

# 碱活化矿渣 (AAS) 混凝土的力学性能和耐久性能

奥萨马·阿里·穆罕默德, 凯鲁尔·沙阿

隶属机构: 阿布扎比工程学院

**摘要:** 碱活化矿渣 (AAS) 能够替代普通波特兰水泥 (OPC) 来作为钢筋混凝土结构的唯一粘合剂。据报道, OPC 占全球二氧化碳排放量的5%以上。此外, 炉渣是一种工业副产品, 如果不重新使用, 就必须填埋。因此, 许多研究人员将其作为 OPC 的环保替代品而进行了研究。除了回收利用之外, AAS 还为混凝土提供了有利的特性, 例如抗压强度的快速发展和对硫酸盐侵蚀的高抵抗力。AAS 的一些潜在缺点包括高收缩率、短凝固时间和高碳化率。使用磨碎的粒状高炉矿渣 (GGBS) 作为 OPC 的替代品, 需要用高碱度化合物如氢氧化钠 (NaOH)、硫酸钠 ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )、碳酸钠 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 或这些化合物的组合 (如 NaOH 和硫酸钠), 碱活化的机理尚不完全清楚, 有待进一步研究。本文概述了 AAS 混凝土的特性、优点和潜在缺点。

**关键词:** 碱活化渣; 碱性活化剂; 碱硅反应; 固化温度

## Mechanical Properties and Durability of Alkali-activated Slag (AAS) Concrete

Osama Ali Muhammad, Khairul Shah

Affiliation: College of Engineering, Abu Dhabi

**Abstract:** Alkali-activated slag (AAS) is a promising alternative to ordinary Portland cement (OPC) as sole binder for reinforced concrete structures. OPC is reportedly responsible for over 5% of the global  $\text{CO}_2$  emission. In addition, slag is an industrial by-product that must be land-filled if not re-used. Therefore, it has been studied by many investigators as environmentally friendly replacement of OPC. In addition to recycling, AAS offers favorable properties to concrete such as rapid development of compressive strength and high resistance to sulfate attack. Some of the potential shortcomings of AAS include high shrinkage, short setting time, and high rate of carbonation. Using ground granulated blast furnace slag (GGBS) as an alternative to OPC requires its activation with high alkalinity compounds such as sodium hydroxide (NaOH), sodium sulfate ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), or combination of these compounds such as NaOH and  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ . The mechanism of alkali-activation is still not fully understood and further research is required. This paper overviews the properties, advantages, and potential shortcomings of AAS concrete.

**Keywords:** Alkali activated slag; alkaline activator; alkali-silica reaction; curing temperature

### 引言:

几十年来, 人们已经研究了使用碱活化的高百分比氧化铝和二氧化硅 (硅铝酸盐) 为特征的替代工业副产品替代水泥, 但由于人们越来越关注生产水泥对环境造成的影响, 目前替代工业副产品正越来越受欢迎。作为普通波特兰水泥 (OPC) 的替代品最常用的原材料, 硅酸铝含有相对大量的氧化硅 ( $\text{SiO}_2$ ) 和氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )。尽管与 OPC 混凝土相比存在某些缺点, 例如高碳化和收缩率, 但 AAS 混凝土在耐久性和高早期强度发展方面为建筑行业提供了许多机会。特别是高早期强度的发展使

AAS 成为 OPC 用于深水油井固井的可行替代品。

与 OPC 相比, 无水 GGBS (磨碎的粒状高炉矿渣) 含有更多的  $\text{SiO}_2$  (GGBS 中的 30.04–35.04%, 而 OPC 中的 19.9–24.9%) 和更高量的  $\text{CaO}$  (GGBS 中的 33.7–43.84% 相比 62.1%); 与 OPC 相比, GGBS 中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  也更高 (GGBS 为 14.63–16.7%, OPC 为 4.95%)。与 GGBS 制造相关的水冷和造粒过程会产生玻璃状无定形材料, 如扫描电子显微镜 (SEM) 2 $\theta$  图像所示, 该图像显示 25° 和 35° 之间的驼峰。对从 X 射线衍射仪 (XRD) 获得的无水 GGBS 图像进行了同样的观察, 显示

出具有可忽略不计少量结晶材料的玻璃状材料。一般来说, GGBS 比 OPC 细得多(细度大于 350 m<sup>2</sup>/kg), 这增加了早期的反应性和强度发展。

其他流行的铝硅酸盐包括粉煤灰和偏高岭土。为了达到所需的机械性能, 与磨碎的粒状高炉矿渣(GGBS)相比, 作为活化剂的粉煤灰需要更高剂量的氧化钠和高温固化。在大多数情况下, 如果通过较高 pH 的碱性溶液活化, GGBS 可用作混凝土生产中的唯一粘合剂。与 OPC 混凝土相比, 碱活化矿渣(AAS)混凝土具有多种优势, 包括高强度和快速强度发展, 以及耐化学侵蚀。可以使用各种碱性化合物活化炉渣, 例如氢氧化钠(NaOH)、碳酸钠(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)、氢氧化钾(KOH)、硅酸钠或这些碱的组合。据报道, 与碳酸钠相比, 就强度发展而言, 硅酸钠是一种更有效的活化剂。

如果不加以解决 AAS 混凝土的快速凝固问题, 它将不适合用于施工用途。Li 等人进行的试验表明, 使用碳酸钠(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)代替部分硅酸钠(等量 Na<sub>2</sub>O 含量)延长了 AAS 混凝土的凝结时间, 但抗压强度的发展也减慢了。然而, 使用 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 活化矿渣的混凝土强度持续增加超过 28 天, 并且增长曲线的斜率也继续增加。

在开发 AAS 时, 将 GGBS 与其他胶凝材料结合以提高机械性能和耐久性通常是有利的。研究发现用硅灰部分替代 AAS 或 OPC 混凝土中的 GGBS 可提高抗压强度。然而, 硅灰是在埋弧电炉中由高纯度石英和煤制造硅和硅铁合金的一种相对昂贵的副产品, 逸出的气态 SiO 氧化并凝结为无定形二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)的极细球形颗粒。将其与 OPC 一起使用的动机是玻璃形式的二氧化硅(无定形)具有高反应性, 并且颗粒的小加速了与波特兰水泥水合产生的氢氧化钙的反应。非常小的硅灰颗粒可以进入水泥颗粒之间的空间, 从而改善填充。

### 一、AAS 的碱活化剂和水合产物

碱活化剂: 活化铝硅酸盐(GGBS 和飞灰)为最有效的材料, 包括碱金属氢氧化物 ROH、弱酸 R<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、R<sub>2</sub>S、RF 的非硅酸盐或 R<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub> 的硅盐, 其中 R 表示碱金属离子, 例如 Na、K, 或 Li。Jin 等人使用 MgO 来活化 GGBS 浆料, 并确定主要水合产物是 C-S-H 以及产生较少孔结构和较高抗压强度的类水滑石相。但是, 过量的水滑石会导致糊剂出现裂缝, 从而影响强度和耐久性。事实上, 文献中报道最多的碱性活化剂包括氢氧化钠(NaOH)、氢氧化钾(KOH)、碳酸钠(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)和水玻璃形式的硅酸钠(Na<sub>2</sub>O·nSiO<sub>2</sub>·mH<sub>2</sub>O)。这些碱性活化剂生产具有不同短期和长期性能的混凝土和浆料。Brough 和 Atkinson 报告说, 与使用硅酸钠活化的 AAS 混合物相比, KOH 产生更快的反应、更不均匀的微观结构和更低的强度。与水玻璃相比, KOH 在浇筑后 1 天内具

有较高的抗压强度, 但在 1 天后强度发展明显减慢。

一般来说, 碱性活化剂的高 pH 值会促进 GGBS 的溶解, 从而推动化学反应和强度发展。Wang 等人证明, 与使用氢氧化钠活化的矿渣制成的混凝土相比, 硅酸盐活化的矿渣产生的混凝土具有更好的机械性能和稳定性。事实上, Shi 等人证明, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 活化的 GGBS 产生的析出热随着水与粘合剂(w/b)比的降低而增加, 反之亦然, 这与 NaOH 活化渣不同, 其水化热响应于 w/b 比而产生类似于 OPC 糊剂。

碱活化渣的水化产物: AAS 水合产物在早期形成, 在一天内, 通过溶解和沉淀机制, 然后反应以固态机制进行, 但无论活化剂类型如何, 主要水合产物都是低 Ca/Si 的水合硅酸钙(C-S-H)比率。相比之下, OPC 的水化和针状 C-S-H 的产生较慢, 因此与 AAS 混凝土相比, 强度发展较慢。其他水合产物包括具有通式 [Ca<sub>2</sub>(Al, Fe)(OH)<sub>6</sub>]·xH<sub>2</sub>O 的水滑石和铝酸盐-铁氧体-单硫酸盐(A<sub>Fm</sub>)水合物相。例如, 水玻璃活化的 AAS 甚至在一年后仍会产生结晶度差的 C-S-H。我们回想一下, 在 OPC 混凝土中, C-S-H 大部分结晶性较差, 孔径分布可变, 但形态和化学成分与 AAS 生产的 C-S-H 不同。当使用 NaOH 碱性活化剂时, 即使在很早的年龄也形成半结晶 C-S-H, 但当使用水玻璃活化时, 即使在一年后, C-S-H 的结晶度也很低。Gifford 和 Gillott 认为, 与 OPC 水合产生的 C-S-H 相比, AAS 水合产生的 C-S-H 具有高结晶度和较低的碱度; 与 OPC 混凝土相比, 基于 AAS 的混凝土通常应该更耐用。这是因为与 AAS 水合相关的钠反应产物的溶解度低于与 OPC 水合相关的钙反应产物。然而, AAS 浆料孔隙溶液的高碱度特性使得使用 AAS 的混凝土容易发生碳化和碱-硅酸盐反应(ASR)。GGBS 活化产生的 C-S-H 是一种以高 Si 浓度为特征的箔状相, 在孔隙空间中生长。相反, 针状 C-S-H 的拓扑生长在 OPC 水合过程中占主导地位, 这发生在相对较低的硅酸盐浓度下。

### 二、碱活化矿渣混凝土和砂浆的力学性能

AAS 砂浆养护 28 天后的抗压强度随着 NaOH 碱溶液用量从 4% 增加到 8% 而增加。Aliabdo 等人的一项使用由氢氧化钠(NaOH)和硫酸钠(Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>)组合组成的碱性活化剂溶液的研究中证实了随着氢氧化钠溶液摩尔浓度的增加而增加抗压强度的相同观察结果。然而, 在较高剂量的碱性溶液中观察到 AAS 砂浆的抗压强度降低。对于相同的碱性活化剂溶液和用量, 抗压强度随固化温度的增加而增加。Nasr 等人指出, AAS 砂浆的抗压强度随着 Na<sub>2</sub>O 占 GGBS 重量的百分比增加到 8%, 但随后随着 Na<sub>2</sub>O 百分比增加到 10% 和 12% 而降低。在 25℃ 和 200℃ 温度下水热固化的 AAS 样品就是这种情况, 然后

在 400℃ 和 600℃ 的温度下进行水热固化时, Na<sub>2</sub>O 的最佳百分比变为 4%。水处理样品的最佳 Na<sub>2</sub>O 百分比变化。Bondar 等人对掺量为 4%、6% 和 8% 的 AAS 混凝土进行了测试, 并证实 Na<sub>2</sub>O 的掺量是实现所需和易性和抗压强度的关键参数, 此外硅酸盐模量和浆料含量也是其中重要的参数。

与 OPC 砂浆相比, AAS 砂浆从 7 天到 28 天的快速强度发展归因于未水合 GGBS 颗粒系统周围的非常薄的保护层。未水合 OPC 颗粒周围的这种层要厚得多, 导致 OPC 砂浆的强度发展较慢。Puertas 等人指出, 使用硅酸钠溶液(商业水玻璃)活化的 AAS 混凝土在固化 7 天和 28 天后, 与 OPC 混凝土以及与使用过的 NaOH 活化的混合物相比, 具有更高的抗压强度。

Manjunath 和 Narasimhan 研究了自密实混凝土(SCC)的抗拉强度和抗压强度, 其中 AAS 仅作为粘合剂, GGBS 作为细骨料和粗骨料。碱性活化剂溶液由氢氧化钠和水玻璃的组合组成, 其中 Na<sub>2</sub>O 值分别为炉渣重量的 7%、8% 和 9%。然而, 对于所有混合物, SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O 的比率保持恒定在 1.0。抗压强度是在 100 × 100 × 100 mm<sup>3</sup> 的立方体上测定的, 劈裂拉伸强度是通过测试直径 100 毫米、高 200 毫米的圆柱形样品来测量的。w/b 比范围为 0.33 至 0.37, 固化 28 天后立方体的相应抗压强度范围为 71.3 至 80.1 MPa。

### 三、流变、和易性、流动性和混合时间对 AAS 混凝土和砂浆力学性能的影响

Puertas 等人研究了 AAS 活化剂类型对混凝土混合物流变学的影响。他们检查了两种活化剂溶液, NaOH 溶液和硅酸钠溶液(水玻璃)。当使用的粘合剂是 OPC 或用 NaOH 活化的矿渣时, 混凝土的流变性会受到较长混合时间的不利影响。然而, 当粘合剂使用水玻璃(WG)进行炉渣活化时, 更长的混合时间会改善混凝土的流变性和力学性能。这与 Palacios 等人的发现一致。与使用 OPC 制备的对照混合物相比, 无论使用何种活化剂类型, AAS 混合物的坍落度都更大。抗压强度测试样品为 100 毫米立方体, 浇注 24 小时后脱模并固化 7 天和 28 天。

GGBS 的细度影响 AAS 砂浆的流速。细度越高, 流速越慢, 但 28 天抗压强度越高。与 GGBS 细度增加相关的抗压强度增强是因为孔隙率降低、表面密度增加和水合 GGBS 颗粒量增加。据报道, AAS 浆料的比表面积比 OPC 浆料高 25%。因此, 有必要在提高机械性能所需的更高细度的 GGBS 与建设项目的可加工性和流动性需求之间取得平衡。矿渣细度对提高抗压强度的影响不仅限于 100% 矿渣混凝土。Amin 等人证明, 当用于以 10% 至 30% 的百分比部分替代 OPC 时, 砂浆强度随着电弧渣(EAS)细度的增加而增加。

Na<sub>2</sub>O 的用量和活化剂模量(SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O)影响 AAS 混凝土的微观结构和力学性能。Al-Otaibi 指出, 当活化剂模量为 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O = 1.0 时, 增加 Na<sub>2</sub>O 的用量会降低孔隙率, 而在模量为 1.65 时, 增加 Na<sub>2</sub>O 的用量会增加孔隙率。Na<sub>2</sub>O 的用量和活化剂溶液的硅酸盐模量也会影响 AAS 的流动性。对于特定的硅酸盐模量, 氧化钠的用量越高, AAS 混合物的坍落度越高。这种坍落度的增加在硅酸盐模量高达 2.0 的情况下更为显着, 其中 8% 的氧化钠剂量与所有测试剂量相比和与等效对照 OPC 相比产生更高的坍落度。氧化钠的用量越高, AAS 的坍落度越高。

### 四、耐久性——碱-二氧化硅反应

在普通波特兰水泥(OPC)砂浆和混凝土中, 碱-二氧化硅反应(ASR)在有利的湿度条件下发生在反应性骨料和水泥中存在的碱(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O)、Ca(OH)<sub>2</sub> 之间。从长远来看, ASR 可能导致混凝土膨胀和混凝土开裂, 同时显着降低抗压强度。与 OPC 混凝土相比, AAS 混凝土中的高碱含量导致 ASR 导致更高的膨胀。

在实验研究中, 硼硅酸盐玻璃被用于部分或全部或替代沙子, 并评估 AAS 砂浆用于 ASR 的潜力。缺少这些因素之一会减少甚至可以抑制反应, 从而抑制扩张。OPC 中的当量碱金属通常低于 0.8%, 但 AAS 浆料中的当量碱金属可能超过 3%, 从而增加了潜在的 ASR 膨胀。在 OPC 中, ASR 的发生是由于孔溶液中存在的碱金属会与骨料中的活性二氧化硅发生反应。

为了在 OPC 糊剂中进行反应, 游离钙离子(Ca<sup>2+</sup>)的存在必须通过硅酸盐(Ca(OH)<sub>2</sub>)提供。因此, AAS 浆料中不含硅酸盐(Ca(OH)<sub>2</sub>)会降低 ASR 的可能性。然而, AAS 浆料中的高浓度碱仍然是一个问题, 因为它们仍然可以与聚集体中的活性二氧化硅发生反应。ASTM C1260-14 通常用于确定骨料的潜在碱反应性。该测试是通过将砂浆样品暴露在 NaOH 溶液中进行的, 因此, 水泥的碱含量不是确定骨料反应性的重要因素。

Fernandez-Jimenez 和 Puertas 使用 AAS 作为粘合剂研究了砂浆混合物中的碱-骨料反应, 并将结果与 OPC 样品进行了比较。用于制作样品的骨料含有 21% 的活性二氧化硅, 而使用用氢氧化钙 NaOH 溶液活化的炉渣制备混合物, 其中 Na<sub>2</sub>O 等于炉渣重量的 4%。活化剂溶液与渣的比率为 0.57。他们得出结论, ASR 膨胀发生在 AAS 样品中, 但与 OPC 砂浆样品相比, 膨胀速度较慢。作者观察到由于形成具有玫瑰花状形态的硅酸钠和硅酸钙水合物反应产物而导致样品膨胀。140 天后, 与浸入水中的 OPC 样品相比, 浸入水中的 AAS 砂浆样品显示出非常小的膨胀。Shi 等人研究了使用 4%、6% 和 8% wt Na<sub>2</sub>O(按矿渣质量)活化矿渣制备的砂浆的碱-二氧化硅反应(ASR)。通过将砂浆样品浸入 1 mol/L NaOH

溶液中进行加速 ASR 测试, 并测量砂浆样品的 ASR 膨胀长达 28 天。在添加 NaOH 溶液之前, 与波特兰水泥砂浆相比, AAS 砂浆中孔隙溶液的碱度更高。然而, 加入 NaOH 溶液 28 天后, 波特兰水泥砂浆中砂浆孔隙溶液的碱度高于 AAS 砂浆。因此, 与波特兰水泥砂浆相比, AAS 砂浆中的 ASR 膨胀较低。

#### 五、耐久性——硫酸盐、酸和氯化物侵蚀

在二元 OPC + GGBS 混凝土中, 抗氯化物渗透性随着 GGBS 含量的增加而增加。用 GGBS 代替 80% OPC 的混凝土在氯化物渗透测试中经历了非常低的通过电荷, 即使在固化一天之后也是如此。

Rostami 和 Behfarnia 指出, 当 AAS 混凝土混合物部分替换为 5%、10% 和 15% 的硅灰时, 对氯化物渗透的抵抗力会增加。用 15% 硅粉代替混凝土的 AAS 样品表现出最高的抗氯化物渗透性。同样, 随着硅灰替代炉渣的百分比从 5% 增加到 15%, AAS 混凝土样品的渗透性降低。AAS 混合物用氢氧化钠溶液和硅酸钠溶液的组合活化。氢氧化钠溶液与硅酸钠溶液的比例为 3 比 1, 总碱液与渣的比例为 0.45。

Komljenovic 等人得出结论, 与使用 OPC + 矿渣混合物粘合剂的混凝土相比, AAS 混凝土表现出更好的抗硫酸盐 (在 5% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液下) 侵蚀的能力。对硫酸盐的增强抵抗力归因于缺乏反应物, 如硅酸盐 (氢氧化钙), 以及铝主要存在于 C-A-S-H 和水滑石凝胶中的事实。同样, 与同等级的对照 OPC 样品相比, AAS 砂浆的强度更高, 并且在暴露于乙酸时表现出更高的强度。

#### 六、耐久性——冷冻和解冻

混凝土的循环冻融会导致严重的破坏, 尤其是在长时间暴露的情况下。结果表明, 在冻融 50 年后, 混凝土可能会损失高达 45% 的抗压强度。混凝土中相互连接的毛细孔是硬化水泥浆渗透性和抗冻融破坏能力降低的原因。Shahrajabian 和 Behfarnia 证明, 在 AAS 混凝土中添加 1% 到 3% 的纳米二氧化硅可以提高抗冻融损伤的能力。纳米二氧化硅还增加了抗压强度, 1% 的纳米二氧化硅用量提高较大, 3% 用量的提高较小。然而, Fu 等人对使用氢氧化钠和水玻璃组合活化的 AAS 混凝土进行了冻融试验, 得出的结论是 AAS 混凝土具有优异的抗冻融破坏性。

#### 结论

用磨碎的粒状高炉矿渣替代普通波特兰水泥在二氧化碳排放和工业生产能源方面具有显著的环境效益。关于碱矿渣混凝土和砂浆的强度和耐久性, 得出以下结论:

- 碱活化渣的主要水化产物是 C-S-H, 此外还有
- (1) 产生较少孔结构和较高抗压强度的类水滑石相, 和
- (2) 铝酸盐-铁氧体-单 (硫酸盐) (AFm) 水合物阶

段。碱性活化剂的高 pH 值促进 GGBS 的溶解, 从而驱动化学反应和强度发展。

- 使用碱活化炉渣制备的混凝土/砂浆的抗压强度随着碱活化剂溶液摩尔浓度的增加而增加。类似地, 抗压强度随着氧化钠 (Na<sub>2</sub>O) 含量占 GGBS 重量百分比的增加而增加, 直至达到取决于固化温度的最佳值, 然后随着 Na<sub>2</sub>O 百分比的进一步增加而降低。最常被研究的氧化钠含量包括 4%、6%、8%、10% 和 12%。

- Na<sub>2</sub>O 对抗压强度的影响还取决于活化剂溶液 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O 的硅酸盐模量。

- 用于碱矿渣混凝土/砂浆的 GGBS 细度越高, 28 天抗压强度越高。然而, 高细度会降低新拌混凝土的流动性。

- 与 OPC 混凝土相比, 碱活化矿渣混凝土通常表现出更好的抗氯化物渗透、硫酸盐侵蚀、冻融循环和碱-骨料反应的能力。

#### 参考文献:

- [1] Fernandez-Jimenez, A.; Puertas, F. The alkali-silica reaction in alkali-activated granulated slag mortars with reactive aggregate. *Cem. Concr. Res.* 2002, 32, 1019 - 1024.
- [2] Wang, P.M.; Liu, X.P. Effect of temperature on the hydration process and strength development in blends of Portland cement and activated coal gangue or fly ash. *J. Zhejiang Univ. Sci. A* 2011, 12, 162 - 170.
- [3] Collins, F.; Sanjayan, J.G. Effect of pore size distribution on drying shrinkage of alkali-activated slag concrete. *Cem. Concr. Res.* 2000, 30, 1401 - 1406.
- [4] Zhu, X.; Tang, D.; Yang, K.; Zhang, Z.; Li, Q.; Pan, Q.; Yang, C. Effect of Ca(OH)<sub>2</sub> on shrinkage characteristics and microstructures of alkali-activated slag concrete. *Constr. Build. Mater.* 2018, 17, 467 - 482.
- [5] Shimomura, T.; Maekawa, K. Analysis of the drying shrinkage behavior of concrete based on the micropore structure of concrete using a micromechanical model. *Mag. Concr. Res.* 1997, 49, 303 - 322.
- [6] Ye, H.; Radlinska, A. Shrinkage mechanisms of alkali-activated slag. *Cem. Concr. Res.* 2016, 88, 126 - 135.
- [7] Bilek, V.; Kalina, L.; Novotny, R.; Tkacz, J.; Parizek, L. Some Issues of Shrinkage-Reducing Admixtures Application in Alkali-Activated Slag Systems. *Materials* 2016, 9, 462.
- [8] Mohamed, O. Durability and Compressive Strength of High Cement Replacement Ratio Self-Consolidating Concrete. *Buildings* 2018, 8, 153.
- [9] Komljenovic, M.; Bascarevic, Z.; Marjanovic, N.; Nikolic, V. External sulfate attack on alkali-activated slag. *Constr. Build. Mater.* 2013, 49, 31 - 39.