

Sistem Fasad Penjerap Pencemaran Udara: Satu Kajian Literatur (Air Pollution Adsorption Facade Systems: A Literature Review)

Tan Sherron, Miza Raimi, Zabidi Hamzah*, Mazlan Mohd Tahir & Nur Athirah Khalit

Jabatan Seni Bina dan Alam Bina, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina,

Universiti Kebangsaan Malaysia 43600 Bangi Selangor, Malaysia

*Corresponding author: zabidi@ukm.edu.my

Received 31 July 2024, Received in revised form 7 March 2026

Accepted 7 April 2026, Available online 30 July 2026

ABSTRAK

Artikel ini merupakan satu kajian literatur yang meneliti perkembangan teknologi sistem fasad penjerap pencemaran udara dalam konteks seni bina bandar. Fokus utama diberikan kepada penggunaan bahan canggih seperti salutan fotomangkin yang mampu menyahaktifkan bahan pencemar udara seperti nitrogen oksida dan zarah halus, serta integrasi tumbuh-tumbuhan dalam reka bentuk fasad hijau. Kajian ini dijalankan sepenuhnya melalui kaedah analisis literatur daripada pangkalan data bereputasi seperti Web of Science, Scopus, Elsevier dan MDPI, serta melalui penilaian kajian kes bangunan yang telah mengaplikasikan teknologi ini. Hasil analisis menunjukkan bahawa sistem fasad penjerap berpotensi tinggi dalam meningkatkan kualiti udara di kawasan bandar apabila digabungkan secara strategik dengan elemen tumbuh-tumbuhan. Salutan fotomangkin yang diaktifkan oleh cahaya matahari berfungsi untuk mengurai bahan pencemar secara kimia, manakala tumbuh-tumbuhan pula menyumbang kepada penjerapan semula jadi serta keselesaan visual dan mikroklimatik. Interaksi sinergi antara bahan teknologi tinggi dan elemen semula jadi ini mewakili pendekatan inovatif yang bukan sahaja menyokong agenda kelestarian alam sekitar tetapi juga meningkatkan nilai estetik seni bina. Kajian ini menyimpulkan bahawa sistem fasad penjerap pencemaran udara menawarkan penyelesaian mampan yang berpotensi besar dalam mengatasi cabaran pencemaran udara bandar melalui pendekatan reka bentuk seni bina berasaskan alam.

Kata kunci: Sistem fasad; penjerapan pencemaran udara; fasad hijau

ABSTRACT

This article presents a literature review on air-pollution-absorbing façade systems, focusing on their technological development and integration into architectural design. The study highlights the use of advanced materials such as photocatalytic coatings, which can neutralize airborne pollutants like nitrogen oxides and particulate matter, alongside the incorporation of vegetation through green façade systems. Conducted through a comprehensive desktop review, the research synthesizes findings from reputable academic databases including Web of Science, Scopus, Elsevier, and MDPI, as well as selected case studies of buildings that have implemented such systems. The review reveals that when these façade technologies are combined with greenery, they can significantly improve urban air quality by both absorbing and decomposing pollutants. Photocatalytic materials, activated by sunlight, facilitate chemical breakdown of pollutants, while vegetation contributes natural filtration and enhances thermal comfort and aesthetic appeal. The synergy between high-performance materials and biophilic design elements offers a promising approach to sustainable urban architecture. Beyond their environmental benefits, such façade systems also present architectural and socio-cultural value, especially in dense urban environments facing critical air quality challenges. The article concludes that air-purifying façades represent a viable and innovative solution for integrating environmental performance into architectural practice, thus contributing to broader goals of urban sustainability and public health.

Keywords: Facade system; air pollution adsorption; green facade

PENGENALAN

Pencemaran udara kini merupakan salah satu isu alam sekitar yang paling mendesak yang mesti ditangani pada skala seluruh dunia. Menurut pelbagai kajian, lebih daripada 90% orang tinggal di tempat yang terdedah kepada pencemaran udara (Cornelio et al. 2021). Antara bahan pencemar udara, partikulat (PM) merupakan faktor utama yang memberi kesan negatif terutamanya kesan pernafasan kepada manusia (Domingo & Rovira 2020). PM boleh datang daripada punca semula jadi dan antropogenik. Yang pertama terdiri daripada garam laut, habuk mineral, zarah gunung berapi, bioaerosol dan zarah sekunder yang diperoleh daripada transformasi atmosfera prekursor gas dan tindak balas fotokimia. Yang terakhir termasuk habuk terampai semula, ricih mekanikal, proses pembakaran, pembakaran biojisim dan pelepasan kenderaan (Zanoletti et al. 2020). PM dibahagikan kepada dua kategori berdasarkan saiz zarah: PM₁₀ ($\leq 10 \mu\text{m}$ diameter aerodinamik) dan PM_{2.5} ($\leq 2.5 \mu\text{m}$ diameter aerodinamik) (Cornelio et al. 2021). panjang-pendedahan jangka masa kepada PM_{2.5} boleh menyebabkan masalah pernafasan dan kardiovaskular dengan merujuk kepada Pertubuhan Kesihatan Sedunia (WHO). Ia boleh bertindak ke atas pencemaran PM sama ada di hulu, dengan mengawal pelepasan sumber, atau hiliran, dengan mengeluarkan zarah menggunakan pendekatan kimia, atau kejadian semula jadi, pemendapan kering dan basah, untuk mengurangkan kepekatan (Shabnam et al. 2021).

Menurut Stanaszek-Tomal (2021), pada masa ini faktor pencemaran yang paling berbahaya ialah:

1. karbon dioksida
2. karbon monoksida
3. sulfur dioksida dan nitrogen dioksida
4. merkuri dan plumbum, bioakumulasi
5. minyak mentah
6. sinaran

MATLAMAT & OBJEKTIF

Matlamat kajian adalah untuk mengkaji teknologi yang digunakan untuk mengawal pencemaran udara terutamanya dengan sistem fasad penjerap.

Objektif kajian adalah:

1. Mengenalpasti sistem fasad penjerap pencemaran udara menggunakan teknologi terkini.
2. Mengkaji integrasi seni bina dan tumbuh-tumbuhan dalam aspek kawalan pencemaran udara.

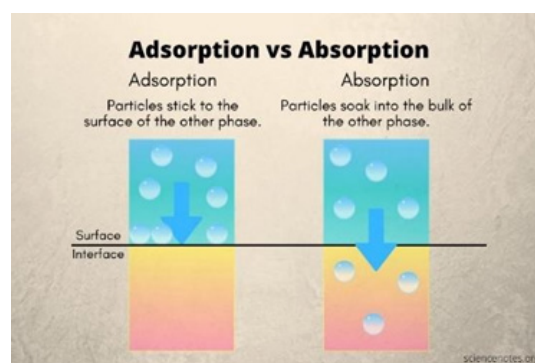
METODOLOGI

Artikel ini menggunakan kaedah analisa kandungan, seperti yang digariskan oleh Krippendorff (2013) dan Elo & Kyngäs (2008), yang membolehkan pemahaman mendalam terhadap dokumen sekunder melalui pengkategorian, pengkodan dan penafsiran kandungan secara sistematik. Rujukan pustaka daripada pangkalan data seperti Web of Science, Scopus, Elsevier dan MDPI digunakan bersama analisis kajian kes bangunan yang relevan.

Proses kajian adalah melalui kaedah kajian analisa dokumen atau analisa konten. Kaedah ini melibatkan penyelidikan, penelitian, dan penafsiran maklumat dalam dokumen atau kandungan. Ia melibatkan pemilihan dokumen yang relevan, pengkategorian, pengkodan data, analisis, dan interpretasi. Proses ini membolehkan pemahaman mendalam mengenai topik yang dikaji. Kaedah ini juga melibatkan validasi dan kebolehpercayaan temuan melalui metodologi penyelidikan yang sesuai. Rujukan pustaka seperti jurnal, buku dan prosiding tentang artikel saintifik yang terdapat dalam WOS, Scopus, Elsevier dan MDPI berkaitan topik dikaji bagi mengukuhkan dapatan kajian. Selain itu kajian kes ke atas bangunan berkaitan dilakukan untuk memahami lebih lanjut tentang aplikasi pendekatan berkaitan.

KAJIAN PUSTAKA

Penjerapan dilihat sebagai pilihan yang lebih berdaya maju kerana kesederhanaan, kemudahan operasi, kapasiti untuk bertindak balas dengan segera kepada keadaan yang berubah-ubah, kurang sensitiviti terhadap ketoksikan, dan kecekapan dan kemudahan yang tinggi. (Zanoletti et al. 2018). Perbezaan antara penjerapan dan penyerapan boleh dilihat dari Rajah 1.



RAJAH 1. Penjerapan vs penyerapan

Sumber: <https://sciencenotes.org/adsorption-vs-absorption-differences-and-examples/>

KARBON DIAKTIFKAN

Karbon teraktif ialah penyerap yang paling kerap digunakan pada masa kini, dan ia mempunyai kapasiti tinggi untuk penyerapan pewarna, bahan pencemar organik, dan logam berat (Nayak & Pal, 2017) (Jadual 1). Walau bagaimanapun, proses menghasilkan dan menjana semula karbon teraktif adalah mahal. Disebabkan oleh faktor-faktor seperti kos yang lebih tinggi, keupayaan penjana semula penyerap terhad dan isu-isu lain dengan penyerap (arang) akhir hayat, penggunaan karbon teraktif biasanya terhad. Sekatan ini mendorong penyelidik untuk mencari sorben alternatif yang diperbuat daripada hasil sampingan pertanian (daun, biji, biji, akar, dan sebagainya) yang akan banyak, murah, cekap, dan mampu menjana semula tanpa mencemarkan alam sekitar (Nayak & Pal 2017).

JADUAL 1. Bahan sorben alternatif

Bahan Sorben	Asal	Ciri Penjerapan	Rujukan
Karbon Teraktif	Komersial	Kapasiti tinggi, mahal	Nayak & Pal (2017)
Abu Dasar	Sisa industri	Mesra alam, murah	Kasina et al. (2021)
Natrium Alginat	Semula jadi	Boleh diperbaharui	Zanoletti et al. (2018)

BAHAN BERLIANG YANG INOVATIF

Menurut Cornelio et al. (2021), novel baharu dan bahan berliang tahan lama telah dicipta untuk mengeluarkan PM daripada persekitaran di bandar-bandar besar. Bahan inovatif ini penting kerana dua sebab: ia meningkatkan kualiti udara dan membolehkan produk sampingan industri digunakan semula. Perkembangan ekonomi telah menghasilkan penjana sisa berskala besar, yang telah memburukkan lagi pencemaran alam sekitar. Peralihan daripada ekonomi linear kepada ekonomi bulat adalah detik yang menentukan. Dengan menggalakkan penggunaan sumber dan kitar semula yang lebih berkesan, penggunaan semula sisa membantu memelihara sumber semula jadi dan meminimumkan pembuangan sampah. (Kasina et al. 2021). Selain itu, keupayaan untuk mencetak 3D bahan hibrid ini menunjukkan kebolehsuaiannya dan membuka kemungkinan baharu (Zanoletti, Vassura, et al. 2018). Bahan lestari hibrid baharu ini terdiri daripada bahan semula jadi dan buatan manusia yang merangkumi abu dasar, natrium alginat, asap silika dan hidrogen peroksida (Bontempi et al. 2021).

Asap silika ialah serbuk halus yang terbentuk daripada pemprosesan aloi logam ferro-silikon dan silikon, yang digunakan secara meluas dalam bahan binaan seperti konkrit, bata, simen, dan seramik. Asap silika digunakan

dalam sintesis bahan berliang inovatif hibrid ini adalah kelabu gelap. (Cornelio et al. 2021). Jika niatnya adalah untuk menggunakannya sebagai plaster dinding atau jubin bumbung, warna gelap membayangkan kekangan estetik Abu Bawah atau *Bottom Ash* (BA), produk sampingan industri, baru-baru ini dicadangkan untuk sintesis bahan untuk menyelesaikan isu ini dan kebanyakannya digunakan untuk membuat lampu -bahan berwarna. (Cornelio et al. 2020). BA dianggap menyumbang 90% sisa pepejal yang dihasilkan dalam loji insinerasi (Kasina et al. 2021). Oleh kerana komposisi kimianya (sejumlah besar Al, Si, Ca, dan Fe), abu ini sesuai untuk pengeluaran simen (Clavier et al. 2021). Menurut Cornelio et al. (2021) lagi, dari segi keupayaan memerangkap PM, bahan yang disintesis oleh Abu Bawah (BA) adalah lebih tinggi daripada bahan yang disintesis oleh asap silika.

Natrium bikarbonat dan hidrogen peroksida keduanya boleh berfungsi sebagai pembentuk liang untuk mendorong keliangan yang diperlukan dalam menangkap PM. Untuk mengelakkan rawatan haba, natrium bikarbonat digantikan dengan hidrogen peroksida. (Cornelio et al. 2021). Natrium alginat ialah bahan yang ditemui secara semula jadi, biasa, dan polisakarida kos rendah yang boleh dihasilkan dengan cekap daripada pelbagai spesies alga dan rumpai laut, dan ia telah digunakan secara meluas sebagai penyerap pewarna ionik (Zanoletti et al. 2018). Untuk menganalisis kekuatan mekanikal produk akhir, yang berdasarkan kekuatan ikatan rantai molekul alginat yang tertarik oleh kation divalen, silika telah digunakan secara meluas dalam pembinaan komposit alginat/silika. Menggabungkan alginat dengan matriks silika tak organik menawarkan pelbagai faedah dari segi kestabilan kimia dan mekanikal (Zanoletti et al. 2018).

Untuk meningkatkan penyerapan bahan pencemar, fotomangkin yang cekap harus mempunyai luas permukaan khusus yang besar. (Ghedini et al. 2019). Salutan Titania sebagai fotomangkin membantu dalam meningkatkan penguraian foto kecekapan (fotoaktiviti untuk degradasi bahan pencemar). TiO₂ ialah fotomangkin yang paling banyak dieksploitasi dalam pengurangan bahan pencemar udara kerana aktiviti fotomangkinnya yang cemerlang dalam proses pengoksidaan, tidak ketoksikan, ketersediaan yang baik, kos yang agak rendah, dan kestabilan fotokimia di bawah keadaan tindak balas. (Ghedini et al. 2019 & Zanoletti, Bilo, et al. 2018). Walau bagaimanapun, TiO₂ akan meningkatkan tenaga terwujud (EE) dan jejak karbon (CF) produk akhir (Ghedini et al. 2019). Menurut penyelidikan, nanopartikel titania ditemui pada permukaan luar matriks siliceous dan tidak mengisi sebarang liang. Sekiranya nanopartikel TiO₂ telah tertanam dalam saluran silika, bahan yang terhasil tidak akan aktif kerana titania tidak akan terdedah kepada fotoaktif dan dengan itu memungkinkan proses degradasi. (Ghedini et al. 2019).

TiO₂ mempunyai keupayaan untuk memecahkan bahan organik berbahaya, memusnahkan bakteria, dan menghilangkan bau (Farid et al. 2016).

Bahan berliang baharu yang dicadangkan adalah lebih mampan daripada karbon teraktif dari segi EE dan CF (Zanoletti, Vassura, et al. 2018).

Dalam konteks kebimbangan semasa, penebat dinding luaran atau dalaman bangunan ialah kaedah popular untuk meningkatkan kecekapan tenaga bangunan untuk membantu usaha global untuk memperbaiki alam sekitar. Songsangan kekonduksian terma digunakan untuk menilai keupayaan penebat bahan. Selain daripada kekonduksian terma, kapasiti haba mempengaruhi penebat bahan juga.

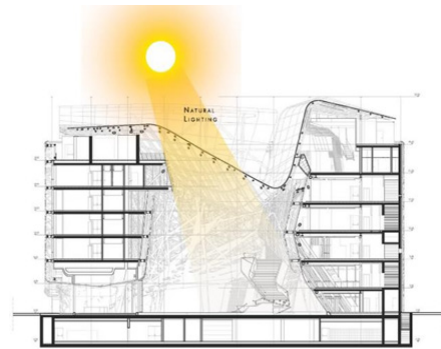
Bahan hibrid ini mempamerkan kekonduksian haba yang rendah, serupa dengan aerogel, yang sering dianggap sebagai bahan penebat terbaik yang ada. Akhirnya, tidak seperti penebat bangunan hijau yang biasa digunakan seperti bulu dan selulosa, yang memerlukan rawatan yang memakan masa, bahan ini terbukti tahan api dan kemarau (Ghedini et al. 2019).

KAJIAN KES 1: PALAZZO ITALIA, MILAN

Bangunan hidup yang sentiasa berinteraksi dengan alam sekitar (Jadual 2).



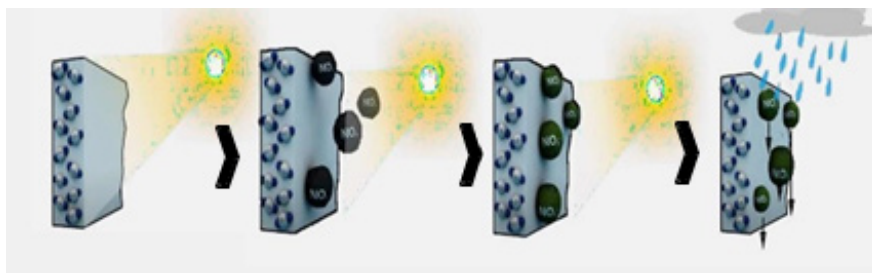
RAJAH 2. Palazzo Italia di Milan (Pandangan Sisi)



RAJAH 3. Palazzo Italia di Milan (Pandangan Keratan)
Sumber: <https://www.archdaily.com/630901/italy-pavilion-milan-expo-2015-nemesi>

JADUAL 2. Maklumat bangunan Palazzo Italia, Milan

Pereka	Nemesi Architects
Tahun	2015
Fungsi Bangunan	Pusat Penyelidikan Teknopole Manusia (Human Technopole Research Centre)
Keistimewaan	97,000 kaki persegi konkrit pintar Fasad yang menyerupai dahan pokok yang berjalin Bumbung direka dengan kaca fotovoltaiik Bangunan ini terdiri daripada simen yang mengandungi bahan aktif atau fotomangkin yang dipanggil TiO ₂ (Rajah 3) Apabila sinaran UV mengenai simen, ia bertindak balas dengan fotomangkin ini, menyebabkan bahan pencemar terurai. Sebatian berbahaya ditukar kepada hasil sampingan tidak berbahaya yang dibilas dari struktur oleh hujan dan diserap oleh bumi.



RAJAH 4. Dinding simen yang mengandungi bahan aktif atau fotomangkin TiO₂
Sumber: <https://www.archdaily.com/630901/italy-pavilion-milan-expo-2015-nemesi>

KAJIAN KES 2: HOSPITAL MANUEL GEA
GONZALES, MEXICO CITY

Bangunan hospital ini direka dengan mengutamakan kelestarian alam sekitar (Jadual 3).



(a)



(b)

RAJAH 5. (a) dan (b) Pandangan Fasad Manuel Gea Gonzales Hospital

Sumber: <https://inhabitat.com/mexico-citys-manuel-gea-gonzalez-hospital-has-an-ornate-double-skin-that-filters-air-pollution/>

JADUAL 3. Maklumat bangunan Hospital Manuel Gea Gonzales, Mexico City

Pereka	Elegant Embellishments, Berlin
Tahun	2013
Fungsi Bangunan	Bangunan Hospital

Keistimewaan
Fasad pencemar seluas 2,500 meter persegi
Sistem ini terdiri daripada cengkerang termoform yang disalut dengan fotomangkin TiO_2 .
Pigmen bertindak balas dengan cahaya ultraungu untuk meneutralkan unsur-unsur pencemaran udara
Bahan pencemar kemudiannya dipecahkan kepada komponen yang kurang berbahaya seperti karbon dioksida dan air
Kerana pigmen itu sendiri tidak merosot dari semasa ke semasa, modul boleh terus menapis udara sehingga satu dekad.
Jubin dibangunkan untuk menampung kelebihan teknik dalam salutan, memberikan lebih luas permukaan dan kecanggihan
sambil menangkap cahaya omnidirectional dalam persekitaran yang sesak atau terhad.



RAJAH 6. Prototaip Fasad Nyah Cemar
Sumber: <http://www.prosolve370e.com/home>



RAJAH 7. Butiran Fasad Nyah Cemar
 Sumber: <http://www.prosolve370e.com/home>

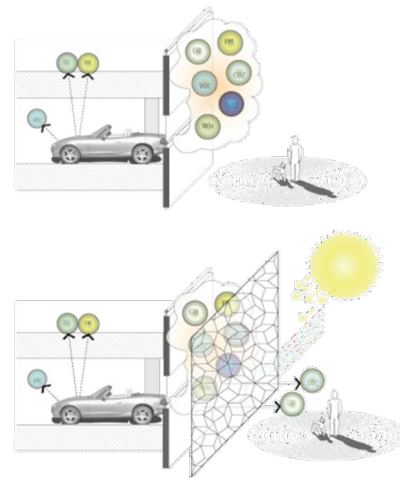
Jubinn diperbuat daripada cengkerang plastik ABS berkadar api termoform ringan dan dipegang bersama dengan pengikat keluli biasa.

Rajah 8(a) menggambarkan fasad bangunan yang menghadap jalan yang sibuk untuk memerangkap zarah-zarah pencemaran udara pada fasad. Ilusi teratas dalam

Rajah 8(b) menggambarkan bahawa enjin pembakaran menjana toksin dan bahan zarah yang berbahaya, manakala gambar bawah menunjukkan bahawa banyak hasil sampingan toksik enjin pembakaran akan ditangkap dan ditapis oleh skrin fotomangkin yang diletakkan di antara kenderaan dan manusia.



RAJAH 8(a). Butiran Fasad Nyah Cemar Berhadapan Jalan Trafik
 Sumber: <http://www.prosolve370e.com/home>



RAJAH 8(b). Proses Fasad Nyah Cemar
 Sumber: <http://www.prosolve370e.com/home>

KAJIAN KES 3: THE BIQ HOUSE – BIOREACTOR FACADE

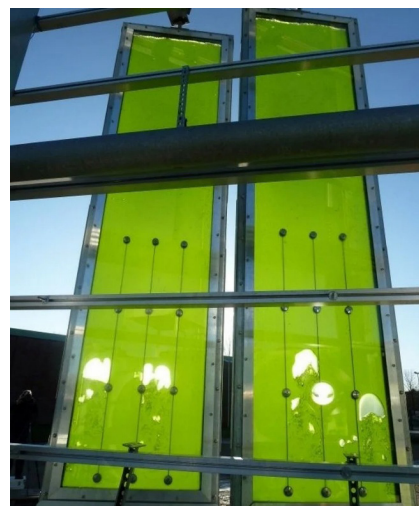
Bangunan pertama di dunia dengan fasad bioreaktif, menggunakan panel kaca yang dipenuhi mikroalga (Jadual

4). Walaupun fungsi utamanya adalah menjana tenaga dan memberikan naungan, mikroalga juga menyumbang kepada penyerapan karbon dioksida, yang mempunyai manfaat pemurnian udara.



RAJAH 9. Fasad Bioreactor BIQ House

Sumber: <https://www.re-thinkingthefuture.com/rtf-fresh-perspectives/a1234-5-examples-of-architecture-eradicating-pollution-around-the-world/>



RAJAH 10. Fasad Bioreactor BIQ House menggambarkan sistem alga yang menyumbang kepada penangkapan karbon dan penghasilan oksigen.

Sumber: <https://www.re-thinkingthefuture.com/rtf-fresh-perspectives/a1234-5-examples-of-architecture-eradicating-pollution-around-the-world/>

JADUAL 4. Maklumat bangunan The Biq House – Bioreactor Facade

Pereka	ARUP Engineering
Tahun	2013
Fungsi Bangunan	Bangunan Apartmen
Keistimewaan	Fasad terdiri daripada panel kaca yang diisi dengan mikroalga yang tergantung dalam air, membentuk fotobioreaktor. Panel-panel ini membesarkan serta membiakkan alga menggunakan cahaya matahari dan CO₂ dari persekitaran sekitar. Fasad menyerap radiasi solar, bertindak sebagai penyaring dinamik untuk mengawal suhu dalaman. Sistem ini termasuk pam dan sensor untuk mengedarkan nutrien dan mengumpulkan alga. Mengintegrasikan pemikiran buangan menjadi sumber: menggunakan CO₂, cahaya matahari, dan nutrien untuk membiakkan biomassa. Mikroalga menyerap CO₂ secara langsung dari udara, menyumbang kepada: Pengasingan karbon Peningkatan kualiti udara tempatan (walaupun dalam skala yang lebih kecil daripada fasad fotomangkin) Fasad ini tidak menyasarkan NO_x atau PM_{2.5}, seperti sistem berdasarkan TiO₂, tetapi menyumbang kepada penangkapan karbon dan penghasilan oksigen.

Rumah B.I.Q. adalah sebuah bangunan pangsapuri konkrit 15 tingkat yang fasadnya dibalut dengan biomassa alga. Biomassa ini dihasilkan dalam “bioreaktor foto,” atau panel luar telus tambahan yang dipasang pada sisi bangunan dan memberikan tenaga kepada struktur. Berdasarkan Rajah 10, bioreaktor ini dipenuhi dengan air dan dipam dengan nutrien cecair serta karbon dioksida untuk membolehkan alga tumbuh, serta untuk mengelakkan ia daripada membusuk. Panel bioreaktor inilah yang menjana tenaga yang menghidupkan struktur. Manakala alga juga boleh digunakan untuk mengesan pencemaran dan menyerap karbon dioksida sambil melepaskan oksigen.

TUMBUH-TUMBUHAN

Pencemaran juga boleh dikurangkan dengan menggunakan proses fotokatalisis dan bukannya menggunakan kaedah struktur bangunan. Dengan menghasilkan oksigen, tumbuhan boleh membantu dalam memerangi pencemaran. Terdapat beberapa elemen untuk mewujudkan pembinaan yang mampan, seperti fasad hijau, dinding hidup dan penapisan bio (Farid et al. 2016; Stanaszek-Tomal 2021). Badan tumbuh-tumbuhan yang berliang boleh memberi kesan kepada kepekatan pencemaran bersebelahan dengan mengubah aliran angin di sekelilingnya dan ia juga

mempunyai kesan positif yang ketara terhadap kualiti udara (Farid et al. 2016; Stanaszek-Tomal 2021; Abhijith et al. 2017).

Ini adalah faktor berikut yang diperlukan untuk mematuhi sistem:

1. Kawalan penapisan Udara
2. Kawalan pengagihan haba
3. Pengurusan perolehan atau kehilangan haba, kawalan penembusan air dan hujan, dan pemeluwapan permukaan

FASAD HIJAU

Menurut Farid et al. 2016, fasad hijau ialah sejenis tumbuh-tumbuhan menegak yang membolehkan tumbuhan memanjat tumbuh di atas bangunan. Ini boleh digunakan sebagai membina sampul surat dan memberi manfaat kepada manusia dan alam sekitar. Fasad hijau boleh merendahkan nitrogen oksida sehingga 20%, PM10 sebanyak 35%, suhu menurun sehingga 16°C dan menghasilkan oksigen melalui proses fotosintesis (Stanaszek-Tomal 2021). Unsur utama tumbuh-tumbuhan fasad hijau ialah; medium tumbuhan, struktur yang menyokong dan menghubungkan tumbuhan dengan fasad, serta sistem penyiraman, yang bergantung pada reka bentuk. Sistem ini adalah salah satu yang paling mudah dan paling murah, sedangkan alternatif lain memerlukan sistem yang lebih canggih dan serba boleh.



RAJAH 11. Fasad Hijau oleh Bosco Verrticale, Milan
Sumber: Linda S. Velazquez 2019

<https://www.greenroofs.com/projects/bosco-vertical-forest-milan>.

Berdasarkan Rajah 11, fasad terdiri daripada hutan yang ditanam secara menegak dengan 9000m² pokok teres. 11,000 tumbuhan yang dipilih dengan baik, termasuk tumbuhan saka dan penutup tanah, serta 5000 spesies pokok renek yang berbeza, telah ditanam.

DINDING HIDUP

Struktur modular yang ditanam atau tumbuh-tumbuhan terdiri daripada pelbagai jenis tumbuhan (Othman & Sahidin 2016; Farid et al. 2016; Giordano et al. 2017). Tumbuhan memanjat sering tumbuh di sepanjang dinding fasad, yang merangkumi bahan dan teknologi untuk mengekalkan rangkaian tumbuhan yang lebih besar, yang memuncak dalam pertumbuhan yang konsisten di atas permukaan (Giordano et al. 2017). Sistem modular terdiri daripada plastik, logam atau komponen lain yang dipasang secara menegak pada rangka kerja struktur. Sistem semacam ini biasanya memerlukan lebih banyak penyelenggaraan daripada sistem lain kerana ia mesti mengekalkan pelbagai jenis tumbuh-tumbuhan.



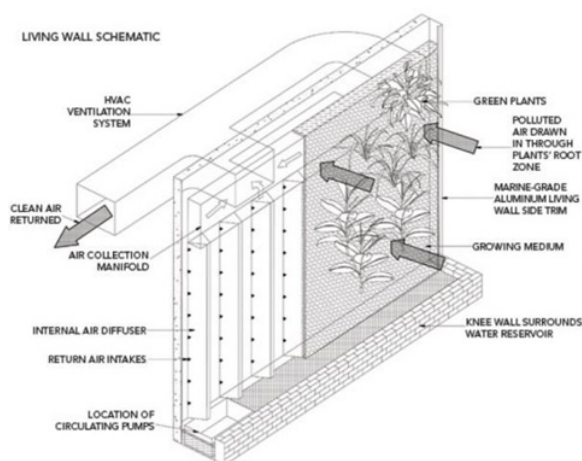
RAJAH 12. Dinding Hidup oleh Habitat Horticulture, San Francisco
Sumber: Block 2021

<https://www.dezeen.com/2021/04/21/2177-third-street-woods-bagot-living-wall/>

Hortikultur Habitat dalam Rajah 12 hanya melakukan penyelenggaraan pada bahagian bawah dinding dan peringkat ayunan digunakan dua kali setahun untuk memenuhi kawasan atas dan menggantikan mana-mana tumbuhan yang perlu diganti.

PENAPISAN BIO

Penapisan bio ialah sistem mekanikal asas yang menyediakan pengawalan haba dan penapis yang tercemar seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 8 (Othman & Sahidin 2016). Ia juga menambah baik persekitaran dalaman seperti kesan ke atas paras pencemar di udara, estetika ruang dalaman dan berfungsi sebagai pengurangan tahap tekanan yang boleh meningkatkan produktiviti kerja.



RAJAH 13. Sistem Bio-filtration

Sumber: Darlington & Arsenault 2012 <https://www.nedrlawlivingwalls.com/post/8-technology-trends-that-will-dominate-this-year>

FAKTOR DALAM MEMILIH SISTEM

Apabila memutuskan sistem yang ideal, terdapat beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan (Stanaszek-Tomal 2021):

1. Skala

Disebabkan keperluan penyelenggaraan yang tinggi, fasad bangunan yang lebih besar diperlukan untuk menutup struktur dalam tempoh yang singkat, memerlukan Sistem Panel Trellis Modular atau sistem tiga dimensi.

2. Ruang

Memandangkan loji memerlukan bekalan air dan pendedahan cahaya yang mencukupi, yang mana saiz dan lokasi bangunan perlu dipertimbangkan.

3. Pertimbangan Konsep

Reka bentuk fasad yang menggunakan 100% tumbuh-tumbuhan menegak untuk tujuan fasad dan teduhan adalah lebih sesuai untuk kos rendah yang akan menggunakan teknik dua dimensi.

PERBINCANGAN

Perbezaan utama antara penyerapan (adsorption) dan penyerapan (absorption) terletak pada mekanisme bagaimana bahan pencemar bertindak balas dengan medium. Penyerapan melibatkan kemasukan bahan pencemar ke dalam struktur dalaman sesuatu medium,

contohnya tumbuhan yang menyerap gas melalui stomata dan menukarnya dalam proses fisiologi seperti fotosintesis (Speak et al. 2012). Penjerapan, pula, merujuk kepada proses di mana bahan pencemar melekat secara fizikal atau kimia pada permukaan bahan, tanpa menembusi ke dalamnya. Ini berlaku pada bahan seperti karbon teraktif, zeolit, atau salutan fotokatalitik seperti titanium dioksida (TiO_2), yang mempunyai kawasan permukaan tinggi dan ciri keaktifan kimia.

Menurut Ghedini et al. (2019), salutan TiO_2 berfungsi sebagai bahan penyerap yang sangat berkesan kerana keupayaannya untuk memecahkan bahan organik berbahaya melalui proses fotokatalitik, apabila diaktifkan oleh cahaya UV. Teknologi ini sangat berpotensi dalam aplikasi seni bina pasif, terutamanya di kawasan bandar yang terdedah kepada pencemaran udara yang tinggi.

Sebaliknya, fasad hijau dan dinding hidup boleh dianggap sebagai penyerap semula jadi kerana tumbuh-tumbuhan yang digunakan mampu menyerap karbon dioksida (CO_2) dan gas lain melalui proses metabolik. Pada masa yang sama, permukaan daun dan batang bertindak sebagai penyerap zarah halus (PM_{10} dan $\text{PM}_{2.5}$) yang melekat secara fizikal pada permukaan tumbuhan (Barwise & Kumar, 2020). Oleh itu, pendekatan berasaskan tumbuhan sebenarnya berfungsi melalui kedua-dua mekanisme: penyerapan (gas) dan penjerapan (zarah).

Dalam konteks seni bina, gabungan bahan berliang inovatif dengan tumbuh-tumbuhan telah menunjukkan prestasi yang memberangsangkan. Contohnya, penggunaan bahan hibrid seperti MOF (Metal-Organic Frameworks) dan salutan TiO_2 dalam fasad bangunan bukan sahaja meningkatkan kapasiti penyerapan, malah juga mampu menguraikan bahan pencemar melalui reaksi kimia, sekali gus menyumbang kepada pemulihan alam sekitar bandar (Wang et al. 2021).

Beberapa kajian kuantitatif turut menyokong keberkesanan pendekatan ini. Sebagai contoh, kajian oleh Nowak et al. (2014) mendapati bahawa pokok-pokok di kawasan bandar Amerika Syarikat mampu menghilangkan sehingga 711,000 tan bahan pencemar udara setiap tahun, memberikan penjimatan ekonomi dan kesihatan yang besar. Walaupun data seperti ini lebih meluas dalam konteks landskap bandar, ia turut menunjukkan potensi elemen tumbuh-tumbuhan skala mikro, seperti pada fasad bangunan, sebagai penyelesaian jangka panjang terhadap pencemaran udara.

Secara keseluruhannya, penyepaduan tumbuh-tumbuhan dalam seni bina, apabila digabungkan dengan teknologi bahan canggih, merupakan kaedah pasif yang paling mampan dan tahan lama untuk menangani pencemaran udara. Fasad hijau bukan sahaja menawarkan fungsi ekologi dan pengawalan pencemaran, tetapi juga memperkaya nilai estetik dan kesejahteraan psikologi di persekitaran bandar.

KESIMPULAN

Secara keseluruhannya, kajian literatur ini menekankan potensi besar sistem fasad penjerap pencemaran udara dalam meningkatkan kualiti persekitaran bandar melalui pendekatan seni bina yang mampan dan inovatif. Perbandingan antara mekanisme penjerapan dan penyerapan menunjukkan bahawa kedua-dua kaedah ini memainkan peranan penting dalam menangani bahan pencemar udara, bergantung kepada jenis bahan dan teknologi yang digunakan.

Fasad hijau dan dinding hidup berfungsi secara biologi untuk menyerap gas seperti karbon dioksida dan menjerap zarah halus (PM10 dan PM2.5) pada permukaan daun, menjadikannya sebagai penyelesaian pasif yang berkesan dan tahan lama. Di samping itu, penggunaan bahan berliang inovatif seperti salutan fotokatalitik titanium dioksida (TiO₂) dan bahan berasaskan karbon teraktif memperkukuh sistem fasad dengan keupayaan kimia untuk menguraikan bahan pencemar secara aktif. Gabungan kedua-dua pendekatan semula jadi dan teknologi menjanjikan kesan sinergi terhadap pengurangan pencemaran udara bandar.

Tambahan pula, pembangunan bahan baharu yang terdiri daripada komponen organik dan bukan organik yang mudah diperoleh daripada sumber semula jadi dan hasil sampingan industri sejajar dengan prinsip ekonomi bulat, sekali gus mengurangkan impak alam sekitar dan memperkukuh aspek kemampanan dalam industri pembinaan.

Kajian ini mencadangkan bahawa integrasi sistem fasad penjerap dalam reka bentuk seni bina masa hadapan bukan sahaja mampu menyumbang kepada peningkatan kualiti udara, tetapi juga menyokong matlamat kelestarian bandar secara holistik. Justeru, usaha berterusan dalam penyelidikan bahan, pengujian keberkesanan, serta penerapan polisi dan insentif reka bentuk hijau amat penting untuk memperluaskan penggunaan teknologi ini dalam skala yang lebih besar.

PENGHARGAAN

Tiada.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Barwise, Y. & Kumar, P. 2020. Designing vegetation barriers for urban air pollution abatement: A practical review for appropriate plant species selection. *npj Climate and Atmospheric Science* 3(1): 1–19.
- Block, I. 2021. Green wall grows five storeys up San Francisco apartment block. *Dezeen*. <https://www.dezeen.com/2021/04/21/2177-third-street-woods-bagot-living-wall/>
- Bontempi, E., Sorrentino, G. P., Zanoletti, A., Alessandri, I., Depero, L. E. & Caneschi, A. 2021. Sustainable materials and their contribution to the sustainable development goals (SDGs): A critical review based on an Italian example. *Molecules* 26(5). <https://doi.org/10.3390/molecules26051407>
- Clavier, K. A., Paris, J. M., Ferraro, C. C., Bueno, E. T., Tibbetts, C. M. & Townsend, T. G. 2021. Washed waste incineration bottom ash as a raw ingredient in cement production: Implications for lab-scale clinker behavior. *Resources, Conservation and Recycling* 169: 105513. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105513>
- Cornelio, A., Zanoletti, A., Braga, R., Depero, L. E. & Bontempi, E. 2021. The reuse of industrial by-products for the synthesis of innovative porous materials, with the aim to improve urban air quality. *Applied Sciences* 11(15). <https://doi.org/10.3390/app11156798>
- Cornelio, A., Zanoletti, A., Federici, S., Depero, L. E. & Bontempi, E. 2020. Porous materials derived from industrial by-products for titanium dioxide nanoparticles capture. *Applied Sciences* 10(22): 1–11. <https://doi.org/10.3390/app10228086>
- Darlington, A. & Arsenault, P. 2012. Understanding the difference between a green vertical wall and a living wall biofilter. *Nedlaw Living Walls*. <https://www.nedlawlivingwalls.com/post/8-technology-trends-that-will-dominate-this-year>
- Domingo, J. L. & Rovira, J. 2020. Effects of air pollutants on the transmission and severity of respiratory viral infections. *Environmental Research* 187: 109650. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109650>
- Elo, S. & Kyngäs, H. 2008. The qualitative content analysis process. *Journal of Advanced Nursing* 62(1): 107–115. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2007.04569.x>
- Farid, F. H. M., Ahmad, S. S., Raub, A. B. Abd. & Shaari, M. F. 2016. Green “breathing facades” for occupants’ improved quality of life. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 234: 173–184. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.10.232>
- Ghedini, E., Menegazzo, F., Manzoli, M., di Michele, A., Puglia, D. & Signoretto, M. 2019. Multifunctional and environmentally friendly TiO₂-SiO₂ mesoporous materials for sustainable green buildings. *Molecules* 24(23). <https://doi.org/10.3390/molecules24234226>

- Ghedini, E., Menegazzo, F., Signoretto, M. & Pinna, F. 2019. Air-purifying building.
- Giordano, R., Montacchini, E., Tedesco, S. & Perone, A. 2017. Living wall systems: A technical standard proposal. *Energy Procedia* 111: 298–307. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.093>
- Kasińska, K., Kajdas, B. & Michalik, M. 2021. The leaching potential of sewage sludge and municipal waste incineration ashes in terms of landfill safety and potential reuse. *Science of the Total Environment* 791: 148313.
- Krippendorff, K. 2013. *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology*. 3rd edition. Thousand Oaks: SAGE Publications.
- Velazquez, L. S. 2019. Bosco Verticale (Vertical Forest), Milan. *Greenroofs.com*. <https://www.greenroofs.com/projects/bosco-verticale-vertical-forest-milan/>
- Nayak, A. K. & Pal, A. 2017. Green and efficient biosorptive removal of methylene blue by *Abelmoschus esculentus* seed: Process optimization and multivariate modeling. *Journal of Environmental Management* 200: 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.045>
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A. & Greenfield, E. 2014. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution* 193: 119–129.
- Othman, A. R. & Sahidin, N. 2016. Vertical greening façade as passive approach in sustainable design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 222: 845–854. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.185>
- Shabnam, N., Oh, J., Park, S. & Kim, H. 2021. Impact of particulate matter on primary leaves of *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 212: 111965. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.111965>
- Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J. & Smith, C. L. 2012. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation. *Ecological Engineering* 47: 138–143.
- Stanaszek-Tomal, E. 2021. Anti-smog building and civil engineering structures. *Processes* 9(8): 1446. <https://doi.org/10.3390/pr9081446>
- Wang, C., Liu, X., Chen, Z. & Wang, Y. 2021. Recent advances in metal-organic frameworks for air purification. *Materials Advances* 2(1): 131–147.
- Zanoletti, A., Bilo, F., Borgese, L., Depero, L. E., Fahimi, A., Ponti, J., Valsesia, A., la Spina, R., Montini, T. & Bontempi, E. 2018. SUNSPACE, a porous material to reduce air particulate matter (PM). *Frontiers in Chemistry* 6: 534. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00534>
- Zanoletti, A., Bilo, F., Federici, S., Borgese, L., Depero, L. E., Ponti, J., Valsesia, A., la Spina, R., Segata, M., Montini, T. & Bontempi, E. 2020. The first material made for air pollution control able to sequester fine and ultrafine air particulate matter. *Sustainable Cities and Society* 53: 101961. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101961>
- Zanoletti, A., Vassura, I., Venturini, E., Monai, M., Montini, T., Federici, S., Zacco, A., Treccani, L. & Bontempi, E. 2018. A new porous hybrid material derived from silica fume and alginate for sustainable. *Frontiers in Chemistry* 6: 60. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00060>