



**Kolefnishlutlaus bygging  
við íslenskar aðstæður**

**TITILL SKÝRSLU**

Kolefnishlutlaus bygging við íslenskar aðstæður

**SKÝRSLUNÚMÉR / SÍÐUFJÖLDI**

1/36

**VERKHEITI**

Kolefnishlutlaus bygging

**VERKKAUPI**

Askur HMS

**VERKEFNISSTJÓRI**

Grænni byggð

**HÖFUNDAR**

Elín Þórólfsdóttir, Áróra Árnadóttir, Þórhildur Fjóla Kristjánsdóttir

**LYKILORD**

Kolefnishlutlaus bygging,  
kolefnisspor, sjálfbær  
bygging

**ÚTDRÁTTUR**

Markmið verkefnisins er að stuðla að uppbyggingu þekkingar um Kolefnishlutlausar byggingar á Íslenskum markaði.

**STAÐA SKÝRSLU**

- Drög
- Drög til yfirlstrar
- Lokið

**DREIFING**

- Opin
- Dreifing með leyfi verkkaupa
- Trúnaðarmál

# Efnisyfirlit

Formáli .....	5
Inngangur .....	6
Umhverfisáhrif bygginga .....	7
Lífsferilsgreiningar .....	8
Skilgreining á kolefnishlutlausri byggingu .....	9
Byggingarferli byggingar/lífsferilsstig bygginga .....	11
Hönnun .....	11
Framkvæmdir .....	11
Rekstur .....	12
Endurbætur .....	12
Byggingarefni .....	12
Hringrásarhagkerfið .....	13
Tæknikerfi.....	14
Ráðstafanir til orkunýtingar.....	14
Tækni fyrir endurnýjanlega orku.....	14
Möguleikar á hugsanlegum endurnýjanlegum orkugjafa.....	15
Byggingargeirinn er samtengdur öðrum iðnaði .....	15
Hindranir/Áskoranir .....	17
Efnahags- og Löggjafahindranir.....	17
Faglegar og Tæknilegar Hindranir .....	17
Félags-, Menningar-, og Markaðshindranir .....	17
Landfræðilegar hindranir .....	17
Aðferðir til að yfirstíga hindranir/áskoranir .....	18
Stjórnvöld og Reglugerðir .....	18
Efnahagsleg Ávöxtun og Fjármögnun.....	18
Þátttaka Hagsmunaaðila og Viðnám gegn Breytingum .....	18
Tækniþróun.....	19
Kolefnisjöfnun .....	20
Tvítalning og kolefnismæling .....	20
Jöfnunarvottorð.....	20
Tæknilegar ráðstafanir.....	20

Núverandi stefnur og reglugerðir .....	21
Alþjóðlegt sjónarhorn .....	21
World Green Building Councils.....	21
Algengar hindranir.....	22
Að sigrast á áskorunum og taka á móti tækifærum .....	22
Skilvirk samskipti og þátttaka hagsmunaaðila.....	22
Íslenskar aðstæður.....	23
Kolefnisstyrkur hita- og rafveitu.....	23
Byggingarmenning .....	23
Loftslag .....	23
Jarðhræringar.....	24
Auðlindir og markaðsaðstæður .....	24
Kolefnisjöfnun.....	24
Lokaorð .....	25
Heimildaskrá.....	26


## Formáli

Þessi skýrsla er unnin með styrk úr ASKI - mannvirkjarannsóknarsjóði HMS. Verkefnið sótti um 12 milljónir til að skilgreina kolefnishlutlausu byggingu í íslensku samhengi og þróa leiðbeiningar um hönnun og rekstur slíkra bygginga en hlaut 2 milljónir í styrk. Verkefnastjórnin ákvað því að einblína í þessum fyrsta hluta verkefnisins á stöðu vísindalegrar þekkingar á kolefnishlutlausum byggingum, en sótt hefur verið um framhaldsstyrk í að þróa leiðbeiningar um hvernig á að hanna og reka slíka byggingu við íslenskar aðstæður. Afurðir þessa verkefnis eru þrjár:

- 1) Meistararitgerð Elínar Þórolfsdóttur í Umhverfis- og auðlindafræði við Háskóla Íslands. Leiðbeinendur í verkefninu voru Dr. Jukka Heinonen, prófessor og Dr. Áróra Árnadóttir, aðjunkt. Meistararitgerðina má finna hér: <http://hdl.handle.net/1946/44382>
- 2) Ritrýnd vísindagrein sem unnin var upp úr meistararitgerðinni. Hana má finna hér: <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad0e80>
- 3) Þessi lokaskýrsla, sem er íslensk samantekt á meistararitgerð Elínar.

IOP Publishing *Environ. Res.: Infrastruct. Sustain.* 3 (2023) 042002 <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad0e80>

**ENVIRONMENTAL RESEARCH  
INFRASTRUCTURE AND SUSTAINABILITY**

 CrossMark

**TOPICAL REVIEW**

**Net zero emission buildings: a review of academic literature and national roadmaps**

**OPEN ACCESS**


**RECEIVED**  
2 August 2023



**REVISED**  
6 November 2023

**ACCEPTED FOR PUBLICATION**  
21 November 2023

**PUBLISHED**  
30 November 2023

Original content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 licence](#).  
Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.



**Elín Þórolfsdóttir, Áróra Árnadóttir  and Jukka Heinonen **  
Faculty of Civil and Environmental Engineering, School of Engineering and Natural Sciences, University of Iceland, 107 Reykjavík, Iceland  
\* Author to whom any correspondence should be addressed.  
E-mail: [heinonen@hi.is](mailto:heinonen@hi.is)

**Keywords:** NZEB, net zero emission building, net zero building, roadmap

**Abstract**  
Addressing the growing issue of climate change demands active measures. With its significant carbon footprint, the building industry needs to make immediate efforts contributing to achieving the Paris Agreement's objective of restricting global warming to 1.5 °C. This review focuses on net zero emission buildings (NZEBs) which are claimed to offer a viable option to significantly reduce greenhouse gas emissions from the built environment. The review covers both the recent academic literature on NZEBs, and the NZEB roadmaps from the member organizations of the World Green Building Council, focusing on those Green Building Councils actively working to implement

## Inngangur

Áhrif loftslagsbreytinga eru stöðugt að aukast og hafa alvarleg áhrif á núverandi samfélög víðsvegar um heim. Þess vegna er brýn þörf á að leggja áherslu á að minnka kolefnislosun af mannavöldum. Heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna um sjálfbæra þróun (SDG) leggja áherslu á þörfina fyrir að taka höndum saman um að takmarka hlýnun jarðar samkvæmt markmiðum Parísarsáttmálans við 1.5°C fyrir iðnaðarbyltingu (UNFCCC, 2022) (United Nations, n.d.).

Það er að verða algengara að byggja orkunýtnar og kolefnishlutlausar byggingar, þó aðallega í Norður-Ameríku og Evrópu. Þessi vöxtur er knúinn áfram af hertum reglugerðum um orkunýtni, framförum í tækni, rannsóknum og efnahagshorfum og almennt aukinni áherslu á orkunýtingu og samdrátt í losun (Ohene et al., 2022a; WGBC, n.d.)

Í samræmi við markmið Parísarsáttmálans miðar World Green Building Council (WorldGBC) að því að allar nýjar byggingar verði kolefnishlutlausar fyrir 2030 og allar byggingar kolefnishlutlausar fyrir 2050. Stefna WGBC leggur einnig áherslu á orkuöryggi, bætt lífskjör og hagkvæmar sjálfbærar byggingar (Ohene et al., 2022a; WGBC, n.d.)

Þessi skýrsla fer yfir stöðu þekkingar á kolefnishlutlausum byggingum í vísindasamfélaginu, en skoðar einnig útgáfur frá Green Building Councils víða um heim sem fjalla um þetta málefni. Uppbygging skýrslunnar er eftirfarandi:

- 1) Umhverfisáhrif bygginga og hvernig þau eru metin
- 2) Skilgreining á kolefnishlutlausri byggingu
- 3) Hvernig hægt sé að ná kolefnishlutleysi á mismunandi lífsferilsfösum og byggingarhlutum
- 4) Helstu áskoranir og hvernig hægt sé að yfirstíga þær
- 5) Stefnur og reglugerðir
- 6) Skýrslur frá Green Building Councils
- 7) Íslenskar aðstæður
- 8) Lokaorð

## Umhverfisáhrif bygginga

Byggingariðnaðurinn er ábyrgur fyrir meira en 40% af þeirri orku sem notuð er og 30% af losun gróðurhúsalofttegunda í heiminum. Það er því nauðsynlegt að byggingariðnaðurinn dragi úr kolefnislosun með því að hverfa frá hefðbundnum byggingaraðferðum (Marszal et al., 2011a). Það þarf að ýta af stað breytingum innan byggingargeirans og leggja áherslu á orkunýtnar byggingar með lágt kolefnisspor yfir allan líftímann (Urge-Vorsatz). Í Vegvísi að vistvænni mannvirkjagerð 2030, á vegum verkefnisins Byggjum Grænni Framtíð var gert mat á losun frá íslenskum byggingariðnaði í fyrsta hluta verkefnisins. Þar kom í ljós að losun frá Íslenskum byggingariðnaði er hátt í 360 þúsund tonn CO<sub>2</sub> ígilda, stærsti hluti losunarinnar er frá notkun byggingarefna, en einnig er töluverð losun frá orkunotkun á byggingar- og rekstrartíma íslenskra bygginga. Ísland þarf eins og aðrar þjóðir að standast alþjóðlegar skuldbindingar í loftslagsmálum með markvissum samdrætti í losun á næstu árum, og byggingariðnaðurinn er þar ekki undanskilinn. Markmið stjórnvalda eru að ná 55% samdrætti í losun frá notkun byggingarefna, a.m.k 7% í losun frá orkunotkun á rekstrartíma og 70% frá orkunotkun á byggingartíma fyrir 2030. Að skilgreina kolefnishlutlausu byggingu í íslensku samhengi er ein aðgerð í vegvísinum og þessi vinna er fyrsti hluti í þeirri vinnu.



## Lífsferilsgreiningar

Lífsferilsgreining (LCA) getur metið umhverfisáhrif byggingar á líftíma hennar, með hliðsjón af þáttum eins og hráefnisöflun, efnistöku, framleiðslu, flutningi, notkun, förgun og endurvinnsla (Hossaini o.fl., 2018; Ohene o.fl., 2022a). Hossaini o.fl. (2018) mæla með því að nota LCA, lífsferilsgreiningar, til að ná kolefnishlutlausum byggingum. Í samhengi við kolefnishlutlausar byggingar, beinast LCA rannsóknir oft að tveimur meginviðum: Life Cycle Energy Assessment (LCEA) og Life Cycle Carbon Emission Assessment (LCCEA). LCCEA skoðar kolefnislosun til að finna lausnir til að draga úr hlýnun jarðar, en LCEA þróar aðferðir til að draga úr (frum)orkunotkun í byggingum (Chau o.fl., 2015). Hins vegar hafa þessar matsaðferðir takmarkanir sem þarf að bregðast við til að auka nothæfi þeirra og þörf er á frekari rannsóknum til að vinna bug á þessum annmörkum og bæta mikilvægi þeirra. Að auki er hagnýt innleiðing þessara aðferðafræði í byggingariðnaði enn krefjandi vegna skorts á gildum gagnagrunnum og viðmiðum fyrir byggingarferli og efni. Frekara átak er nauðsynlegt til að bæta þessa gagnagrunna og nýta þessa aðferðafræði til fulls (Ohene o.fl., 2022b).

Mikilvægt er að gera sér grein fyrir því að mat á umhverfisáhrifum byggingar getur verið mjög mismunandi eftir hönnun hennar, varnarleysi fyrir staðbundnu loftslagi og jarðfræðilegum einkennum (Too o.fl. 2022). Með hliðsjón af margbreytileika bygginga verður að taka tillit til ýmissa þátta og sviðsmynda í öllum umhverfisgreiningum bygginga.

Mikilvægt er að safna og greina langtímaupplýsingar um losun bygginga vegna lengri líftíma þeirra (Ibn-Mohammed o.fl., 2013). Þess vegna er nauðsynlegt að framkvæma yfirgripsmikla lífsferilsgreiningu til að skilja og koma í veg fyrir tilviljanakenndar afleiðingar á kolefnislosun (Rabani et al., 2021).

Endurnýjun, þar sem lögð er áhersla á að bæta orkunýtni, t.d. með betri einangrun og gluggum á núverandi byggingum er nauðsynleg þar sem það dregur úr orkunotkun þeirra og umhverfisáhrifum. Til að ná kolefnishlutlausri byggingu geta aðferðir eins og endurbætur á orkunýtni (energy retrofits, decarbonizing the electrical grid), samdráttur í kolefnislosun rafmagnsnetsins og bætt orkuhegðun íbúa hjálpað til við að umbreyta íbúða- og atvinnuhúsnæðisgeiranum. Hins vegar þarf umgjörð og ramma til þess að styðja við ákvarðanatöku til að aðstoða byggingargeirann að taka skynsamlegar ákvarðanir um endurbætur (Hinnells, 2008; Rupalathna o.fl., 2017). Sements-, steinsteypu- og stálframleiðsla verður að vera með mun lægra kolefnisspor til þess að draga úr losun frá byggingarefnum. Að auki er mikilvægt að stuðla að sjálfbærum byggingarefnum og auka rannsóknir á lífsferilsgreiningum.



## Skilgreining á kolefnishlutlausri byggingu

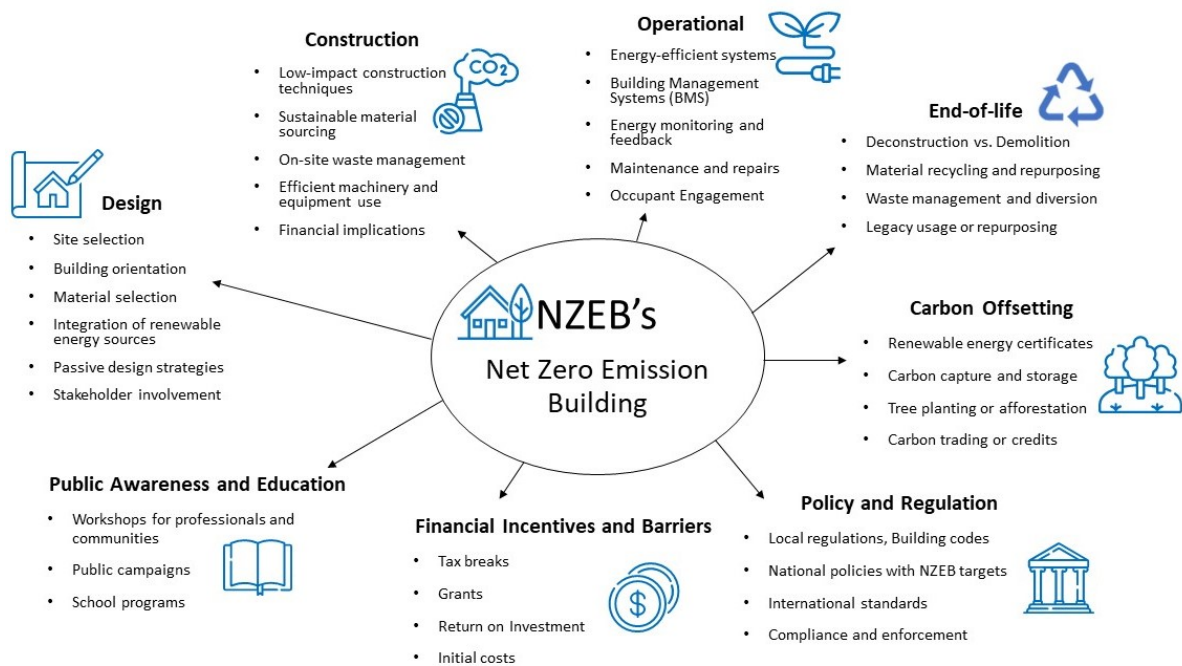
Til þess að ná markmiðum um kolefnishlutleysi bygginga (NZEBS) er mikilvægt að það sé sameiginlegur skilningur á því hvað einkennir slíkar byggingar og hvaða áskoranir geta komið upp þegar verið er að hanna og byggja slíkar byggingar.

Í dag er nokkuð um ósamræmi á skilgreiningum og heitum sem notuð eru yfir kolefnishlutlausar byggingar í stöðlum, fræðilegum heimildum og faglegu samhengi sem veldur skorti á skýrleika og getur hindrað árangursríkan samanburð. Það er þörf á að nota staðlaðar sameiginlegar skilgreiningar til að ná samræmdum niðurstöðum við mat á umhverfisáhrifum kolefnishlutlausra bygginga.

Sænska Green Building Council skilgreinir kolefnishlutlausar byggingu á eftirfarandi hátt:

*Kolefnishlutlaus bygging er bygging þar sem gerðar eru kröfur um að losun gróðurhúsalofttegunda byggingarinnar sé kortlögð og dregin saman þannig að losunin sé undir ákveðnum viðmiðunargildum fyrir öll lífsferilsskeið byggingarinnar. Lífsferillinn felur í sér framleiðslu og flutning á byggingarefnum, byggingarferlið, notkun og rekstrarstjórnun hússins ásamt förgun. Kolefnishlutlaus bygging gerir svo einnig kröfur um að eftirstandandi losun byggingarinnar séu kolefnisjöfnuð þannig að loftslagsáhrifin verði nettó núll. Þróunin í átt að kolefnishlutleysi er drifin áfram í tveimur meginleiðum: 1) að draga verulega úr losun gróðurhúsalofttegunda við framleiðslu byggingarefna og byggingarferla auk þess að lágmarka orkunotkun hússins (kortleggja eftirstandandi losun) og 2) að veita upp á móti eftirstöðvum loftslagsáhrifa með loftslagsaðgerðum þar til kolefnishlutleysi er náð (Swedish Green Building Council, n.d.).*

Markmið kolefnishlutlausra byggingar er m.a. að lágmarka orkunotkun og mæta eftirstandandi orkuþörf með skilvirkum, sjálfbærum og endurnýjanlegum orkugjafa (Steven Winter Associates, 2016) annaðhvort á staðnum eða utan hans (Laski & Burrows, 2017). Hugtakið "nettó" núlllosun gefur möguleika á að fjarlægja koltvísýring eða lausnir á "neikvæðri losun" til að veita upp á móti losuðum gróðurhúsalofttegundum, oft innan ákveðins tímaramma (Allwood et al., 2019).



Mynd 1 Skýringarmynd fyrir Kolefnishlutlausu byggingu

Mynd 1 eitt sýnir myndrænt heildræna nálgun að kolefnishlutlausri byggingu (NZEB). Í miðju skýringarmyndarinnar er Kolefnishlutlaus bygging sem táknar endanlegt markmið. Frá þessum kjarna eru helstu flokkarnir sem leggja áherslu á lykilaþanga og sjónarmið Kolefnishlutlausra bygginga: Hönnun, Framleiðsla, Rekstraraðferðir, Lífslok og Kolefnisjöfnun. Undir **Hönnun** koma fram þættir eins og orkusparandi skipulag, val á sjálfbærum efnum með tilliti til minna innbyggðs kolefnis, vottanir um ábyrgan uppruna, möguleikar á endurvinnslu eða endurnotkun, og samstarf við hagsmunaaðila. **Framkvæmdir** leggja áherslu á sjálfbærar byggingaraðferðir, sem metin er einnig fyrir kolefnisspor framleiðslu og flutnings, og lágmark losun úrgangs. Skilvirk notkun á vinnuvélum og búnaði við nám og vinnslu er lykilatriði til að draga úr innbyggðum áhrifum. **Rekstrar** þátturinn leggur áherslu á orkustjórnun, þátttöku notenda og reglulegt viðhald. **Lífslok** þátturinn er varðandi förgun bygginga, leggur áherslu á endurvinnslu og endurnýtingu efna og gera grein fyrir áhrifum þeirra á líftímanum, auðvelda endurvinnslu og draga úr þörf fyrir viðgerðir eða endurnýjun efna og draga úr úrgangi. **Kolefnisjöfnun** eru aðferðir til að vega upp á móti afgangslausn með verkefnum eins og skógrækt eða fjárfestingu í endurnýjanlegum orkuverkefnum. Starfshættir kolefnishlutlausar byggingar eru mótaðir af alhliða þáttum, þar á meðal **Stefnu og reglugerðum** og **Fjárhagslegum hvötum og hindrunum**. Staðbundnar og alþjóðlegar stefnur setja byggingarviðmið, á meðan fjárhagslegir hvatar og hindranir, eins og styrkir og stofnkostnaður, hafa áhrif á framkvæmanleika kolefnishlutlausra bygginga. Árangur kolefnishlutlausra bygginga byggist einnig á **Meðvitund almennings og fræðslu**, sem stuðlar að skilningi með herferðum og fræðsluáætlunum, sem stuðlar að samfélagslegri viðurkenningu á sjálfbærum byggingaraðferðum.

Það er brýn þörf fyrir alhliða, almennt staðlaða og viðurkennda skilgreiningu sem styður skilvirkari kolefnislausnaraðferðir. Samræming á kolefnishlutlausum byggingum meðal allra hagsmunaaðila er lykilatriði fyrir árangursríka lækkun kolefnis og raunverulega sjálfbærni. Til að meta betur og bera saman umhverfisáhrif þeirra ættum við að meta fjölbreytt

mannvirki á skilvirkari hátt og stuðla að samræmdum aðgerðum með nákvæmri og skýrri skilgreiningu.

## Byggingarferli byggingar/lífsferilsstig bygginga

### Hönnun

Skilvirk byggingarhönnun er sérstaklega mikilvægt til þess að draga verulega úr orkuþörf og felur í sér að huga að einangrandi þáttum eins og vali á uppbyggingu á gólfum, þökum, veggjum og gluggum (Shen et al., 2022) ásamt ytra byrði byggingarinnar (Arnold et al., 2016; Hacker et al., 2008; Khan et al., 2017; Sadineni et al., 2011).

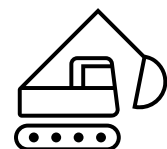


Passívar hönnunarlausnir eins og stefna, staðsetning, innra skipulag hlutfall glugga, þykkt og stærð glerja, nýting dagsbirtu og sólarskyggingar geta dregið verulega úr orkuþörf sem og stærð bygginga (Anand et al., 2017; Du et al., 2020; Rodrigues et al., 2014; Sadineni et al., 2011). Hönnun orku- og þjónustukerfa, svo sem byggingarstjórnunarkerfa, vélrænnar loftræstingar, orkukerfa og heit vatnsveita (Bajenaru o.fl., 2016; Grgić o.fl., 2022; Opher o.fl., 2021a), getur haft áhrif á orku frammistöðu (Wei & Skye, 2021). Eftir því sem byggingar verða orkunýtnari eykst oft aukin innbyggð losun sem stafar af fleiri byggingarefnum og tækniþróun (Röck et al., 2020). Einnig eykst oft aukin innbyggð losun eftir því sem byggingar verða orkunýtnari, sem stafar af meiri efnisnotkun til einangrunar og tækniþróunar (Röck et al., 2020).

Við hönnun kolefnishlutlausra bygginga ætti að hafa í huga hegðun notanda ásamt því að skoða orkunotkun og orkumyndun (Li et al., 2013; Pan et al., 2014). Þessar smærri aðgerðir sem hvetja til breyttrar hegðunar notanda geta krafist stuðnings á hærra stigi, eins og tækniþróunar varðandi grænni orku (Chen et al., 2014) sem hvetur til endurnýjanlegrar orkuframleiðslu á staðnum, rafrænnar endurgjafar, félagslega þátttöku og leikjavæðingar (Paone & Bacher, 2018).

### Framkvæmdir

Bygging kolefnishlutlausra byggingar krefst vandlegrar skipulagningar og framkvæmdar yfir allan byggingartímann. Til að hægt sé að stefna að því að ná kolefnishlutlausri byggingu er t.d. hægt að setja fram kröfur um efnis- og orkuframmistöðu í samningum og þá einnig við undirverktaka (Papachristos, 2020; Wang et al., 2019), velja reynda verktaka með kunnáttu á þeim úrræðum sem þarf til, velja réttu birgjana með vistvænar og staðbundnar vörur og hafa úrgangsstjórnunaráætlun sem miðar að því að draga úr, endurnýta og endurvinnna (Braulio-Gonzalo et al., 2022; Kabirifar et al., 2021; Kamali & Hewage, 2016; Yu et al., 2021). Á byggingarstigi geta aðferðirnar og vélarnar sem notaðar eru verulega stuðlað að því að lágmarka losun (Ding et al., 2020; Y. H. Dong et al., 2015; Y. H. Dong & Ng, 2015; Mao et al., 2013; Yan et al., 2010). Verktakar geta notað orkunýtin tæki sem ganga fyrir endurnýjanlegum orkugjöfum til að draga úr vatns- og orkunotkun á staðnum (Lawania & Biswas, 2018; Tian & Spatari, 2022; Wu et al., 2022).



Á meðan á byggingu stendur er vandað skipulag og framkvæmd nauðsynlegt, sem felur í sér að nýta vel auðlindirnar, reynda verktaka og úrgangsstjórnunaraðferðir til að lágmarka losun.

## Rekstur

Fyrir byggingarrekstur eru margar aðferðir til að spara orkunotkun til hitunar, kælingar og loftræstingar (Elnozahy et al., 2015; Gibbons & Javed, 2022; Khan et al., 2017; Vakalis et al., 2021), ásamt því að viðhald er mikilvægt fyrir orkuafköst, og til að lengja endingartíma (Cellura et al., 2014; Z. Dong et al., 2021; Grigoropoulos et al., 2016; Jiang et al., 2022).



Endurbætur á byggingunni, eins og t.d. á einangrun, með því að skipta úr einföldu gleri yfir í tvöfalt eða þrefalt gler, geta dregið verulega úr rekstrarorkunotkun (Belussi et al., 2019; Evola et al., 2014; Lin & Chen, 2022; Lizana et al., 2016).

Á rekstartíma bygginga er hægt að draga úr orkunotkun til upphitunar og kælingar með ýmsum aðgerðum, eins og til dæmis að þétta lista í kringum hurðir og glugga og bæta einangrun í þaki og með bættri sólskermun.

## Endurbætur

Þar sem núverandi byggingar eru stærsti hluti byggingarmagnsins er mikilvægt að lækka kolefnisspor þessara mannvirkja (Cornaro et al., 2016) og það getur jafnvel talist mikilvægara en að einblína á nýbyggingar (Urge-Vorsatz et al., 2020). Að auki geta endurbætur boðið upp á betri endingu, hagkvæmni, hagnýt gæði og betri félagsleg gildi en nýbyggingar (Poel et al., 2007). Við endurbætur á eldri byggingum getur orkunýtingin orðið sambærileg og í nýbyggingum (Urge-Vorsatz et al., 2020).



Endurbætur núverandi bygginga er mikilvæg til þess að draga úr kolefnislosun og vel endurbættar byggingar geta farið fram úr nýbyggingum hvað varðar orkunýtingu og líftíma.

## Byggingarefni

Byggingarefni sem framleidd eru með lága losun á gróðurhúsalofttegundum, eða lágt bundið kolefni, geta dregið verulega úr kolefnisspori byggingar (Hossaini et al., 2018). Þess vegna hafa þó nokkrar aðferðir varðandi byggingarefni verið rannsakaðar (Urge-Vorsatz et al., 2020) og þær fela m.a. í sér endurvinnslu, endurnýtingu, minnkun eða takmörkun byggingar- og niðurrifsúrgangs (Moncaster o.fl., 2019), betri efnisnýtingu (Allwood o.fl., 2011), betri og lengri endingu, lífræna valkosti eða aðrar efnislausnir með minni losun (D'Amico o.fl. al., 2021), og kolefnisfanga (Urge-Vorsatz o.fl., 2020). Þrátt fyrir að þessar aðferðir geti dregið úr losun byggingarefna er ekki hægt að koma alveg í veg fyrir losun frá þeim (Habert et al., 2020a). Eins og er, er þörf á sementi fyrir flestar steypur undirstöður, en framleiðsla sements veldur mikilli losun vegna orkunnar sem þarf til framleiðslu þess og þeirra efnaferla sem eiga sér stað (Miller et al., 2016; S. Miller & Myers, 2020; Monteiro et al., 2017). Framfarir hafa orðið í kolefnishlutlausri steinsteypu (Renforth, 2019a; Shi et al., 2019a), en þær eiga erfitt með að mæta þeirri eftirspurn sem er til framtíðar þéttbýlismyndunar (Hajer o.fl., 2018) á þeim hraða sem byggt er og vera innan þolmarka jarðar (Cao et al., 2020).



Til að draga úr útblæstri frá steinsteypu er hægt að minnka, hagræða steypublöndur og lækka magn sementsklínks (Habert et al., 2020b). Við framleiðslu á sementi getur skipting úr jarðefnaeldsneyti yfir í lífeldsneyti eða úrgangseldsneyti dregið úr losun, sem og notkun kolefnisförgunar og kolefnisgeymslu (Kajaste & Hurme, 2016; Lechtenböhmer et al., 2016).

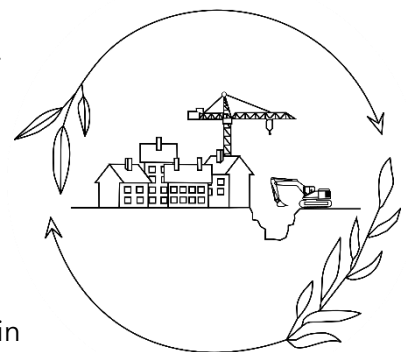
Að skipta úr nýju stáli yfir í brotastál (endurnýtt stál) við framleiðslu stáls getur dregið úr innbyggðri losun og aukið hringrás og efnisnýtni (Allwood et al., 2019; Energy Transitions Commission, 2018; Material Economics, 2019). Að auki getur notkun lífræns eldsneytis, biocoke eða viðarkola í stálverksmiðjum dregið úr losun (Suopajarvi et al., 2018). Fyrir frekari minnkun losunar þarf tækni eins og beina vetnisminnkun, háofna til endurvinnslu á toppgasi (top-gas recycling blast furnaces), rafvinnslu og aðrar bræðsluáðferðir (Wyns & Axelson, 2016). Með því að skipta út jarðefnaeldsneyti fyrir lífmassa í raforkuframleiðslu getur það dregið úr kolefnisstyrk raforkublöndunnar sem notuð er til að framleiða stál úr brotastáli (Gunarathne et al., 2016; Norgate et al., 2012).

Notkun lífrænna byggingarefna í mannvirki er raunhæf leið til að geyma kolefni og draga þannig úr losun frá byggingum og nýta þær sem kolefnisbindara (carbon sinks). Þessi efni vinna koltvíoxíð úr andrúmsloftinu á vaxtarstiginu, og hluti þess er síðan geymdur í plöntunni eftir uppskeru (Churkina et al., 2020; Pittau et al., 2018). Viður er frambærilegur valkostur í stað steinsteypu (Karlsson o.fl., 2021) en núverandi auðlindaframboð hindrar umfangsmikla upptöku (Pomponi et al., 2020), sem og hætta á minnkandi kolefnisbindingu í skógi (Ceccherini et al., 2020).

Nýlegar rannsóknir eru bjartsýnar á að hægt sé að skipta kolefnisfrekum byggingarefnum út fyrir lífræn efni eins og t.d. bambus og hálm (Pittau o.fl., 2018). Þar sem bambus vex hraðar en tré, getur það bæði verið skilvirkari kolefnisgeymsla en viður (Pittau o.fl., 2018) og betri valkostur til að draga úr eyðingu hitabeltisskóga í suðurhluta heimsin (Churkina et al., 2020; Nath et al., 2015). Hægt er að nota jurtarík lífræn einangrunarefni til að reisa loftslagshlutlausar byggingar sem uppfylla stranga orkunýtniáætla (Caercassi et al., 2022). Hægt er að nota jurtarík lífræn einangrunarefni til að reisa loftslagshlutlausar byggingar sem uppfylla stranga orkunýtniáætla (Caercassi et al., 2022).

## Hringrásarhagkerfið

Byggingar eru oft byggðar fyrir ákveðna virkni og þegar þær verða úreltar eru þær kjölfarið rifnar eða endurnýjaðar, í samræmi við línulegt hagkerfi (Huuhka og Lahdensivu, 2016; Ellen MacArthur Foundation, 2017). Slík framkvæmd leiðir til verulegrar sóunar og óhagkvæmrar efnisnotkunar (López Ruiz o.fl., 2020; Ellen MacArthur Foundation, 2017). Aðferðum hefur verið beitt til að draga úr umhverfisáhrifum á líftíma byggingar, við það er mikilvægt að huga að því að áhrifin séu ekki sú að verið sé einungis að færa á milli lífsferilsstiga (Lavagna o.fl., 2018; Pomponi og Moncaster, 2017).



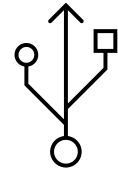
Með því að halda auðlindum í notkun og hverfa frá línulega hagkerfinu „taka-nota-farga“ stuðlar hringrásarhagkerfið að sjálfbærum vexti (Eberhardt o.fl., 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2013). Samkvæmt Ellen MacArthur Foundation (2017) og Joensuu o.fl. (2020), getur innleiðing hringrásar hagkerfisins í byggðu umhverfi lágmarkað sóun, dregið úr þörfinni fyrir ný efni og veitt sjálfbærari nálgun. Hins vegar er ekki sérstök samræming um mat á hringrásar aðferðum í byggingum, sérstaklega ekki varðandi kolefnis- og orkunotkun (Eberhardt o.fl., 2020; Gulck o.fl., 2022).

Þó að tekið sé á úrgangsmálum og endurnotkun með hringrásar hagkerfinu eins og t.d. með sveigjanlegri hönnun, eru umhverfisáhrif þeirra ekki alltaf mæld. Núverandi rannsóknir

virðast setja kolefni og orku í meiri forgang en horfa fram hjá kostum Hringrásarhagkerfisins varðandi endurnýtingu efna (Roberts o.fl., 2023).

## Tækni kerfi

Kolefnishlutlausar byggingar nota hagkvæma tækni til að draga úr losun og bjóða upp á fjárhagslegan ávinning allan líftíma þeirra, með því að nýta byggingarefni með lágt kolefni, orkunýtnar aðferðir og endurnýjanlega orkugjafa. Þar af leiðandi hafa nokkur lönd og stofnanir, þar á meðal Bandaríkin og ESB, sett sér markmið og innleitt stefnu að kolefnishlutlausum byggingum (Ohene o.fl., 2022b). Orkunýting og rafvæðing hafa verið skilgreind af Alþjóðaorkumálastofnuninni (IEA) sem þættirnir sem gætu skýrt 70% af losunarsamdrætti í umskiptum byggingargeirans yfir í núllorku (NZE) fyrir árið 2050, en eftirstöðvar minnkunar koma frá líforku (bioenergy), sólarhita og hegðunarbreytingum (IEA, 2021).



## Ráðstafanir til orkunýtingar

Ráðstafanir til að bæta orkunýtni og framleiðsla á endurnýjanlegri orku eru aðaláherslur rannsókna varðandi kolefnishlutlausar byggingar (Ohene et al., 2022b). Til að draga úr orkunotkun og aftur á móti auka orkuhagkvæmni hefur nokkrum aðferðum verið beitt, svo sem varmaendurvinnsla lofthita, aukinn loftþéttleiki, bætt einangrunarkerfi og vel einangraðir gluggar (Alirezai et al., 2016; Ohene et al., 2022b), hagræðing byggingarhönnunar með lögum og stefnu, auk þess að nota náttúrulega loftræstingu og dagsljósakerfi (Hughes et al., 2011).

## Tækni fyrir endurnýjanlega orku

Sjálfbærir endurnýjanlegir orkugjafar bjóða upp á raunhæfan valkost samanborið við hefðbundna orkugjafa eins og kol og jarðgas. Þar af leiðandi hafa fjölmargar rannsóknir beinst að því að nýta endurnýjanlega orkutækni til að mæta orkuþörf kolefnishlutlausra bygginga. Hægt er að flokka þessa tækni í tvær megingerðir: kerfi sem veita kælingu, upphitun og heitt vatn (t.d. sólarvarmakerfi, loftvarmadælur og jarðvarmadælur) og tækni sem framleiðir rafmagn (t.d., sólarorkukerfi (PV) og vindorku) (Ohene o.fl., 2022b).

Sólarraforkukerfi (PV) eru notuð til að virkja sólarorku og breyta henni í rafmagn og eru algengustu raforkugjafarnir í kolefnishlutlausum byggingum. Hægt er að festa þessi kerfi eða útbúa sérstakan búnað til að fylgja eftir hreyfingu sólarinnar. Sólarraforkukerfi eru venjulega sett upp á húsþökum eða sem ytri klæðning á veggjum og geta framleitt stöðuga raforku á svæðum þar sem sólarorka er aðgengileg allt árið (Hossaini o.fl., 2018).

Sólarorkukerfi eru algengustu endurnýjanlegu orkugjafakerfin sem eru notuð í þéttbýli og miðað við aðstæður markaðsins, eru þessi kerfi framkvæmanlegust (Panagiotidou o.fl., 2021). Hins vegar er uppsetning þeirra í fjölbýlishúsum oft takmörkuð vegna takmarkaðs rýmis, en kerfin þurfa nokkuð umfangs mikið flatarmál og svo getur einnig verið mikið um skyggð svæði sem ekki er hagkvæmt að nýta.

Varmadælur, sérstaklega loftvarmadælur (ASHP) og jarðvarmadælur (GSHPs) eru skilgreindar árangursríkar til að draga úr orkunotkun og losun gróðurhúsalofttegunda (D'Agostino o.fl., 2020). Varmadælur nýta raforku á afar skilvirkan hátt til upphitunar og kælingar. Sólarljósa- og vindorkutækni hefur einnig vakið verulega athygli, sem hefur leitt til víðtækrar notkunar og kostnaðarlækkunar (Jäger-Waldau, 2018).

Varðandi nýtingu vindorkukerfa eru staðsetning hússins og meðalvindhraði yfir árið tveir mikilvægustu þættirnir varðandi hagkvæmni framleiðslunnar (Hossaini o.fl., 2018).

### Möguleikar á hugsanlegum endurnýjanlegum orkugjafa

Satola o.fl. (2021) kannaði fjóra valkosti fyrir endurnýjanlega orkuöflun í byggingum; 1.Sólarraforkukerfi (Photo voltaic panelar(PV)) og sólarvarmakerfi á húspökum eða framhliðum. 2.Endurnýjanleg orkutækni á staðnum eins og PV kerfi á jörðu niðri eða bílastæðum, heitavatnskerfi með sólarorku og vindmyllur. 3. Aðfluttir endurnýjanlegir orkugjafar, aðallega lífmassi, og 4. nýtingar endurnýjanlegra orkugjafa sem hægt er að nálgast utan staðarins til að framleiða orku á staðnum. Valkostir 1) og 2) bjóða upp á möguleika á að flytja út umframorku sem framleidd er á byggingunni (Satola o.fl., 2021).

Önnur nálgun við endurnýjanlega orku er að kaupa endurnýjanlega orku frá framleiðslustað utan byggingarsvæðis. Þó að oft sé litið á það sem hagkvæma og einfalda aðferð til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda sem tengist byggingu, eru áhyggjur vegna skorts á viðleitni til að lágmarka umhverfisáhrif og orkunotkun í byggingum þegar þessi leið er valin. Þess vegna benda fyrri rannsóknir á, að miða við meðaltal frumorku og losunarhluta aðkeyptrar endurnýjanlegrar orku, að teknu tilliti til sérstakra aðstæðna landsins, sem leið til að lágmarka umhverfisáhrif og orkunotkun í byggingum (Satola o.fl., 2021).

### Byggingargeirinn er samtengdur öðrum iðnaði

Samkvæmt meginreglunni um orkunýtni ætti fyrst að draga úr orkunotkun almennt áður en kostnaðarsamari og fullkomnari tækni til orkunýtni er tekin upp (Filippidou & Navarro, 2019).

Til að ná fram umtalsverðum samdrætti kolefnis í byggðu umhverfi verða aðgerðir til að draga úr kolefnislosun að ná út fyrir byggingariðnaðinn og til annarra geira, svo sem stóriðju (Mata o.fl., 2020a). Val á samsetningu rafmagns, hita og kælingar eldsneytis skiptir sköpum fyrir samdrátt í losun kolefnis byggingaiðnaðarins innan EU (Filippidou & Navarro, 2019). Skandinavía notar almennt rafmagn til upphitunar (beint og með varmadælum), hitaveitu og jarðvarmadælur (Ground source heat pumps) (Reda & Fatima, 2019). Sveigjanlegir orkukostir eru nauðsynlegir til að draga úr álagi á raforkukerfið (Mata o.fl., 2020b; Seljom o.fl., 2017).

Reda og Fatima (2019) komust að því að innleiðing á sólarorkutækni á staðnum og innleiðing á bættri orkunýtni í byggingarreglugerðum væru raunhæfar aðferðir til að framkvæma nZEB í Norður-Evrópu. Í Kína er leiðandi tækni meðal annars varmaendurheimtunarkerfi, einangrun byggingarhjúps og nýting endurnýjanlegra orkugjafa (Z. Liu o.fl., 2019). Við hönnun tæknilausna, er mikilvægt að huga að því hvernig loftslag og umhverfi geta haft áhrif á innleiðingu og notkun tækni. Það þarf að taka tillit til hvernig breytingar í umhverfinu geta haft áhrif á hvernig fólk tekur upp og notar nýja tækni. Því er nauðsynlegt að vera viðbúin að aðlagast þessum áhrifum við hönnun og innleiðingu á nýjum tæknilausnum (Mata o.fl., 2020a). Ennfremur gegna framfarir í framleiðslu efna stóru hlutverki við að draga úr loftslagsbreytingum (Peñaloza o.fl., 2018).

### Byggingarstjórnun

Snjalltækni og gervigreind geta gegnt mikilvægu hlutverki við að aðstoða að ná kolefnishlutlausum byggingum með því að bæta orkunýtingu, efla greiningu og stjórna orkuframleiðslu og orkunotkun á skynsamlegan hátt. Tæknin getur stuðlað að heildrænni

nálgun með því að tengja ýmsa byggingarhluta í samræmt kerfi sem stjórnar orkupörf og veitir notendum eða viðhaldsteymum innsýn.

Internet of Things (IoT) gerir kleift að tengja þætti sem hafa áhrif á orkupörf í byggingum, svo sem lýsingu, upphitun og loftgæði. Það aðstoðar við að stjórna orkupörf á viðeigandi hátt, svo sem að slökkva ljós eða stilla hita þegar enginn er viðstaddur.

Notkun gervigreindar og vélanáms (Machine Learning) í orkustjórnun getur aðstoðað við rekstur byggingar og orkuhagræðingu. Þetta getur falið í sér hagræðingu endurnýjanlegra orkugjafa og upphitunar-, loftræstingar- og loftræstikerfa (HVAC) (Lee o.fl., 2022; Yang o.fl., 2020).

Byggingarupplýsingalíkan (BIM) og Digital Twins (DT) hjálpa til við að veita innsýn í það hvernig orka er notuð í byggingu og hvernig hægt er að bæta orkunýtinguna. Þau aðstoða við það að geta sett hagnýt markmið og meta árangur á áhrifaríkan hátt (Aljundi o.fl., 2016; Shen o.fl., 2022).

Mikilvægt er þó að hafa í huga að snjalltækja notkun hefur í för með sér aukna notkun efna, og oft sjaldgæfra efna sem eru orkukrefjandi í framleiðslu. Þó nokkuð af skynjurum og snjalltækjum sem notuð eru í byggingar hafa skamman líftíma. Hafa ber í huga að einfalda kerfin eins og hægt er og að nýta snjalltækni með langan endingatíma og að hugað að því að lágmarka umhverfisáhrif yfir líftímann.





## Hindranir/Áskoranir

Framkvæmd kolefnishlutlausra bygginga krefst heildrænnar nálgunnar til að yfirstíga ýmsar hindranir, sem ná yfir efnahagslega, markaðslega, lagalega, faglega, tæknilega, félags- og menningarlega og landfræðilega þætti. Skilningur á þessum áskorunum og hvernig skal glíma við þær með áhrifaríkum hætti er lykilatriði til að stuðla að víðtæku samþykki og innleiðingu innan byggingageirans og samfélagsins í heild (Ohene o.fl., 2022a).

### Efnahags- og Löggjafahindranir

Mikilvæg áskorun snýst um efnahagslega hagkvæmni kolefnishlutlausra bygginga, sérstaklega varðandi tiltölulega hærri upphafskostnað miðað við hefðbundin byggingarmannvirki, og umtalsverðar fjárfestingar í nýjungum. Ómissandi þáttur þess að yfirstíga þessa hindrun felst í því að framkvæma nákvæma kostnaðargreiningu sem felur í sér bæði stofnfjárútgjöld og væntanleg rekstrarútgjöld (Catto, 2008; Mata o.fl., 2021; Pan & Pan, 2021; Sesana & Salvalai, 2013). Mótun skilvirkra stefnu og byggingarreglugerða tekur mið af því að hvetja markaðseftirspurn eftir kolefnishlutlausum byggingum. Mikilvægir þættir í þessari viðleitni fela í sér að hagræða orkustjórnun, efla orkunýtnistaðla og veita stjórnvöldum stuðning til að flýta fyrir innleiðingu kolefnishlutlausra bygginga (Ozorhon, 2013; Heffernan o.fl., 2015; Pan & Pan, 2021).

### Faglegar og Tæknilegar Hindranir

Áskoranir eru miklar hvað varðar faglega hæfni innan byggingariðnaðarins og þörfina fyrir samstillt samstarf hagsmunaaðila sem krefst sterkrar verkefnastjórnunar (Stevenson & Kwok, 2020; Ohene o.fl., 2022b). Þrátt fyrir að kostnaður við ýmsa tækni til að bæta ytra byrði bygginga, hita-/kælikerfi og orkuöflun hafi minnkað á undanförunum árum (Jäger-Waldau, 2018), er það enn áskorun að samþætta þær kolefnishlutlausum byggingum (Makvandia et al. al., 2021).

### Félags-, Menningar-, og Markaðshindranir

Skortur á almennri vitund og mótstöðu gegn breytingum eru miklar hindranir við innleiðingu kolefnishlutlausra bygginga. Það krefst alhliða fræðslu- og samskiptaviðleitni að komast nærri því að leysa þessi mál (Godin o.fl., 2021; Heffernan o.fl., 2015; Jones, 2017). Markaðurinn hefur mikil áhrif á innleiðingu kolefnishlutlausra bygginga, en hann einkennist af skorti á eftirspurn og árangurslausum markaðsaðferðum, sem stuðlar að hækkandi markaðsverði kolefnishlutlausra bygginga (Heffernan o.fl., 2015; Persson & Grönkvist, 2015; Zhang & Zhou, 2015).

### Landfræðilegar hindranir

Að reisa kolefnishlutlaus mannvirki felur í sér áskoranir vegna landfræðilegra takmarkana, sérstaklega í þéttbýlum háhýsum borgum með takmarkað tiltækt pláss (Pan & Pan, 2019), ásamt því að staðsetning og loftslag getur haft áhrif á hagkvæmni. Það getur reynst flókið verkefni að endurnýta gamlar byggingar til að ná fram kolefnishlutleysi (Attia o.fl., 2017; G. Liu o.fl., 2020; Pan & Pan, 2021) og landfræðilegar hindranir eru meðal annars takmarkanir á notkun endurnýjanlegrar orku eins og t.d. sólar-, jarðvarma- eða vindorku, og hindranir fyrir innlendri orkuframleiðslu (Ohene o.fl., 2022a).

## Aðferðir til að yfirstíga hindranir/áskoranir

Áskoranir í innleiðingu kolefnishlutlausra bygginga eru margþættar og krefjast samhæðrar nálgunar sem nær til stjórnvalda, fjármögnunaraðila og hagsmunaaðila þátttöku og tækniþróunar.

### Stjórnvöld og Reglugerðir

Skilvirk stefna stjórnvalda, sem nær yfir byggingarreglur og orkunýtnistaðla, skipta miklu máli. Ríkisstjórnir ættu að samræma byggingarmarkmið við landsákvörðuð framlög, efla staðlastofnanir og styrkja eftirlitsstofnanir til að stuðla að lágmarkskröfum um orkuafköst. Enn fremur ættu stefna byggingarreglugerða að vera samþættar innlendum loftslagsstefnum (Bui o.fl., 2021; Heffernan o.fl., 2015; Ohene o.fl., 2022b).

Stjórnvöld gegna lykilhlutverki í að knýja fram sjálfbært húsnæði með því að þróa og setja staðla, leiðbeiningar og stefnur (Bui o.fl., 2021). Hins vegar skortir oft virkan stuðning stjórnvalda og samvinnu við hagsmunaaðila. En til að efla sjálfbæra byggingarhætti er samvinna ómissandi (Laski & Burrows, 2017). Fljótleg og skilvirk innleiðing vel úthugsaðrar áætlunar um alla aðfangakeðjuna er nauðsynleg til að styðja við markmið um sjálfbærar byggingar (Osmani & O'Reilly, 2009). Ríkisstjórnir geta hvatt iðnaðinn með því að setja fordæmi og hvetja til kolefnishlutlausra bygginga með hertu regluverki, fjárhagslegum hvötum, orkunýtingarvottorðum, grænum leigusamningum og fjármögnun grænna skuldabréfa (Bui o.fl., 2021).

### Efnahagsleg Ávöxtun og Fjármögnun

Upplýsingar um arðsemi fjárfestinga og aðgengi að fjármagni eru forsendur markaðsins fyrir kolefnishlutlausar byggingar. Þjóða þarf upp á nákvæmar kostnaðarleiðbeiningar í samræmi við reglugerðir og skapa fjárhagslega hvata eins og skattaívilnanir og græna fjármögnun til að brúa bilið á milli núverandi markaðsverðs og þess sem er hagstætt fyrir kolefnishlutlausar byggingar. Enn fremur, þegar kostnaður við kolefnishlutlausar byggingar er reiknaður út, er mikilvægt að taka með magngreiningu umhverfisáhrifa til að hvetja notendur til að fjárfesta í því að draga úr kolefnisspori bygginga (Ohene o.fl., 2022a). Ríkisstjórnir, í tengslum við húsnæðisfjármögnunaraðila, geta gegnt lykilhlutverki í að auðvelda fjármögnun með skilvirkri úthlutun fjármuna til byggingar með litla kolefnislosun (Ohene o.fl., 2022a; Likhacheva Sokolowski, 2019), og stefnurammi til stuðnings fyrir fjárfestingar og fjármál er mikilvægur til að takast á við þessar áskoranir (Global Alliance for Buildings and Construction, n.d.).

### Þátttaka Hagsmunaaðila og Viðnám gegn Breytingum

Það krefst víðtækrar kynningar og þátttöku allra hagsmunaaðila, sérstaklega á hönnunarstiginu að byggja og reka kolefnishlutlausar byggingar (Moore, 2020; Van Der Schoor & Scholtens, 2015). Samstarf innan iðnaðarins og samfélagsins getur á áhrifaríkan hátt tekið á menningar- og þekkingarhindrunum (Pan & Pan, 2021). Viðnám gegn breytingum krefst upplýsingamiðlunar og aðlögunar skipulagsramma sem undirstrikar ávinning kolefnishlutlausra bygginga (Ohene o.fl., 2022a).

Skipulag og ferla ætti að laga til að styðja við kolefnishlutlausar byggingar, stuðla að gagnsæi gagna og fræða eigendur og íbúa fasteigna um hegðunarbreytingar sem geta leitt til orkusparnaðar. Að leggja áherslu á orkusparnað og heilsufarskosti sjálfbærra bygginga er lykilatriði til að efla samfélagslega viðurkenningu.

## Tækniþróun

Þróun og innleiðing tækninýjunga, einkum í landfræðilega krefjandi aðstæðum, er mikilvæg fyrir kolefnishlutlausar byggingar. Þjálfun og styrkir frá stjórnvöldum til að styðja við þessar nýjungar geta skipt sköpum fyrir framgang þeirra í byggingariðnaðinum (Ohene o.fl., 2022b).

Það þarf að takast á við margþættar hindranir til að auðvelda framkvæmd kolefnishlutlausra bygginga á sama tíma og stuðla að viðtækri viðurkenningu þeirra og samþættingu innan byggingariðnaðarins og samfélagsins í heild.



## Kolefnisjöfnun

Þótt áætlanir um kolefnisjöfnun séu taldar veita hagkvæma og umhverfislega sjálfbæra leið til að ná kolefnishlutleysi (Shea o.fl., 2020), hefur umhverfisáætlun Sameinuðu þjóðanna vakið áhyggjur af hugsanlegri misnotkun á kolefnisjöfnun sem leiðir til aðgerðaleysis (UNEP, 2019), að kolefnisjöfnun gæti aðeins skapað blekkingu um lausn, vegna skorts á raunverulegum losunarsamdrætti (Kumar o.fl., 2020). Ef útblásturinn færir einungis til annarra svæða, þá er ekki verið að leysa grundvallarvandamálið með losun. Þetta er ástæða til að vera varkár í umgangi við hugtakið kolefnisjöfnun (Turner o.fl., nd). Til að takast á við málið á áhrifaríkan hátt eru lagarammar og ákvarðanastuðningskerfi nauðsynleg til að meta raunverulegan kostnað við losun nákvæmlega (Too o.fl., 2022).

## Tvítalning og kolefnismæling

Endurnýjanlegir orkugjafar stuðla að samdrætti í kolefnislosun, en kolefnismæling getur verið áskorun. Tvítalning getur átt sér stað þegar umfram endurnýjanleg orka sem framleidd er á lóðinni er seld til aðliggjandi húsa. Leiðbeiningar frá Umhverfisverndarstofnun Bandaríkjanna (2018) mæla með því að öðlast endurnýjanlega orkuvottorð (RECs) til að forðast tvítalningu og tryggja nákvæmar umhverfiskröfur (Satola o.fl., 2021).

Mæling á rekstrarkolefni er tiltölulega einföld í samanburði við mælingar á innbyggðu kolefni (Dixit, 2017), en því er oft gleymt í kolefnisbókhaldi vegna skorts á löggjöf í mörgum löndum (Langston & Langston, 2008). Þó að mæling á rekstrarkolefni sé tiltölulega einfalt er mæling á innbyggðu kolefni flókin vegna skorts á stöðluðum aðferðum og landsviðurkenndum gagnagrunnum fyrir byggingarefni (Dixit, 2017; Giordano o.fl., 2015).

## Jöfnunarvottorð

Kolefnisjöfnunarverkefni, kynnt með Kyoto-bókuninni, bjóða upp á ramma til að leggja mat á og meta kolefnisjöfnunarverkefni sem hægt er að markaðssetja (CDM). Þessi verkefni styðja viðleitni til að draga úr losun í þróunarlöndunum en hafa vakið áhyggjur varðandi skilvirkni þeirra og áreiðanleika mótvægisefninga til bóta (Gillenwater o.fl., 2007).

## Tæknilegar ráðstafanir

Jöfnunaraðferðir sem fela í sér tækni eins og skógrækt, líforku með kolefnistöku og geymslu, eða beina lofttöku og kolefnisgeymslu (Minx o.fl., 2018), geta stuðlað að alþjóðlegu markmiði um að ná hreinni núlllosun og gerir kolefnishlutlausum byggingum kleift að losa gróðurhúsalofttegundir. Hins vegar eru áhyggjur varðandi langtíma sjálfbærni þessara aðferða (Satola o.fl., 2021).

## Núverandi stefnur og reglugerðir

Skilvirk stefna, lög og ferlar eru nauðsynlegir til að ná kolefnishlutlausum byggingum fyrir árið 2050 (Ohene et al., 2022a). Stefnumótendur og hagsmunaaðilar þurfa að fylgja á eftir og viðurkenna byggingar sem lykil lyftistöng til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda (Carcassi et al., 2022). Það er þörf á yfirgripsmikilli endurskoðun á markmiðum og vegvísium til að bera kennsl á árangursríkar aðferðir til að draga úr kolefnislosun byggingargeirans og innleiða lágorku- og kolefnisstaðla um allan heim (Mata et al., 2020a).

### Alþjóðlegt sjónarhorn

Í Norður-Ameríku eru skýr markmið til að ná kolefnishlutlausum byggingum, oft sett fram sem ákveðin prósentulækkun frá grunnviðmiðum um losun. Til dæmis stefnir Kanada að því að innleiða núll-orku-tilbúin byggingarreglustaðal (zero-energy-ready building code) fyrir árið 2030 og héruð í Kanada hafa leyfi til að setja fram núll orku byggingarmarkmið. Kalifornía sker sig úr og er með sína eigin byggingarreglugerð, Title 24, sem miðar að því að stuðla að orkunýtni og sjálfbærum byggingaraðferðum, þar á meðal er stuðningur við kolefnishlutlaus byggingarmarkmið. Þetta er í takt við víðtækari sjálfbærnimarkmið ríkisins og þjóna sem fyrirmynd fyrir önnur svæði og fylki (Mata et al., 2020a). Í Kína setti ríkisstjórnin fyrsta landsstaðalinn sinn fyrir næstum núllorkubyggingar árið 2019 og hvetur til endurnýjanlegra orkugjafa fyrir nýjar byggingar ásamt því að einhver héruð og bæir hafa innleitt Nettó núllorku byggingar í sveitarstjórnaráætlunum (Mata et al., 2020a). Sérfræðingar spá því að árið 2030 verði 30% bygginga í Kína knúin endurnýjanlegri orku (Z. Liu et al., 2019).

Fleiri lönd taka einnig skref í átt að sjálfbærum byggingum. Ástralía hefur sett sér markmið um bættu orkunýtingu fyrir árið 2030 (Feng et al., 2019; Tozer & Klenk, 2018). Malasía stefnir að því að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda um 45% fyrir árið 2030, Singapúr stefnir að 40-60% bætingu á orkunýtnivísitölunni fyrir árið 2030 (Feng et al., 2019). Indland hefur kynnt byggingarreglur um orkusparnað fyrir nýbyggingar (Kapoor et al., 2011). Chile hefur tekið upp byggingarmarkmið um núlllosun í innlendri orkustefnu sinni (Kapoor et al., 2011) og Suður-Afríka hefur árangurstengd markmið um kolefnishlutleysi nýbygginga undir C40 Suður-Afríku byggingaráætluninni (Feng et al., 2019).

Alþjóðlegt samstarf er nauðsynlegt til að takast á við hindranir eins og skort á rannsóknnum í efnahagslegum þróunarlöndum og samræmi við byggingarreglugerðir, efla samvinnu og svæðisbundin bandalög, samþætta kolefnishlutlausar byggingar í vaxandi hagkerfi og búa til alhliða aðgerðaáætlanir til að ná kolefnishlutlausum byggingum um allan heim.

## World Green Building Councils

Alþjóðlega loftslagsátakið „Advancing Net Zero,“ sækja fram að kolefnishlutleysi, undir forystu World Green Building Council (WGBC). Þeirra framtíðarsýn er að nýjar byggingar skuli ná kolefnishlutleysi fyrir árið 2030 og að núverandi byggingar (nú þegar byggðar) nái kolefnishlutleysi fyrir árið 2050. Ráðleggingar Grænni Byggða um allan heim, sem meðlimir WGBC, efla og stuðla virkt að samdrætti í kolefnislosun með áætlunum innan sinna landa. Þeir tala fyrir löggjöf sem styður samdrátt í kolefnislosun og samræma innlenda verkferla, leiðbeiningar og menntunaráætlanir sem styðja við meginmarkmið WGBC. Eins og er, hefur 31 þjóð sett upp vegvísa til að stefna að því að ná kolefnishlutlausu byggingarmarkmiðunum.

## Algengar hindranir

Vegvísarnir í þessum löndum varpa ljósi á algengar hindranir eins og þekkingarskort, fjármögnunarskort, ófullnægjandi stefnur, háan kostnað og þörf fyrir hegðunarbreytingar. Þessar endurteknu áskoranir leggja áherslu á mikilvægi sérsniðinna áætlanna til að efla kolefnislosun á heimsvísu í byggingargeiranum. Aðferðir sem koma fram í þessum vegvísnum eru meðal annars orkusparandi byggingaráætlanir, endurnýjanleg orkukerfi, lágkolefnishitun og kæling og meginreglur um hringrásarhagkerfi. Þó að sértækar aðferðir geti verið mismunandi eftir löndum, geta margar af þessum aðferðum nýst á heimsvísu og skipta sköpum fyrir aðgerðir og viðleitni til að draga úr kolefnislosun.

## Að sigrast á áskorunum og taka á móti tækifærum

Þrátt fyrir áskoranirnar bjóða vegvísarnir upp á fjölmörg tækifæri til framfara við innleiðingu kolefnishlutlausra bygginga. Það getur skilað efnahagslegum og umhverfislegum ávinningi, þar á meðal kostnaðarsparnaði, atvinnusköpun og heilsufarslegum ávinningi. Þar að auki getur það knúið framfarir þegar lönd geta lært hvert af öðru, deila bestu starfsvenjum og stuðlað að alþjóðlegu samstarfi í átt að sameiginlegu markmiði um kolefnislosun.

Að viðurkenna bæði hindranir og tækifæri sem gera ráð fyrir því að þróa sérsniðnar aðferðir sem byggja á og henta einstökum aðstæðum og auðlindum hvers lands.

## Skilvirk samskipti og þátttaka hagsmunaaðila

Vegvísarnir taka það fram að skýr og skilvirk samskipti eru mikilvæg til að ná til hagsmunaaðila og öðlast stuðning almennings. Vegvísarnir sýna ýmsar aðferðir og nota fjölbreyttar samskiptaleiðir, þar á meðal opinberar vefsíður stjórnvalda, fjölmiðla, opinbera viðburði og frumkvæði um þátttöku hagsmunaaðila. Samstarf við samstarfsaðila iðnaðarins, frjáls félagasamtök og sjálfbær byggingarsamtök eru algeng til að auka vitund og efla upptöku kolefnishlutlausra bygginga. Áhersla er lögð á vinnustofur hagsmunaaðila, opinbert samráð, skuldbindingu atvinnulífsins og samfélagsins og fræðsluáætlanir til að brúa þekkingarbil og knýja fram hegðunarbreytingar.

Þrátt fyrir mismunandi útfærslur vegvísa milli landa, leggja þau öll almennt áherslu á að virkja hagsmunaaðila og almenning í gegnum fjölbreyttar leiðir og tryggja víðtækan skilning á markmiðum og áætlunum kolefnishlutlausra bygginga.



# ADVANCING NET ZERO

## Íslenskar aðstæður

Ein undirstaðan fyrir framhaldsverkefni um leiðbeiningar til að ná fram kolefnishlutleysi bygginga, er að skilgreina íslenskar aðstæður. Ekki er hægt að yfirfæra erlendar skilgreiningar og vottunarkerfi beint yfir á íslenskan byggingariðnað. Í þessum hluta er farið yfir þá þætti sem huga þarf að við gerð leiðbeininganna.

### Kolefnisstyrkur hita- og rafveitu

Í erlendum skilgreiningum á kolefnishlutlausri byggingu er mikil áhersla lögð á að orkan sem byggingin notar sé frá endurnýjanlegum orkugjafa. Því, samkvæmt sumum skilgreiningum, væru flestar byggingar á Íslandi skilgreindar sem kolefnishlutlausar hvað varðar orkunotkun, án nokkurra breytinga á núverandi byggingaraðferðum.

Framleiðsla á orku innan byggingarlóðarinnar er einnig talin vera góð leið til að ná fram kolefnishlutleysi. Staðbundnir orkugjafar, eins og sólarorka og vindorka, geta umbreytt byggingunni í raforkustöð. Þessa orku er þá bæði hægt að nýta fyrir daglegan rekstur, en jafnframt má selja umfram raforku til nærliggjandi byggðar. Þannig kemur byggingin í veg fyrir mikla losun frá orkunotkun ekki bara hjá sér, heldur hjá öðrum byggingum, og er sú losun sem komið er í veg fyrir dregin af losun framkvæmdafasa byggingarinnar. Hins vegar er losun frá hita- og rafveitu Íslands með svipaða eða minni losun á kílóvattstundina heldur en sólarorka eða vindorka, og því virkar þessi nálgun ekki eins vel á Íslandi. Finna þarf aðrar og fleiri leiðir til þess að bæta upp fyrir þá losun sem á sér stað á framkvæmdarfasa (innbyggt kolefni). Sólarorka getur verið valkostur á svæðum þar sem aðgengi að orku er takmarkað og að sólarorku framleiðsla og orkunýting eru í góðri samsvörun hvað varðar tíma og magn framleiðslu og notkunar.

### Byggingarmenning

Ein leið til þess að draga verulega úr innbyggðu kolefni er að endurnota gamalt byggingarefni. Í leiðbeiningum HMS um gerð lífsferilsgræininga á Íslandi munu endurnotuð byggingarefni bera með sér núll losun, og er sú aðferð valin til þess að hvetja til endurnotkunar.

Byggingarmenning okkar felur ekki í sér notkun múrsteina, sem er tilvalið byggingarefni til endurnotkunar, heldur steinsteypu. Erfiðara getur reynst að endurnota steinsteypu, bæði vegna tæknilegra örðuleika við að skera hana niður í nothæfar einingar, en einnig því steypublöndur hafa breyst mikið með árunum og lítið af upplýsingum eru til um eiginleika einstakra veggja. Þar sem steypan er stór hluti af byggingarmenningu Íslendinga þarf að skoða vel hvort hægt sé að nota steinsteypu í kolefnishlutlausar byggingar á Íslandi, og þá hvernig.

Torfkofinn er dæmi kolefnishlutlausar byggingu, og væri því þarft að skoða þennan byggingararf okkar vel við gerð leiðbeininganna.

### Loftslag

Loftslag hefur áhrif á byggingaraðferðir og efnisval, og því þarf að taka tillit til ýmissa þátta við hönnun og framkvæmd kolefnishlutlausra bygginga á Íslandi. Hugsa þarf að auknu vindálagi, aðstæðum fyrir myndun myglu og rakaskemmda, upphitunarþörf og dagsbirtu. Notkun grænna lifandi byggingarefna (græn þök og veggir) þarf að taka mið af loftslagi og

flóru Íslands, en einnig þarf að aðlaga útreikninga á magni og hraða kolefnisbindingar við skógrækt á lóð.

## Jarðhræringar

Öryggi mannvirkja er ávalt í forgangi við hönnun og byggingu mannvirkja. Á Íslandi eru séríslenskar aðstæður varðandi jarðhræringar sem þarf að taka tillit til í hönnun og við byggingu.

## Auðlindir og markaðsaðstæður

Fá byggingarefni eru framleidd hér á landi, og því þarf að hugsa leiða til að minnka losun sem stafar af flutningum, ásamt því að skoða möguleika á innlendri framleiðslu. Með uppbyggingu á úrvinnslu skógarafurða og eflingu nytjaskógræktar á Íslandi verður mun auðveldara að byggja kolefnishlutlausar byggingar. Ræktun á iðnaðarhampi til notkunar á hampsteypu felur einnig í sér tækifæri fyrir innlenda framleiðslu á lágkolefnis byggingarefnum.

## Kolefnisjöfnun

Hefðbundna leiðin til kolefnisjöfnunar er að láta bygginguna framleiða orku sem er með lægra kolefnisspor en það raforkukerfi sem er til staðar þar sem byggingin er. Til dæmis ef raforkukerfið sem byggingin myndi tengjast inn á væri með 350 grömm CO<sub>2</sub>/kWh og byggingin að framleiða sólarorku með losun á bilinu 20-30 grömm CO<sub>2</sub>/kWh þá er mismunurinn á losun tekinn sem "sparnaður á kolefnisspor" og nýttur til kolefnisjöfnunar. En Sbr. Umfjöllun hér að ofan um íslenska raf- og hitaveitu kerfið, þá er losun frá orkuframleiðslu á Íslandi á mjög lág, og hún getur verið lægri enn frá sólorku.

En til eru fleiri leiðir til kolefnisjöfnunar og til þess að draga koltvísýring úr andrúmslofti eins og til með dæmis skógrækt og endurheimt votlendis. Einnig geta sumir þörungar tekið til sín koltvísýring og Carbfix er að vinna í staðbundinni niðurdælingu á koltvísýringi frá jarðhita á Íslandi. Ýmsar aðrar tækninýngar og nýsköpun um kolefnisjöfnun verður skoðuð nánar í framhaldinu og við vinnslu leiðbeininga.



Einar H. Reynisson



## Lokaorð

Til að takast á við áskoranir loftslagsbreytinga getur byggingageirinn gegnt lykilhlutverki við að hefta kolefnisspor byggða umhverfisins. Kolefnishlutlausar byggingar geta dregið verulega úr losun gróðurhúsalofttegunda innan byggða umhverfisins. Framgangur kolefnishlutlausra bygginga stafar að hluta af vaxandi þörf á aðgerðum varðandi loftslagsbreytingar og mikilvægi alþjóðlegs orkuöryggis. Margar þjóðir hafa mótað stefnur og reglugerðir til að hvetja til þróunar vistfræðilegra sjálfbærari og orkunýtnari bygginga.

Innleiðing kolefnishlutlausra bygginga krefst orkusparandi hönnunar, háþróaðrar tækni, endurnýjanlega orkugjafa og sjálfbærra efna til að lágmarka losun gróðurhúsalofttegunda. Til að bæta upp fyrir óhjákvæmilega losun er hægt að kolefnisjafna þá losun sem ekki er komist hjá. Lífsferilsgreiningar skipta höfuðmáli við þetta ferli, þar sem þær meta umhverfisáhrif byggingar á líftíma hennar og hægt er að skoða hvar eru möguleikar á endurbótum og hagræðingu.

Þessi skýrsla undirstrikar mikilvægi þess að sigrast á þeim áskorunum sem hindra innleiðingu kolefnishlutlausra bygginga. Með sameiginlegt markmið, skilning, og samvinnu geta hagsmunaaðilar og stefnumótendur unnið á skilvirkari hátt að því að auka og innleiða árangursríkar aðferðir fyrir kolefnishlutlausar byggingar.



# Heimildaskrá

- Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Ajayi, S. O., Bilal, M., Alaka, H. A., Owolabi, H. A., Bello, S. A., Jaiyeoba, B. E., & Kadiri, K. O. (2017). Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills. *Waste Management*, 60, 3-13. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2016.08.017>
- Aliero, M. S., Qureshi, K. N., Pasha, M. F., & Jeon, G. (2021). Smart Home Energy Management Systems in Internet of Things networks for green cities demands and services. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101443. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101443>
- Alirezaei, M., Noori, M., & Tatari, O. (2016). Getting to net zero energy building: Investigating the role of vehicle to home technology. *Energy and Buildings*, 130, 465-476. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.08.044>
- Aljundi, K., Pinto, A., & Rodrigues, F. (2016). Energy analysis using cooperation between BIM tools (Revit and Green Building Studio) and EnergyPlus. In *Congresso Português de Building Information Modelling*. [https://www.researchgate.net/publication/320471431\\_Energy\\_analysis\\_using\\_cooperation\\_between\\_BIM\\_tools\\_Revit\\_and\\_Green\\_Building\\_Studio\\_and\\_EnergyPlus](https://www.researchgate.net/publication/320471431_Energy_analysis_using_cooperation_between_BIM_tools_Revit_and_Green_Building_Studio_and_EnergyPlus)
- Allwood, J. M., Ashby, M. F., Gutowski, T. G., & Worrell, E. (2011). Material efficiency: A white paper. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 362-381. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2010.11.002>
- Allwood, J. M., Dunant, C. F., Lupton, R. C., Cleaver, C. J., Serrenho, A. C. H., Azevedo, Horton, P. M., Clare, C., Low, H., Horrocks, I., Murray, J., Lin, J., Cullen, J. M., Ward, M., Salamati, M., Felin, T., Ibell, T., Zhu, W., & Hawkins, W. (2019). Absolute Zero. In *UK Fires*. <https://doi.org/10.17863/CAM.46075>
- Anand, P., Deb, C., & Alur, R. (2017). A simplified tool for building layout design based on thermal comfort simulations. *Frontiers of Architectural Research*, 6(2), 218-230. <https://doi.org/10.1016/J.FOAR.2017.03.001>
- Arnold, C., FAIA, & RIBA. (2016). *Building Envelope Design Guide*. Whole Building Design Guide. <https://www.wbdg.org/guides-specifications/building-envelope-design-guide/building-envelope-design-guide-introduction>
- Asaee, S. R., Sharafian, A., Herrera, O. E., Blomerus, P., & Mérida, W. (2018). Housing stock in cold-climate countries: Conversion challenges for net zero emission buildings. *Applied Energy*, 217, 88-100. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.02.135>
- Attia, S., Eleftheriou, P., Xenii, F., Morlot, R., Ménéz, C., Kostopoulos, V., Betsi, M., Kalaitzoglou, I., Pagliano, L., Cellura, M., Almeida, M., Ferreira, M., Baracu, T., Badescu, V., Crutescu, R., & Hidalgo-Betanzos, J. M. (2017). Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energy and Buildings*, 155, 439-458. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.09.043>
- Bajenaru, N., Damian, A., & Frunzulica, R. (2016). Evaluation of the Energy Performance for a nZEB Office Building under Specific Climatic Conditions. *Energy Procedia*, 85, 26-34. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.12.271>
- Belussi, L., Barozzi, B., Bellazzi, A., Danza, L., Devitofrancesco, A., Fanciulli, C., Ghellere, M., Guazzi, G., Meroni, I., Salamone, F., Scamoni, F., & Scrosati, C. (2019). A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*, 25, 100772. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100772>
- Berry, S., & Davidson, K. (2015). Zero energy homes – Are they economically viable? *Energy Policy*, 85, 12-21. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2015.05.009>
- Besant, R. W., Dumont, R. S., & Schoenau, G. (1979a). The Saskatchewan conservation house: Some preliminary performance results. *Energy and Buildings*, 2(2), 163-174. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(79\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0378-7788(79)90031-8)
- Besant, R. W., Dumont, R. S., & Schoenau, G. (1979b). The Saskatchewan conservation house: Some preliminary performance results. *Energy and Buildings*, 2(2), 163-174. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(79\)90031-8](https://doi.org/10.1016/0378-7788(79)90031-8)
- Besser, D., & Vogdt, F. U. (2017). First steps towards low energy buildings: how far are Chilean dwellings from nearly zero-energy performances? *Energy Procedia*, 132, 81-86. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.09.642>
- Birgisdottir, H., Moncaster, A., Wiberg, A. H., Chae, C., Yokoyama, K., Balouktsi, M., Seo, S., Oka, T., Lützkendorf, T., & Malmqvist, T. (2017). IEA EBC annex 57 'evaluation of embodied energy and CO2eq for building construction.' *Energy and Buildings*, 154, 72-80. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.08.030>
- Blonsky, M., Nagarajan, A., Ghosh, S., McKenna, K., Veda, S., & Kroposki, B. (2019). Potential Impacts of Transportation and Building Electrification on the Grid: A Review of Electrification Projections and Their Effects on Grid Infrastructure, Operation, and Planning. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 6(4), 169-176. <https://doi.org/10.1007/S40518-019-00140-5/METRICS>
- BMCHURD. (2016). Action plan to promote the development of ultra-low-energy buildings in Beijing (2016-2018). In *Beijing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development*. [http://english.beijing.gov.cn/investinginbeijing/WhyBeijing/lawpolicy/policies/202108/t20210823\\_2473694.html](http://english.beijing.gov.cn/investinginbeijing/WhyBeijing/lawpolicy/policies/202108/t20210823_2473694.html)

- Borman, C. (2020). *Getting to zero a guide to developing net zero carbon buildings in South Africa*.
- Braulio-Gonzalo, M., Jorge-Ortiz, A., & Bovea, M. D. (2022). How are indicators in Green Building Rating Systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings? *Environmental Impact Assessment Review*, 95, 106793. <https://doi.org/10.1016/J.EIAR.2022.106793>
- Braune, D. A., Lemaitre, D. C., Jansen, F., & Gemmingen, U. von. (2020). *Climate positive: now! How every building can make a contribution to climate action*.
- Bui, T. T. P., Wilkinson, S., Domingo, N., & MacGregor, C. (2021). Zero Carbon Building Practices in Aotearoa New Zealand. *Energies*, 14(15), 4455. <https://doi.org/10.3390/EN14154455>
- CAGBC. (2022a). *Zero Carbon Building - Design Standard Version 3*.
- CAGBC. (2022b). *Zero Carbon Building - Performance Standard Version 2*.
- Cao, Z., Myers, R. J., Lupton, R. C., Duan, H., Sacchi, R., Zhou, N., Reed Miller, T., Cullen, J. M., Ge, Q., & Liu, G. (2020). The sponge effect and carbon emission mitigation potentials of the global cement cycle. *Nature Communications* 2020 11:1, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17583-w>
- Capelo, S., Soares, T., Azevedo, I., Fonseca, W., & Matos, M. A. (2023). Design of an Energy Policy for the Decarbonisation of Residential and Service Buildings in Northern Portugal. *Energies*, 16(5), 2239. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/en16052239>
- Carcassi, O. B., Habert, G., Malighetti, L. E., & Pittau, F. (2022). Material Diets for Climate-Neutral Construction. *Cite This: Environ. Sci. Technol*, 2022(5223). <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05895>
- Catto, I. (2008). Carbon zero homes UK style. *Renewable Energy Focus*, 9(1), 28-29. [https://doi.org/10.1016/S1471-0846\(08\)70020-9](https://doi.org/10.1016/S1471-0846(08)70020-9)
- Cavalliere, C., Habert, G., Dell'Osso, G. R., & Hollberg, A. (2019). Continuous BIM-based assessment of embodied environmental impacts throughout the design process. *Journal of Cleaner Production*, 211, 941-952. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.247>
- Ceccherini, G., Duveiller, G., Grassi, G., Lemoine, G., Avitabile, V., Pilli, R., & Cescatti, A. (2020). Abrupt increase in harvested forest area over Europe after 2015. *Nature* 2020 583:7814, 583(7814), 72-77. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2438-y>
- Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., & Mistretta, M. (2014). Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study. *Energy and Buildings*, 72, 371-381. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.12.046>
- Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y. (2015). A review on Life Cycle Assessment, Life Cycle Energy Assessment and Life Cycle Carbon Emissions Assessment on buildings. *Applied Energy*, 143(1), 395-413. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.01.023>
- Chen, W. M., Kim, H., & Yamaguchi, H. (2014). Renewable energy in eastern Asia: Renewable energy policy review and comparative SWOT analysis for promoting renewable energy in Japan, South Korea, and Taiwan. *Energy Policy*, 74(C), 319-329. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2014.08.019>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability* 2020 3:4, 3(4), 269-276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Clarke, J., Littlewood, J. R., & Karani, G. (2023). Developing Tools to Enable the UK Construction Industry to Adopt the Active Building Concept for Net Zero Carbon Buildings. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 304, 13(2), 304. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13020304>
- Cohen, R., Desai, K., Elias, J., & Twinn, R. (2021). Net zero carbon: Energy performance targets for offices. *Building Services Engineering Research and Technology*, 42(3), 349-369. [https://doi.org/10.1177/0143624421991470/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_0143624421991470-FIG4.JPEG](https://doi.org/10.1177/0143624421991470/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0143624421991470-FIG4.JPEG)
- Cornaro, C., Puggioni, V. A., & Strollo, R. M. (2016). Dynamic simulation and on-site measurements for energy retrofit of complex historic buildings: Villa Mondragone case study. *Journal of Building Engineering*, 6, 17-28. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2016.02.001>
- D'Agostino, D., Mele, L., Minichiello, F., & Renno, C. (2020). The Use of Ground Source Heat Pump to Achieve a Net Zero Energy Building. *Energies* 2020, Vol. 13, Page 3450, 13(13), 3450. <https://doi.org/10.3390/EN13133450>
- D'Amico, B., Pomponi, F., & Hart, J. (2021). Global potential for material substitution in building construction: The case of cross laminated timber. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123487. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123487>
- DHURDSP. (2020). Notice on Delegating the Demonstration Plan of Prefabricated Buildings and Ultra-Low-Energy Buildings in 2020. In *Department of Housing and Urban-Rural Development of Shandong Province, China*.
- DIITHP. (2020). *Implementation plan of special planning for passive ultra-low-energy building industry development in Hebei Province (2020-2025)*. Department of Industry and Information Technology of Hebei Province, China.
- Ding, Z., Liu, S., Luo, L., & Liao, L. (2020). A building information modeling-based carbon emission measurement system for prefabricated residential buildings during the materialization phase. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121728. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121728>

- Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 390–413. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.051>
- Dong, Y. H., Jaillon, L., Chu, P., & Poon, C. S. (2015). Comparing carbon emissions of precast and cast-in-situ construction methods – A case study of high-rise private building. *Construction and Building Materials*, 99, 39–53. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.145>
- Dong, Y. H., & Ng, S. T. (2015). A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong. *Building and Environment*, 89, 183–191. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.02.020>
- Dong, Z., Zhao, K., Liu, Y., & Ge, J. (2021). Performance investigation of a net-zero energy building in hot summer and cold winter zone. *Journal of Building Engineering*, 43, 103192. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2021.103192>
- Du, T., Jansen, S., Turrin, M., van den Dobbelen, A., Jansen@tudelft, S. C., Ni, S. J., Turrin@tudelft, M., Ni, ( M T, & Ni, A. A. J. F. V. (2020). Effects of Architectural Space Layouts on Energy Performance: A Review. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 1829, 12(5), 1829. <https://doi.org/10.3390/SU12051829>
- Duque-Lazo, J., Navarro-Cerrillo, R. M., & Ruíz-Gómez, F. J. (2018). Assessment of the future stability of cork oak (*Quercus suber* L.) afforestation under climate change scenarios in Southwest Spain. *Forest Ecology and Management*, 409, 444–456. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2017.11.042>
- Eberhardt, L. C. M., Birgisdottir, H., & Birkved, M. (2019). Potential of Circular Economy in Sustainable Buildings. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 471(9), 092051. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/9/092051>
- Eberhardt, L. C. M., van Stijn, A., Rasmussen, F. N., Birkved, M., & Birgisdottir, H. (2020). Development of a Life Cycle Assessment Allocation Approach for Circular Economy in the Built Environment. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 9579, 12(22), 9579. <https://doi.org/10.3390/SU12229579>
- Ellen MacArthur Foundation, 2017. Ellen MacArthur Foundation. Cities in the Circular Economy: An Initial Exploration. Ellen MacArthur Found (2017)
- Ellen MacArthur Foundation, 2013. Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Cowes
- Elnozahy, A., Rahman, A. K. A., Ali, A. H. H., Abdel-Salam, M., & Ookawara, S. (2015). Performance of a PV module integrated with standalone building in hot arid areas as enhanced by surface cooling and cleaning. *Energy and Buildings*, 88, 100–109. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.12.012>
- Energy Transitions Commission. (2018). *Mission Possible: Reaching Net-Zero Carbon Emissions*. Energy Transitions Commission. <https://www.energy-transitions.org/publications/mission-possible/#download-form>
- European Commission. (2012, October 25). *DIRECTIVE 2012/27/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC*. European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012L0027>
- European Commission. (2018a). *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L .2018.328.01.0082.01.ENG>
- European Commission. (2018b). *Directive 2018/844 of the European Parliament and of the council*.
- European Commission. (2018c). *A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy*.
- European Commission. (2021, December 15). *European Green Deal: Commission proposes to boost renovation and decarbonisation of buildings*. European Commission. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_21\\_6683](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_21_6683)
- European Union. (2019). *The European Green Deal*. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- Evola, G., Margani, G., & Marletta, L. (2014). Cost-effective design solutions for low-rise residential Net ZEBs in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 68(PARTA), 7–18. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.09.026>
- Feng, J., Luo, X., Gao, M., Abbas, A., Xu, Y. P., & Pouramini, S. (2021). Minimization of energy consumption by building shape optimization using an improved Manta-Ray Foraging Optimization algorithm. *Energy Reports*, 7, 1068–1078. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.02.028>
- Feng, W., Zhang, Q., Ji, H., Wang, R., Zhou, N., Ye, Q., Hao, B., Li, Y., Luo, D., & Lau, S. S. Y. (2019). A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114, 109303. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109303>
- Ferrara, M., della Santa, F., Bilardo, M., de Gregorio, A., Mastropietro, A., Fugacci, U., Vaccarino, F., & Fabrizio, E. (2021). Design optimization of renewable energy systems for NZEBs based on deep residual learning. *Renewable Energy*, 176, 590–605. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.05.044>

- Filippidou, F., & Jimenez Navarro, J. P. (2019). *Achieving the cost-effective energy transformation of Europe's buildings - Publications Office of the EU*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c7a897dc-0050-11ea-8c1f-01aa75ed71a1/language-en>
- Gao, Y., Dong, J., Isabella, O., Santbergen, R., Tan, H., Zeman, M., & Zhang, G. (2019). Modeling and analyses of energy performances of photovoltaic greenhouses with sun-tracking functionality. *Applied Energy*, 233-234, 424-442. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.10.019>
- GBC France. (2022). *ROADMAP A pathway to decarbonization (2050)*. <http://www.hqegbc.org/wp-content/uploads/2022/05/HQE-Roadmap-MP-EXE.pdf>
- GBCA. (2021). *Climate Positive Buildings and our New Zero Ambitions*.
- GBCe. (2022). *Whole Life Carbon Roadmap for a decarbonised built environment in Spain*. [https://gbce.es/wp-content/uploads/2022/04/BuildingLife\\_Abril2022\\_EN\\_FINAL-prot.pdf](https://gbce.es/wp-content/uploads/2022/04/BuildingLife_Abril2022_EN_FINAL-prot.pdf)
- Gibbons, L., & Javed, S. (2022). A review of HVAC solution-sets and energy performance of nearly zero-energy multi-story apartment buildings in Nordic climates by statistical analysis of environmental performance certificates and literature review. *Energy*, 238, 121709. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.121709>
- Gillenwater, M., Broekhoff, D., Trexler, M., Hyman, J., & Fowler, R. (2007). Policing the voluntary carbon market. *Nature Climate Change* 2007 1:711, 1(711), 85-87. <https://doi.org/10.1038/climate.2007.58>
- Global Alliance for Buildings and Construction. (n.d.). *Roadmaps for Buildings and Construction | Globalabc*. UN Environment Programme. Retrieved March 6, 2023, from <https://globalabc.org/roadmaps-buildings-and-construction>
- Godin, K., Sapinski, J. P., & Dupuis, S. (2021). The transition to net zero energy (NZE) housing: An integrated approach to market, state, and other barriers. *Cleaner and Responsible Consumption*, 3, 100043. <https://doi.org/10.1016/J.CLRC.2021.100043>
- Government of Canada. (n.d.). *Pan-Canadian Framework on Clean Growth and Climate Change*. Canada. Retrieved March 3, 2023, from <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/pan-canadian-framework.html>
- Greene, Jonah M., Hosanna, H. Robert, Willson, B., Quinn, & Jason C. (2023). Whole life embodied emissions and net-zero emissions potential for a mid-rise office building constructed with mass timber. *Sustainable Materials and Technologies*. <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2022.E00528>
- Grgić, I., Vukadinović, D., Bašić, M., & Bubalo, M. (2022). Photovoltaic System with a Battery-Assisted Quasi-Z-Source Inverter: Improved Control System Design Based on a Novel Small-Signal Model. *Energies* 2022, Vol. 15, Page 850, 15(3), 850. <https://doi.org/10.3390/EN15030850>
- Grigoropoulos, E., Anastaselos, D., Nižetić, S., & Papadopoulos, A. M. (2016). Effective ventilation strategies for net zero-energy buildings in Mediterranean climates. <https://doi.org/10.1080/14733315.2016.1203607>
- Gunarathne, D. S., Mellin, P., Yang, W., Pettersson, M., & Ljunggren, R. (2016). Performance of an effectively integrated biomass multi-stage gasification system and a steel industry heat treatment furnace. *Applied Energy*, 170, 353-361. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.03.003>
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020a). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment* 2020 1:11, 1(11), 559-573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020b). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment* 2020 1:11, 1(11), 559-573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Hacker, J. N., de Saullès, T. P., Minson, A. J., & Holmes, M. J. (2008). Embodied and operational carbon dioxide emissions from housing: A case study on the effects of thermal mass and climate change. *Energy and Buildings*, 40(3), 375-384. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2007.03.005>
- Hajer, M., Swilling, M., & Suh, S. (2018). *The Weight of Cities: Resource Requirements of Future Urbanization*. [https://www.researchgate.net/publication/327035481\\_The\\_Weight\\_of\\_Cities\\_Resource\\_Requirements\\_of\\_Future\\_Urbanization](https://www.researchgate.net/publication/327035481_The_Weight_of_Cities_Resource_Requirements_of_Future_Urbanization)
- Heffernan, E., Pan, W., Liang, X., & de Wilde, P. (2015). Zero carbon homes: Perceptions from the UK construction industry. *Energy Policy*, 79, 23-36. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2015.01.005>
- Hill, S.; Dalzell, A.; Allwood, M. *Net Zero Carbon Buildings: Three Steps to Take Now*; ARUP: London, UK, 2020; Available online: <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/net-zero-carbon-buildings-three-steps-to-take-now> (accessed on 28 January 2023).
- Hinnells, M. (2008). Technologies to achieve demand reduction and microgeneration in buildings. *Energy Policy*, 36(12), 4427-4433. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2008.09.029>
- Hossaini, N., Hewage, K., & Sadiq, R. (2018). Path toward net-zero buildings: a natural capital assessment framework. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(1), 201-218. <https://doi.org/10.1007/S10098-017-1469-Z/TABLES/11>
- Hoxha, E., Passer, A., Saade, M. R. M., Trigaux, D., Shuttleworth, A., Pittau, F., Allacker, K., & Habert, G. (2020). Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *Buildings and Cities*, 1(1), 504-524. <https://doi.org/10.5334/BC.46/METRICS/>

- Hughes, B. R., Chaudhry, H. N., & Ghani, S. A. (2011). A review of sustainable cooling technologies in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3112–3120. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.03.032>
- Huuhka, S., & Lahdensivu, J. (2016). Statistical and geographical study on demolished buildings. *Building Research & Information*, 44(1), 73–96. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.980101>
- Ibn-Mohammed, T., Greenough, R., Taylor, S., Ozawa-Meida, L., & Acquaye, A. (2013). Operational vs. embodied emissions in buildings—A review of current trends. *Energy and Buildings*, 66, 232–245. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.07.026>
- IGBC. (2022). *Building a Zero Carbon Ireland – A roadmap to decarbonise Ireland’s Built Environment across its Whole Life Cycle*.
- International Energy Agency (IAE) (2021). *Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- ISO. (2020). *ISO 21678:2020 - Sustainability in buildings and civil engineering works – Indicators and benchmarks – Principles, requirements and guidelines*. <https://www.iso.org/standard/71344.html>
- ISO (2022). *ISO 21931-1:2022 - Sustainability in buildings and civil engineering works – Framework for methods of assessment of the environmental, social and economic performance of construction works as a basis for sustainability assessment – Part 1: Buildings*. <https://www.iso.org/standard/71183.html>
- Jaber, S., & Ajib, S. (2011). Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 43(8), 1829–1834. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.03.024>
- Jafari, A., & Valentin, V. (2015). Decision-making life-cycle cost analysis model for energy-efficient housing retrofits. *Ceased*, 6(3), 173–187. <https://doi.org/10.1080/2093761X.2015.1074948>
- Jäger-Waldau, A. (2018). PV Status Report 2018. In *European Commission*. <https://doi.org/10.2760/826496>
- Janda, K. B., Kenington, D., Ruyssevelt, P., & Willan, C. (2021). Pursuing a net-zero carbon future for all: Challenges for commercial real estate. *One Earth*, 4(11), 1530–1533. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2021.11.004>
- Jiang, W., Ju, Z., Tian, H., Liu, Y., Arici, M., Tang, X., Li, Q., Li, D., & Qi, H. (2022). Net-zero energy retrofit of rural house in severe cold region based on passive insulation and BAPV technology. *Journal of Cleaner Production*, 360, 132198. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.132198>
- Joensuu, T., Edelman, H., & Saari, A. (2020). Circular economy practices in the built environment. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124215. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.124215>
- Joensuu, T., Leino, R., Heinonen, J., & Saari, A. (2022). Developing Buildings’ Life Cycle Assessment in Circular Economy-Comparing methods for assessing carbon footprint of reusable components. *Sustainable Cities and Society*, 77, 103499. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103499>
- Jones, P. (2017). A ‘smart’ bottom-up whole-systems approach to a zero-carbon built environment. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1374100>, 46(5), 566–577. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1374100>
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., & Wang, C. C. (2021). A Systematic Review of Construction and Demolition Waste Management in Australia: Current Practices and Challenges. *Recycling 2021, Vol. 6, Page 34*, 6(2), 34. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING6020034>
- Kajaste, R., & Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions - management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041–4052. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.07.055>
- Kamali, M., & Hewage, K. (2016). Life cycle performance of modular buildings: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1171–1183. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.05.031>
- Kapoor, R., Deshmukh, A., & Lal, S. (2011). *Strategy Roadmap For Net Zero Energy Buildings in India*. <https://www.scribd.com/document/366053407/GH#>
- Karlsson, I., Rootzén, J., Johnsson, F., & Erlandsson, M. (2021). Achieving net-zero carbon emissions in construction supply chains - A multidimensional analysis of residential building systems. *Developments in the Built Environment*, 8, 100059. <https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2021.100059>
- Khan, H. S., Asif, M., & Mohammed, M. A. (2017). Case Study of a Nearly Zero Energy Building in Italian Climatic Conditions. *Infrastructures 2017, Vol. 2, Page 19*, 2(4), 19. <https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES2040019>
- Kilkis, B. (2022). Net-zero buildings, what are they and what they should be? *Energy*, 256, 124442. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2022.124442>
- Kovacic, I., Summer, M., & Achammer, C. (2015). Strategies of building stock renovation for ageing society. *Journal of Cleaner Production*, 88, 349–357. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.04.080>
- Kuczera, A., & Płoszaj-Mazurek, M. (2021). How to decarbonize the built environment by 2050, whole life carbon roadmap for Poland. In *Polish Green Building Council*.
- Kuittinen, M. (2019). *Method for the whole life carbon assessment of buildings*.
- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110038. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110038>

- Langston, Y. L., & Langston, C. A. (2008). Reliability of building embodied energy modelling: an analysis of 30 Melbourne case studies. <http://Dx.Doi.Org/10.1080/01446190701716564>, 26(2), 147-160. <https://doi.org/10.1080/01446190701716564>
- Laski, J., & Burrows, V. (2017). From thousands to billions: coordinated action towards 100% net zero carbon buildings by 2050. In *World Green Building Council*. [www.igbc.in](http://www.igbc.in)
- Lavagna, M., Baldassarri, C., Campioli, A., Giorgi, S., Dalla Valle, A., Castellani, V., & Sala, S. (2018). Benchmarks for environmental impact of housing in Europe: Definition of archetypes and LCA of the residential building stock. *Building and Environment*, 145, 260-275. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.09.008>
- Lawania, K., & Biswas, W. K. (2018). Application of life cycle assessment approach to deliver low carbon houses at regional level in Western Australia. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 204-224. <https://doi.org/10.1007/S11367-017-1314-Y/TABLES/7>
- Lechtenböhmer, S., Nilsson, L. J., Åhman, M., & Schneider, C. (2016). Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification - Implications for future EU electricity demand. *Energy*, 115, 1623-1631. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.07.110>
- Lee, D. sheng, Chen, Y. T., & Chao, S. L. (2022). Universal workflow of artificial intelligence for energy saving. *Energy Reports*, 8, 1602-1633. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.12.066>
- Li, D. H. W., Yang, L., & Lam, J. C. (2013). Zero energy buildings and sustainable development implications - A review. *Energy*, 54, 1-10. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2013.01.070>
- Likhacheva Sokolowski, I. (2019). *Green Buildings : A Finance and Policy Blueprint for Emerging Markets*. World Bank Group.
- Lin, B., & Chen, Z. (2022). Net zero energy building evaluation, validation and reflection - A successful project application. *Energy and Buildings*, 261, 111946. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.111946>
- Liu, G., Tan, Y., & Li, X. (2020). China's policies of building green retrofit: A state-of-the-art overview. *Building and Environment*, 169, 106554. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2019.106554>
- Liu, Z., Liu, Y., He, B. J., Xu, W., Jin, G., & Zhang, X. (2019). Application and suitability analysis of the key technologies in nearly zero energy buildings in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 329-345. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.11.023>
- Lizana, J., Barrios-Padura, Á., Molina-Huelva, M., & Chacartegui, R. (2016). Multi-criteria assessment for the effective decision management in residential energy retrofitting. *Energy and Buildings*, 129, 284-307. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2016.07.043>
- López Ruiz, L. A., Roca Ramón, X., & Gassó Domingo, S. (2020). The circular economy in the construction and demolition waste sector - A review and an integrative model approach. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119238. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119238>
- Maierhofer, D., Röck, M., Ruschi Mendes Saade, M., Hoxha, E., & Passer, A. (2022). Critical life cycle assessment of the innovative passive nZEB building concept 'be 2226' in view of net-zero carbon targets. *Building and Environment*, 223, 109476. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109476>
- Makvandia, G., Safiuddin, M., Reda, F., & Berardi, U. (2021). Obstacles to Developing Net-Zero Energy (NZE) Homes in Greater Toronto Area. *Buildings 2021*, Vol. 11, Page 95, 11(3), 95. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS11030095>
- Mao, C., Shen, Q., Shen, L., & Tang, L. (2013). Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects. *Energy and Buildings*, 66, 165-176. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2013.07.033>
- Marques, B., Tadeu, A., António, J., Almeida, J., & de Brito, J. (2020). Mechanical, thermal and acoustic behaviour of polymer-based composite materials produced with rice husk and expanded cork by-products. *Construction and Building Materials*, 239, 117851. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117851>
- Marszal, A. J., Bourrelle, J. S., Musall, E., Gustavsen, A., & Voss, K. (2010). *Net Zero Energy Buildings-Calculation Methodologies versus National Building Codes*.
- Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011 a). Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4), 971-979. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.12.022>
- Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011b). Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. *Energy and Buildings*, 43(4), 971-979. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.12.022>
- Mata, É., Ottosson, J., & Nilsson, J. (2020b). A review of flexibility of residential electricity demand as climate solution in four EU countries. *Environmental Research Letters*, 15(7), 073001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AB7950>
- Mata, É., Peñalosa, D., Sandkvist, F., & Nyberg, T. (2021). What is stopping low-carbon buildings? A global review of enablers and barriers. *Energy Research & Social Science*, 82, 102261. <https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102261>

- Mata, É., Korpál, A. K., Cheng, S. H., Jiménez Navarro, J. P., Filippidou, F., Reyna, J., & Wang, R. (2020a). A map of roadmaps for zero and low energy and carbon buildings worldwide. *Environmental Research Letters*, 15(11), 113003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ABB69F>
- Material Economics. (2019). Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry. In *Material Economics*. <https://materialeconomics.com/publications/industrial-transformation-2050>
- McGrath, T., Nanukuttan, S., Owens, K., Basheer, M., & Keig, P. (2015). Retrofit versus new-build house using life-cycle assessment. <http://Dx.Doi.Org/10.1680/Ensu.11.00026>, 166(3), 122-137. <https://doi.org/10.1680/ENSU.11.00026>
- Memarzadeh, M., & Golparvar-Fard, M. (2012). Monitoring and Visualization of Building Construction Embodied Carbon Footprint Using DnAR-N-Dimensional Augmented Reality Models. *Construction Research Congress 2012: Construction Challenges in a Flat World, Proceedings of the 2012 Construction Research Congress*, 1330-1339. <https://doi.org/10.1061/9780784412329.134>
- Miller, E., & Buys, L. (2008). Retrofitting commercial office buildings for sustainability: Tenants' perspectives. *Journal of Property Investment and Finance*, 26(6), 552-561. <https://doi.org/10.1108/14635780810908398/FULL/PDF>
- Miller, S. A., Horvath, A., & Monteiro, P. J. M. (2016). Readily implementable techniques can cut annual CO2 emissions from the production of concrete by over 20%. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074029>
- Miller, S. A., & Myers, R. J. (2020). Environmental Impacts of Alternative Cement Binders. *Environmental Science and Technology*, 54(2), 677-686. [https://doi.org/10.1021/ACS.EST.9B05550/ASSET/IMAGES/LARGE/ES9B05550\\_0004.JPEG](https://doi.org/10.1021/ACS.EST.9B05550/ASSET/IMAGES/LARGE/ES9B05550_0004.JPEG)
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Fuss, S., Hilaire, J., Creutzig, F., Amann, T., Beringer, T., de Oliveira Garcia, W., Hartmann, J., Khanna, T., Lenzi, D., Luderer, G., Nemet, G. F., Rogelj, J., Smith, P., Vicente Vicente, J. L., Wilcox, J., & del Mar Zamora Dominguez, M. (2018). Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/AABF9B>
- Moncaster, A. M., Rasmussen, F. N., Malmqvist, T., Houlihan Wiberg, A., & Birgisdottir, H. (2019). Widening understanding of low embodied impact buildings: Results and recommendations from 80 multi-national quantitative and qualitative case studies. *Journal of Cleaner Production*, 235, 378-393. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.06.233>
- Monteiro, H., Fernández, J. E., & Freire, F. (2016). Comparative life-cycle energy analysis of a new and an existing house: The significance of occupant's habits, building systems and embodied energy. *Sustainable Cities and Society*, 26, 507-518. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2016.06.002>
- Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., & Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials* 2017 16:7, 16(7), 698-699. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>
- Moore, W. P. (2020). EMBODIED CARBON A CLEARER VIEW OF CARBON EMISSIONS STEWARDSHIP REPORT. MOST. (2016). *Ministry of Science and Technology of China, 13th Five-Year" (2016-2020)*. National Science and Technology Innovation Plan. <https://en.most.gov.cn/>
- Mouton, L., Trigaux, D., Allacker, K., & Röck, M. (2023). Low-tech passive solar design concepts and bio-based material solutions for reducing life cycle GHG emissions of buildings - Life cycle assessment of regenerative design strategies (2/2). *Energy and Buildings*, 282, 112678. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112678>
- Nath, A. J., Lal, R., & Das, A. K. (2015). Managing woody bamboos for carbon farming and carbon trading. *Global Ecology and Conservation*, 3, 654-663. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2015.03.002>
- Norgate, T., Haque, N., Somerville, M., & Jahanshahi, S. (2012). Biomass as a Source of Renewable Carbon for Iron and Steelmaking. *ISIJ International*, 52(8), 1472-1481. <https://doi.org/10.2355/ISIJINTERNATIONAL.52.1472>
- NZGBC. (2019). *A Zero Carbon Road Map for Aotearoa's Buildings*.
- Ohene, E., Chan, A. P. C., & Darko, A. (2022a). Review of global research advances towards net-zero emissions buildings. *Energy and Buildings*, 266. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112142>
- Ohene, E., Chan, A. P. C., & Darko, A. (2022b). Prioritizing barriers and developing mitigation strategies toward net-zero carbon building sector. *Building and Environment*, 223, 109437. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109437>
- Ohene, E., Hsu, S. C., & Chan, A. P. C. (2022c). Feasibility and retrofit guidelines towards net-zero energy buildings in tropical climates: A case of Ghana. *Energy and Buildings*, 269, 112252. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112252>
- Opher, T., Duhamel, M., Posen, I. D., Panesar, D. K., Brugmann, R., Roy, A., Zizzo, R., Sequeira, L., Anvari, A., & MacLean, H. L. (2021a). Life cycle GHG assessment of a building restoration: Case study of a heritage industrial building in Toronto, Canada. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123819. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123819>
- Opher, T., Duhamel, M., Posen, I. D., Panesar, D. K., Brugmann, R., Roy, A., Zizzo, R., Sequeira, L., Anvari, A., & MacLean, H. L. (2021b). Life cycle GHG assessment of a building restoration: Case study of a heritage



- industrial building in Toronto, Canada. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123819. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.123819>
- Orr, J., Drewniok, M. P., Walker, I., Ibell, T., Copping, A., & Emmitt, S. (2019). Minimising energy in construction: Practitioners' views on material efficiency. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 125-136. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2018.09.015>
- Osmani, M., & O'Reilly, A. (2009). Feasibility of zero carbon homes in England by 2016: A house builder's perspective. *Building and Environment*, 44(9), 1917-1924. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2009.01.005>
- Ozorhon, B. (2013). Response of Construction Clients to Low-Carbon Building Regulations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(12), A5013001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000768](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000768)
- Pan, W., Ng, T., & Lee, J. (2014). *Research on low or zero carbon high-rise buildings*. <http://hub.hku.hk/handle/10722/227203>
- Pan, W., & Pan, M. (2019). Opportunities and risks of implementing zero-carbon building policy for cities: Hong Kong case. *Applied Energy*, 256, 113835. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113835>
- Pan, W., & Pan, M. (2021). Drivers, barriers and strategies for zero carbon buildings in high-rise high-density cities. *Energy and Buildings*, 242, 110970. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.110970>
- Panagiotidou, M., Aye, L., & Rismanchi, B. (2021). Optimisation of multi-residential building retrofit, cost-optimal and net-zero emission targets. *Energy and Buildings*, 252, 111385. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111385>
- Paone, A., & Bacher, J. P. (2018). The Impact of Building Occupant Behavior on Energy Efficiency and Methods to Influence It: A Review of the State of the Art. *Energies* 2018, Vol. 11, Page 953, 11(4), 953. <https://doi.org/10.3390/EN11040953>
- Papachristos, G. (2020). A modelling framework for the diffusion of low carbon energy performance contracts. *Energy Efficiency*, 13(4), 767-788. <https://doi.org/10.1007/S12053-020-09866-4/FIGURES/4>
- Peña, C., Civit, B., Gallego-Schmid, A., Druckman, A., Caldeira-Pires, A., Weidema, B., Mieras, E., Wang, F., Fava, J., Canals, L. M. i., Cordella, M., Arbuckle, P., Valdivia, S., Fallaha, S., & Motta, W. (2021). Using life cycle assessment to achieve a circular economy. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(2), 215-220. <https://doi.org/10.1007/S11367-020-01856-Z/METRICS>
- Peñaloza, D., Erlandsson, M., Berlin, J., Wälinder, M., & Falk, A. (2018). Future scenarios for climate mitigation of new construction in Sweden: Effects of different technological pathways. *Journal of Cleaner Production*, 187, 1025-1035. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.285>
- Persson, J., & Grönkvist, S. (2015). Drivers for and barriers to low-energy buildings in Sweden. *Journal of Cleaner Production*, 109, 296-304. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.09.094>
- Pittau, F., Krause, F., Lumia, G., & Habert, G. (2018). Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls. *Building and Environment*, 129, 117-129. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2017.12.006>
- Poel, B., van Cruchten, G., & Balaras, C. A. (2007). Energy performance assessment of existing dwellings. *Energy and Buildings*, 39(4), 393-403. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2006.08.008>
- Pomponi, F., Hart, J., Arehart, J. H., & D'Amico, B. (2020). Buildings as a Global Carbon Sink? A Reality Check on Feasibility Limits. *One Earth*, 3(2), 157-161. <https://doi.org/10.1016/J.ONEEAR.2020.07.018>
- Presidential Documents. (2015). The President Planning for Federal Sustainability in the Next Decade. In *US Executive Office of the President*.
- Rabani, M., Madessa, H. B., Ljungström, M., Aamodt, L., Løvvold, S., & Nord, N. (2021). Life cycle analysis of GHG emissions from the building retrofitting: The case of a Norwegian office building. *Building and Environment*, 204, 108159. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108159>
- Reda, F., & Fatima, Z. (2019). Northern European nearly zero energy building concepts for apartment buildings using integrated solar technologies and dynamic occupancy profile: Focus on Finland and other Northern European countries. *Applied Energy*, 237, 598-617. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.01.029>
- Renforth, P. (2019a). The negative emission potential of alkaline materials. *Nature Communications* 2019 10:1, 10(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09475-5>
- Renforth, P. (2019b). The negative emission potential of alkaline materials. *Nature Communications* 2019 10:1, 10(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09475-5>
- Resch, E., Andresen, I., Cherubini, F., & Brattebø, H. (2021). Estimating dynamic climate change effects of material use in buildings—Timing, uncertainty, and emission sources. *Building and Environment*, 187, 107399. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.107399>
- Röck, M., Hollberg, A., Habert, G., & Passer, A. (2018). LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages. *Building and Environment*, 140, 153-161. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2018.05.006>
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for

- effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114107>
- Roberts, M., Allen, s., Clarke, J., Searle, J., & Coley, D. (2023). Understanding the global warming potential of circular design strategies: Life cycle assessment of a design-for-disassembly building. *Sustainable Production and Consumption* (2023) 37 331-343. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2023.03.001>
- Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2014). Automated approach for design generation and thermal assessment of alternative floor plans. *Energy and Buildings*, 81, 170-181. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.06.016>
- Ruparathna, R., Hewage, K., & Sadiq, R. (2017). Rethinking investment planning and optimizing net zero emission buildings. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(6), 1711-1724. <https://doi.org/10.1007/S10098-017-1359-4/TABLES/7>
- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617-3631. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.014>
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012a). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, 220-232. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.01.032>
- Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012b). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. *Energy and Buildings*, 48, 220-232. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.01.032>
- Senthilkumar, A., Prabhu, L., Sathish, T., Saravanan, R., Casmir Jeyaseelan, G. Antony, Ağbulut, Ümit, Mahmoud, Z., Shaik, Saboor, & Ahamed Saleel, C. (2023). Enhancement of R600a vapour compression refrigeration system with MWCNT/TiO2 hybrid nano lubricants for net zero emissions building. *Sustainable Energy Technologies and Assessments* (2023) 56 103055. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2023.103055>
- Satola, D., Balouktsi, M., Lützkendorf, T., Wiberg, A. H., & Gustavsen, A. (2021). How to define (net) zero greenhouse gas emissions buildings: The results of an international survey as part of IEA EBC annex 72. *Building and Environment*, 192, 107619. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.107619>
- Seljom, P., Lindberg, K. B., Tomasgard, A., Doorman, G., & Sartori, I. (2017). The impact of Zero Energy Buildings on the Scandinavian energy system. *Energy*, 118, 284-296. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2016.12.008>
- Seo, J., Kim, S., Lee, S., Jeong, H., Kim, T., & Kim, J. (2022). Data-driven approach to predicting the energy performance of residential buildings using minimal input data. *Building and Environment*, 214, 108911. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.108911>
- Sesana, M. M., & Salvalai, G. (2013). Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs. *Building and Environment*, 67, 211-216. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2013.05.022>
- Sharma, B., Gatoo, A., Bock, M., Mulligan, H., & Ramage, M. (2015). Engineered bamboo: state of the art. <https://doi.org/10.1680/COMA.14.00020>, 168(2), 57-67. <https://doi.org/10.1680/COMA.14.00020>
- Shea, R. P., Worsham, M. O., Chiasson, A. D., Kelly Kissock, J., & McCall, B. J. (2020). A lifecycle cost analysis of transitioning to a fully-electrified, renewably powered, and carbon-neutral campus at the University of Dayton. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37, 100576. <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2019.100576>
- Shen, K., Ding, L., & Wang, C. C. (2022). Development of a Framework to Support Whole-Life-Cycle Net-Zero-Carbon Buildings through Integration of Building Information Modelling and Digital Twins. *Buildings* 2022, Vol. 12, Page 1747, 12(10), 1747. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12101747>
- Shen, P., Braham, W., & Yi, Y. (2019). The feasibility and importance of considering climate change impacts in building retrofit analysis. *Applied Energy*, 233-234, 254-270. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.10.041>
- Shi, C., Qu, B., & Provis, J. L. (2019a). Recent progress in low-carbon binders. *Cement and Concrete Research*, 122, 227-250. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.05.009>
- Shi, C., Qu, B., & Provis, J. L. (2019b). Recent progress in low-carbon binders. *Cement and Concrete Research*, 122, 227-250. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.05.009>
- Shirinbakhsh, M., & Harvey, L. D. D. (2021). Net-zero energy buildings: The influence of definition on greenhouse gas emissions. *Energy and Buildings*, 247, 111118. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111118>
- Singh, R., Walsh, P., & Mazza, C. (2019). Sustainable Housing: Understanding the Barriers to Adopting Net Zero Energy Homes in Ontario, Canada. *Sustainability* 2019, Vol. 11, Page 6236, 11(22), 6236. <https://doi.org/10.3390/SU11226236>
- Silvestre, J. D., De Brito, J., & Pinheiro, M. D. (2014). Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials - calculation rules, results and contribution to a "cradle to cradle" life cycle. *Journal of Cleaner Production*, 66, 37-45. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2013.10.028>
- SMPG. (2018). Implementation opinions on accelerating the development of passive ultra-low-energy buildings. In *Shijiazhuang Municipal People's Government*.
- Steven Winter Associates, I. (2016, August 2). *Net Zero Energy Buildings*. WBDG - Whole Building Design Guide. <https://www.wbdg.org/resources/net-zero-energy-buildings>
- Stevenson, F., & Kwok, A. (2020). Mainstreaming zero carbon : lessons for built-environment education and training. *Buildings and Cities*, 1(1), 687-696. <https://doi.org/10.5334/BC.84>

- Suopajarvi, H., Umeki, K., Mousa, E., Hedayati, A., Romar, H., Kemppainen, A., Wang, C., Phounglamcheik, A., Tuomikoski, S., Norberg, N., Andefors, A., Ohman, M., Lassi, U., & Fabritius, T. (2018). Use of biomass in integrated steelmaking – Status quo, future needs and comparison to other low-CO2 steel production technologies. *Applied Energy*, 213, 384–407. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.01.060>
- Swedish Green Building Council. (n.d.). Net zero carbon buildings certification. Retrieved from <https://www.sgbc.se/certifiering/nollco2/>
- Tian, Y., & Spatari, S. (2022). Environmental life cycle evaluation of prefabricated residential construction in China. *Journal of Building Engineering*, 57, 104776. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104776>
- Tirelli, D., & Besana, D. (2023). Moving toward Net Zero Carbon Buildings to Face Global Warming: A Narrative Review. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 684, 13(3), 684. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13030684>
- Too, J., Ejohwomu, O. A., Hui, F. K. P., Duffield, C., Bukoye, O. T., & Edwards, D. J. (2022). Framework for standardising carbon neutrality in building projects. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133858. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.133858>
- Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006, June 1). Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition; Preprint (Conference) | OSTI.GOV. *United States*. <https://www.osti.gov/biblio/883663>
- Tozer, L., & Klenk, N. (2018). *Urban configurations of carbon neutrality: Insights from the Carbon Neutral Cities Alliance*. 37(3), 539–557. <https://doi.org/10.1177/2399654418784949>
- Turner, K., Katris, A., & Race, J. (n.d.). *The need for a Net Zero Principles Framework to support public policy at local, regional and national levels*. <https://doi.org/10.1177/0269094220984742>
- UK Green Building Council (UKGBC). *Net Zero Carbon Buildings: A Framework Definition*; UKGBC: London, UK, 2019. <https://apo.org.au/node/234636>
- UKGBC. (2021a). Net Zero Whole Life Carbon Roadmap: A Pathway to Net Zero for the UK Built Environment. In *UK Green Building Council*.
- UKGBC. (2021b). Net Zero Whole Life Carbon Roadmap: Stakeholder Action Plan. *UK Green Building Council*.
- UKGBC. (2021c). *Net Zero Whole Life Carbon Roadmap: Technical report*.
- UNEP. (2019). *Carbon offsets are not our get-out-of-jail free card*. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org/news-and-stories/story/carbon-offsets-are-not-our-get-out-of-jail-free-card>
- UNFCCC. (2022). *UNITED NATIONS CLIMATE CHANGE ANNUAL REPORT 2021*.
- United Nations. (n.d.). *Sustainable Development*. Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development. Retrieved February 23, 2023, from <https://sdgs.un.org/goals>
- Urge-Vorsatz, D., Khosla, R., Bernhardt, R., Chan, Y. C., Verez, D., Hu, S., & Cabeza, L. F. (2020). Advances Toward a Net-Zero Global Building Sector. *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 227–269. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ENVIRON-012420-045843>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2018). *Guide to Purchasing Green Power*. <https://www.epa.gov/greenpower/guide-purchasing-green-power>
- USGBC. (2020). *LEED Zero Program Guide*.
- Vakalis, D., Diaz Lozano Patino, E., Opher, T., Touchie, M. F., Burrows, K., MacLean, H. L., & Siegel, J. A. (2021). Quantifying thermal comfort and carbon savings from energy-retrofits in social housing. *Energy and Buildings*, 241, 110950. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.110950>
- Van Der Schoor, T., & Scholtens, B. (2015). Power to the people: Local community initiatives and the transition to sustainable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 666–675. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.10.089>
- Van Gulck, L., Wastiels, L., & Steeman, M. (2022). How to evaluate circularity through an LCA study based on the standards EN 15804 and EN 15978. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 27(12), 1249–1266. <https://doi.org/10.1007/S11367-022-02099-W/TABLES/6>
- Vukotic, L., Fenner, R. A., & Symons, K. (2015). Assessing embodied energy of building structural elements. <https://doi.org/10.1680/Ensu.2010.163.3.147>, 163(3), 147–158. <https://doi.org/10.1680/ENSU.2010.163.3.147>
- Wang, C. C., Sepasgozar, S. M. E., Wang, M., Sun, J., & Ning, X. (2019). Green Performance Evaluation System for Energy-Efficiency-Based Planning for Construction Site Layout. *Energies* 2019, Vol. 12, Page 4620, 12(24), 4620. <https://doi.org/10.3390/EN12244620>
- Wei, W., & Skye, H. M. (2021). Residential net-zero energy buildings: Review and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 142, 110859. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110859>
- Wells, L., Rismanchi, B., & Aye, L. (2018). A review of Net Zero Energy Buildings with reflections on the Australian context. *Energy and Buildings*, 158, 616–628. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.10.055>
- WGBC. (n.d.). *Advancing Net Zero - World Green Building Council*. World Green Building Council. Retrieved April 2, 2023, from <https://worldgbc.org/advancing-net-zero/>
- Wong, K. din, & Fan, Q. (2013). Building information modelling (BIM) for sustainable building design. *Facilities*, 31(3), 138–157. <https://doi.org/10.1108/02632771311299412/FULL/XML>
- World Green Building Council. (2019). *Bringing embodied carbon upfront*. [www.worldgbc.org/embodied-carbon](http://www.worldgbc.org/embodied-carbon)
- Wu, X. F., Yang, C. Y., Han, W. Ch., & Pan, Z. R. (2022). Integrated design of solar photovoltaic power generation technology and building construction based on the Internet of Things. *Alexandria Engineering Journal*, 61(4), 2775–2786. <https://doi.org/10.1016/J.AEJ.2021.08.003>

- Wyns, T., & Axelson, M. (2016). The Final Frontier-Decarbonising Europe's energy intensive industries. *Institute for European Studies*. [www.ies.be](http://www.ies.be)
- Yan, H., Shen, Q., Fan, L. C. H., Wang, Y., & Zhang, L. (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Building and Environment*, 45(4), 949-955. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2009.09.014>
- Yang, T., Zhao, L., Li, W., & Zomaya, A. Y. (2020). Reinforcement learning in sustainable energy and electric systems: a survey. *Annual Reviews in Control*, 49, 145-163. <https://doi.org/10.1016/J.ARCONTROL.2020.03.001>
- Yu, S., Liu, Y., Wang, D., Bahaj, A. B. S., Wu, Y., & Liu, J. (2021). Review of thermal and environmental performance of prefabricated buildings: Implications to emission reductions in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110472. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110472>
- Zhang, L., & Zhou, J. (2015). Drivers and barriers of developing low-carbon buildings in China: Real estate developers' perspectives. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 18(3), 254-272. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2015.071177>