑性、烧制砖的高效率和耐候性,因为它甚至可以在季风期使用。VSBK 的能耗也低于 BTK 技术。VSBK 消耗约 0.57 Gcal/000 nos 砖,而自由烟囱和固定烟囱 BTK 分别消耗 1.08 和 0.86 Gcal/000 nos 砖。

然而,更有效的策略是过渡到可持续的制砖工艺。这些工艺结合了农业废料,增加了砖的有用特性,还有助于解决与农业加工相关的废物处理挑战。Kazmi 等人利用稻壳灰(RHA)和甘蔗渣灰(SBA)生产粘土砖,将 5% 的 RHA 和 SBA 按粘土重量计入。所获得的研究结果表明,随着更多的 RHA 和 SBA 掺入粘土烧砖中,砖的抗压强度和断裂模量会降低。然而,相反,砖的断裂模量和抗压强度符合巴基斯坦建筑规范和 ATSM 标准指南。同样,据观察,开发的砖在性质上重量很轻,从而减少了建筑物的结构负荷。进一步的分析还表明,它们对天气有抵抗力,并且通过加入 RHA 和 SBA 也增强了抗风化性。扫描电子显微镜(SEM)下的检查进一步表明,这些砖的多孔性也更高,从而提高了建筑物的整体环境可持续性。

在另一项研究中, Kiziniwiewi 等人在烧制粘土砖时使用了燕麦壳、大麦壳和中间体作为添加剂, 然后评估了开发砖的机械、孔隙率和物理质量。通过添加三种不同浓度的燕麦或大麦壳和中麦来制备砖成型组件: 5%、10% 和 20%。温度也设置为 900 和 1000 摄氏度并保持一个小时。所获得的研究结果表明, 在固体废物的添加浓度在 5% 到 10% 之间时, 可以获得最高质量的环保粘土砖。砖的密度为 1300 至 1800 kg/m<sup>3</sup>, 总开孔率在 34% 至 49% 之间, 吸水率在 14% 至 28% 之间, 抗压强度为 3.3 至 9.5 MPa。观察到固体废物 (燕麦、大麦壳和中粒) 在 500℃ 的温度下焚烧, 从而在粘土体中形成多孔结构。Kazmi 等人和 Kiziniwiewic 等人在使用农业废弃物作为添加剂制造粘土砖时采用的技术比较表明, 仅使用了极少量的废弃物 (5% - 10%)。同样, 也发现了类似的砖块特征——尽管使用了各种农业固体废物 (稻壳和甘蔗渣以及燕麦/大麦壳和中间体), 但在这两种情况下都具有更高的孔隙率、出色的抗压强度和高密度。

在一项研究中, Taurino 等人专注于通过将葡萄酒废料 (WWs) (如葡萄酒、葡萄籽和秸秆) 与粘土结合来制造轻质砖。与之前的研究类似, 研究人员改变了 WW 的浓度并评估了生成的砖块。所获得的结果表明, 具有最高机械和物理性能的砖是由使用 5% 或更少重量的葡萄酒制成的。同样, 根据使用的 WW 浓度, 砖的密度也降低了 13%。砖的抗弯强度也随着所用 WW 的浓度而降低。

有趣的是, 研究人员认为, 砖孔隙率的增加导致其轻质和隔热性能的相应提高, 从而适合应用于绿色建筑。将这些发现与以前的研究进行并排比较, 突出表明, 废料浓度的相似性影响了砖的整体质量, 此外, 在低浓度 (5%) 时可获得最高的砖质量。尽管如此, 存在的不同之处在于葡萄酒废料的使用, 这表明燕麦和大米等更传统的农产品已经发生了转变。

Deraman 等人还研究了在粘土砖生产中使用空果串 (EFB) 和椰子纤维 (CB) 作为增孔剂的影响。该研究使用了三种浓度的废品 (0%、5% 和 10%), 然后, 对砖的物理机械性能进行了评估, 例如抗压强度、导热率和吸水率。研究表明, 在添加 5% 的 EFB 的情况下, 砖在吸水率和抗压强度以及 ASTM C517 导热率标准方面符合 BS392: 1985 的最低要求。随后, 研究得出结论, 砖是提高建筑围护结构热质量的潜在解决方案。

在另一项研究中, Muñoz 等人通过将葡萄枝条作为造孔剂开发了耐火粘土砖。在这项研究中, 研究人员使

用修剪过的葡萄藤枝条的木屑作为制造粘土砖 (FCB) 的添加剂。该研究的重点是评估农业废弃物对砖颗粒尺寸的影响, 其中考虑了三种尺寸: 0-0.5 毫米、1.5 毫米以上和 0.5-1.5 毫米。评估砖的机械和热特性的研究结果表明, 木屑含量最高为 10% 的砖块具有最高的抗压强度和吸水率, 而热导率降低了高达 50%。Muñoz 等人与 Mandal、Verma 和 Sinha (他们也使用非食品相关的农业废弃物来制造砖块) 的比较显示了相似之处, 即只有极少比例的废弃物导致了具有最佳性能的高质量砖块抗压强度和吸水率。在这两种情况下, 热特性也得到了增强。

## 二、绿色混凝土的常用方法

除了砖, 混凝土在建筑行业也得到了高度的应用。Prusty 等人观察到混凝土包含水泥、细骨料和粗骨料的混合物, 所有这些都来自自然资源。随后, 随着住房需求的增加, 不可再生自然资源面临巨大压力, 从而引发了对使用替代农业废料生产混凝土的研究。

首先, Modani 和 Vyawahare 研究了用比例为 0%、10%、20%、30% 和 40% 的混凝土中的细骨料替代未经处理的甘蔗渣灰 (SCBA) 的效果。水灰比也保持在 0.40, 减水剂的剂量保持在 0.8%。之后, 浇筑的混凝土试件在标准实验室条件的养护下, 分别测试 7 天和 28 天的抗压强度、吸水性和抗拉强度。获得的研究结果表明, 在抗压强度方面, 含有 10% 的 SCBA 替代品的样本比含有 0% SCBA 的样本表现出更好的结果。此外, SCBA 的进一步增加导致抗压强度下降和新拌混凝土性能下降。由于火山灰的性质, 在较长时间内记录到与 SCBA 的混合物的强度增加。

进一步的测试还表明, 随着 SCBA 水平的提高, 拉伸强度和吸附性会降低。研究结果具有重要的经济意义, 因为它们表明 SCBA 可以用作混凝土生产中骨料的可行替代品。Prusty 等人也对这个问题进行了权衡, 透露在印度, 约有 1000 万吨甘蔗被当作废物处理, 因此, 适当的转化和作为建筑材料的应用有助于它们的处置。

Akram 等人研究了在自密实混凝土中使用甘蔗渣灰 (SCBA) 作为粘度调节剂。据研究人员称, 自密实混凝土受到了不同从业者的极大关注, 因为它消除了压实过程中对振动器的需求。然而, 它的采用和使用受到其供应成本高于传统混凝土的阻碍。为此, 该研究试图调查在自密实混凝土中使用甘蔗渣灰 (SCBA) 作为粘度调节剂的相对成本和性能。考虑的重要变量包括水胶比、甘蔗渣灰的比例和处理流动性的减水剂用量。水泥和水的含量保持不变。所得结果表明, 自密实混凝土与甘蔗

渣混合料在 28 天后产生的抗压强度与对照混凝土相当。此外, 研究表明, 特定混凝土混合物的成分总成本比对照混凝土低 35.63%, 而两者的抗压强度均较高, 为 34 MPa。该研究的意义在于, 它强调除了传统混凝土应用中使用的三元和二元混合物外, 农业废料还可以用作生产自密实混凝土的一种成分。

### 三、建筑物绝缘材料

农业废弃物也被用于制造建筑物的绝缘材料。根据 Liu 等人的说法, 在过去的几十年中, 在建筑隔热中使用农业废弃物、经济植物和森林废弃物等生物质已受到越来越多的关注。研究人员还透露, 在保温材料中也使用了多种农业废料——麻、稻草、椰子、木材和亚麻等材料非常受欢迎, 而剑麻、芦苇、草和菠萝等其他材料也很受欢迎。很少使用。

其他因素也列入考量, 例如抗压强度和吸水率, 但是没有高度强调 pH 值和放射性等特性。同样, 研究还表明, 在使用粘合剂制造不同材料进行粘合的情况下, 采取了不同的制造方法。在这类情况下, 采用了自然形式的农业废弃物, 例如稻草捆的包装和高压压制其他松散材料。

在另一项研究中, Benfratello 研究了仅使用大麻以及大麻和混凝土的混合物制成的隔热板的热质量, 重点是添加的纤维量和混合物的粒度。分析结果表明, 生物复合材料具有出色的绝缘性能和机械阻力。然而, 它比传统混凝土更轻, 并且只能以适当的方式用于需要较低负载的建筑物中, 例如现有建筑物顶部的绿色覆盖物。

### 四、建筑物加固材料

研究表明, 农业废弃物也被用于制造建筑物的加固材料。然而, 在检查它们的使用之前, 重要的是要强调上一节的发现, 这表明从农业废料开发的建筑材料的重量比较轻。例如, Taurino 等人透露, 可以通过整合粘土和来自葡萄酒和葡萄籽的农业废料来开发轻质砖。

Kimeng 等人还观察到, 使用花生壳代替骨料浇筑的混凝土板由于抗压强度较低, 不能用于重型结构应用。Belayachi 等人还报告说, 使用小麦和大麦秸秆纤维开发的建筑隔热复合材料在性质上也很轻。因此, 在研究基于农业废弃物的增强材料的应用时, 重点转移到研究证明如何在增强应用中利用各种类型的农业废弃物。另外, Pacheco-Torgal 和 Jalali 透露, 在水泥基材料中使用植物纤维作为增强材料可以提高水泥基材料的耐久性能和性能。

### 五、刨花板

刨花板或刨花板是通过压缩与合成树脂结合的木屑、锯末或刨花而开发的工程木制品。研究表明, 农业废料还用于制造刨花板, 以替代刨花和锯末等传统木材副产品, 从而提高整体产品质量。例如, Bhaduri 和 Mojumder 研究了在使用尿素甲醛 (UF) 制造中等密度刨花板 (60 cm × 60 cm × 1.3 cm) 中使用 Khimp 植物 (一种广泛生长在拉贾斯坦邦沙漠中的灌木) 的情况和酚醛 (PF) 树脂分别作为粘合剂。UF 和 PF 的浓度从 10% 到 20% 不等, 以评估粘合剂对刨花板物理和机械性能的影响。之后采用标准方法来评估板的物理性能、密度、水分含量、膨胀值、吸水率和机械特性, 例如拉伸和冲击强度、断裂模量和弯曲模量。所得结果表明, 使用 UF 和 PF 树脂开发的板材的物理和机械性能符合中密度通用刨花板的既定 BIS 规范。然而, 一个重要的发现是, 使用 PF 树脂开发的电路板表现出比 UF 电路板更好的物理和机械特性。该研究的经济意义在于, 木材可以被有效地替代为沙漠地区刨花板的原材料, 而不会对环境产生任何不利影响。然而, 这项研究是独一无二的, 因为它侧重于利用沙漠植物, 如 Khimp 灌木来制造建筑材料。

### 六、利用农业废弃物生产建筑材料的优势

在建筑材料制造中利用农业废弃物的优势可分为两大类。首先是再利用原本会被排放到环境中的废弃农业废料所带来的优势; 二是在建材实际开发中利用农用废料所产生的优势。

对于第一类, 一个显着优势源于这样一个事实, 即在制造过程中重复使用农业废弃物有助于解决传统处置方法 (如填埋、焚烧和堆肥) 带来的污染挑战。研究表明, 不同的农业过程会导致产生大量废物, 这给处置和适当管理带来了挑战。例如, 在印度, 仅农业产品就报告了超过 600 公吨 (MT) 的废物。因此, 废物材料的再利用意味着管理农业废物项目使用的资源更少, 因为需要处理的数量更少。第二个优势与环境直接相关, 因为农业废料被重新用作传统建筑材料 (如水泥或沙子骨料) 的替代品, 因此可利用较少的不可再生资源来促进生产过程。这间接保护了环境, 因为在生产建筑材料时消耗了更少的能源。

对于第二类, 评论论文还确定了几个优点。首先, 在砖或砖石构件的建造中, 农业废料的使用导致了符合既定建筑标准的优质轻质砖。Kazmi 等人表明, 利用稻壳灰 (RHA) 和甘蔗渣灰 (SBA) 生产粘土砖, 按粘土重量计 5% 的 RHA 和 SBA 可以使砖的断裂模量和抗压强度与巴基斯坦建筑保持一致代码和 ATSM 标准指南。

Taurino 等人还展示了通过将葡萄酒废料 (WWs) (如无酒、葡萄籽和秸秆) 与粘土相结合来制造轻质砖。不同的研究表明, 农业废弃物具有开发符合所需建筑标准的建筑材料的潜力。

### 结论

总之, 审查文件审查了农业废料在可持续建筑材料生产中的利用。对不同研究的综合回顾表明, 将甘蔗渣、稻壳和花生壳等农业过程中产生的天然有机废物整合到不同建筑材料的制造中, 提高了它们的整体物理力学和热学质量, 也提高了它们的可持续性 通过降低成本和促进环境保护。此外, 研究结果还表明, 使用以农业废弃物为基础的建筑材料还具有更高的耐久性优势。

### 参考文献:

- [1]Sathiparan, N.; De Zoysa, H. The effects of using agricultural waste as partial substitute for sand in cement blocks. *J. Build. Eng.* 2018, 19, 216 - 227.
- [2]Ashour, T.; Korjenic, A.; Korjenic, S.; Wu, W. Thermal conductivity of unfired earth bricks reinforced by agricultural wastes with cement and gypsum. *Energy Build.* 2015, 104, 139 - 146.
- [3]Chaussinand, A.; Scartezzini, J.; Nik, V. Straw bale: A Waste from Agriculture, a New Construction Material for Sustainable Buildings. *Energy Procedia* 2015, 78, 297 - 302.
- [4]Rahman, M.; Muntohar, A.; Pakrashi, V.; Nagaratnam, B.; Sujan, D. Self-compacting concrete from uncontrolled burning of rice husk and blended fine aggregate. *Mater. Des.* 2014, 55, 410 - 415.
- [5]Rahman, M.; Leblouba, M.; Pakrashi, V. Improvement of Engineering Properties of Peat with Palm Oil Clinker. *Pertanika J. Sci. Technol.* 2014, 22, 627 - 636.
- [6]Rahman, M.; Boon, A.; Muntohar, A.; Hashem Tanim, M.; Pakrashi, V. Performance of masonry blocks incorporating Palm Oil Fuel Ash. *J. Clean. Prod.* 2014, 78, 195 - 201.
- [7]Rahman, M.E.; Ong, P.J.; Nabinejad, O.; Islam, S.; Khandoker, N.A.N.; Pakrashi, V.; Shorowordi, K.M. Utilization of Blended Waste Materials in Bricks. *Technologies* 2018, 6, 20.
- [8]Ting, T.; Ting, M.; Rahman, M.; Pakrashi, V. Palm Oil Fuel Ash: Innovative Potential Applications as Sustainable Materials in Concrete. *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.* 2019.
- [9]Deraman, R.; Abdullah, A.; Shahidan, S.; Nagapan, S.; Hamzah, M. The Potential of Agricultural Waste as Pore Forming Agents in Production of Low Thermal Clay Brick. In *Sustainable Construction and Building Technology*; Abas, N., Abd Salam, N., Shahidan, S., Eds.; Penerbit UTHM: Parit Raja, Malaysia, 2017.
- [10]Mandal, A.; Verma, H.; Sinha, O. Utilization of aluminum plant ' s waste for production of insulation bricks. *J. Clean. Prod.* 2017, 162, 949 - 957.
- [11]Muñoz, P.; Mend í vil, M.; Letelier, V.; Morales, M. Thermal and mechanical properties of fired clay bricks made by using grapevine shoots as pore forming agent. Influence of particle size and percentage of replacement. *Constr. Build. Mater.* 2019, 224, 639 - 658.
- [12]Prusty, J.; Patro, S.; Basarkar, S. Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment—A review. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 2016, 5, 312 - 333.
- [13]Modani, P.; Vyawahare, M. Utilization of Bagasse Ash as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete. *Procedia Eng.* 2013, 51, 25 - 29.