

Implimentasi Geometri BIM-GIS Terhadap Navigasi Pengguna bagi Persekitaran Dalam: Satu Kajian (Implementation of BIM-GIS Geometry for User Navigation in the Indoor Environment: A Review)

Syed Ahmad Fadhli Syed Abdul Rahman^a, Khairul Nizam Abdul Maulud^{b,c*}, Sharifah Nurul Ain Syed Mustorpha^d, Sarah Shahrudin^e & Adi Irfan Che Ani^e

^aBahagian Kadaster, Jabatan Ukur dan Pemetaan Malaysia, 50578 Kuala Lumpur, Malaysia,

^bJabatan Kejuruteraan Awam, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia,

^cPusat Pencerapan Bumi, Institut Perubahan Iklim (IPI), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia,

^dPusat Pengajian Sains Ukur dan Geomatik, Fakulti Senibina, Perancangan dan Ukur, Universiti Teknologi MARA, 40450 Shah Alam, Selangor, Malaysia

^eJabatan Seni Bina dan Alam Bina, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

*Corresponding author: knam@ukm.edu.my

Received 20 June 2021, Received in revised form 30 August 2021

Accepted 30 September 2021, Available online 30 March 2022

ABSTRACT

The integration between Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS) is frequently discussed from time to time due to the benefits offered, especially for user navigation in the building's indoor environment. Inequality in terms of 3D geometry and level of detail was identified as contributing to the difficulty in integrating the two models. Although there are limitations, various studies have been conducted to improve the method of integration so that the data can be utilised successfully. Therefore, this paper focuses on reviewing relevant research papers to (1) identify the basic information and structure of BIM and GIS models, (2) study the relationship and integration that occurs between the two types of models at the model geometry level, and (3) identify the application of the user navigation to the indoor building environment and highlight the future direction for the integration of BIM and GIS study. From this study, it can be identified that the standardised geometry schemes are the keys to the success of BIM and GIS integration. It can indirectly enhance the interoperability of data and helps in the development of a holistic data model for a broader scope of application. Particularly in the era of rapid development of machine learning, deep learning and internet of things (IoT) technology, where the application of integrated products through semantic web methods is seen to have an expansive room to grow significantly for location-based services (LBS) and emergency application.

Keywords: BIM; GIS; Integration; Building's indoor environment

ABSTRAK

Pengintegrasian antara Permodelan Maklumat Bangunan (BIM) dan Sistem Maklumat Geografi (GIS) kerap dibincangkan dari semasa ke semasa berikutan manfaat yang ditawarkan terutamanya bagi navigasi pengguna di persekitaran dalaman bangunan. Ketidakeragaman dari aspek geometri tiga dimensi dan tahap perincian dikenalpasti antara penyumbang kepada kesukaran dalam mengintegrasikan kedua-dua model tersebut. Meskipun terdapat pelbagai limitasi, pelbagai kajian telah dilaksanakan untuk menambahbaik kaedah pengintegrasian secara pintar supaya data-data tersebut dapat dimanfaatkan dengan jayanya. Oleh yang demikian, makalah ini memberi fokus untuk mengkaji makalah penyelidikan yang relevan untuk (1) mengenalpasti maklumat dan struktur asas model BIM dan GIS, (2) mengkaji hubungan dan integrasi yang berlaku antara kedua-dua jenis model tersebut di peringkat geometri model dan (3) mengenalpasti aplikasi navigasi pengguna terhadap persekitaran dalaman bangunan dan menyatakan halatuju untuk kajian melibatkan integrasi BIM dan GIS untuk masa hadapan. Dari kajian ini, dapat dikenal pasti bahawa penyelarasan skema geometri adalah kunci kejayaan integrasi BIM dan GIS. Ia secara tidak langsung dapat meningkatkan interoperabiliti data dan membantu dalam pengembangan data

model secara holistik untuk skop aplikasi yang lebih luas. Terutama dalam era perkembangan pesat pembelajaran mesin, pembelajaran mendalam dan teknologi internet of things (IoT), di mana aplikasi produk bersepadu melalui kaedah web semantik dilihat mempunyai ruang yang luas untuk berkembang secara signifikan untuk perkhidmatan berasaskan lokasi (LBS) dan aplikasi kecemasan.

Kata Kunci: BIM; GIS; Integrasi; Persekitaran dalaman bangunan

PENGENALAN

Dalam gaya hidup masa kini, manusia menghabiskan sebahagian besar kehidupan dan aktiviti mereka di dalam bangunan (Abd Malek et al. 2018). Namun, bangunan juga menjadi subjek utama bagi kemalangan atau bencana yang berpotensi mengakibatkan kebinasaan dan melibatkan jumlah korban yang besar. Menurut statistik kebakaran struktur yang dikeluarkan oleh Jabatan Bomba dan Penyelamat Malaysia (2019), pada tahun 2018, terdapat sebanyak 6,626 kes kebakaran yang melibatkan pelbagai premis dan sebanyak 95% daripada statistik kes kebakaran adalah berpunca dari kemalangan dalaman bangunan. Pengurusan persekitaran dalaman adalah sangat mencabar dengan peningkatan mendadak jumlah bangunan bertingkat ditambah dengan struktur bangunan yang semakin kompleks (Liu et al. 2018) khususnya bagi negara yang membangun seperti Malaysia.

Dengan kelebihan ketelitian dan kekayaan maklumat struktur model tiga dimensi (3D) yang ditawarkan oleh Permodelan Maklumat Bangunan (BIM) dan kejituan maklumat spatial serta kebolehan dalam menjalankan analisa yang menjadi kepakaran platform Sistem Maklumat Geografi (GIS), ianya pasti dapat memberi kelebihan kepada pengaplikasian persekitaran dalaman sesuatu bangunan (Zhu et al. 2018). Pada masa ini, terdapat banyak kajian membincangkan konsep mengintegrasikan data antara BIM dengan GIS bagi pelbagai tujuan (Abdul Rahman & Abdul Maulud, 2019). Pelaksanaan integrasi antara dua format yang berbeza memerlukan kefahaman yang mendalam tentang teras kedua-dua platform seperti perbezaan dan persamaan antara format GIS dan BIM (Abdul Rahman & Abdul Maulud 2019). Secara ringkasnya, BIM memberikan maklumat semantik bagi persekitaran dalaman tetapi mempunyai kekurangan dari segi fungsi analisa spatial manakala GIS menyediakan maklumat spatial bagi persekitaran luaran dan lengkap dengan fungsi analisa spatial (Song et al. 2017).

Oleh yang demikian, makalah ini memberi fokus kepada (1) mengenalpasti maklumat dan struktur asas model BIM dan GIS, (2) mengkaji hubungan dan integrasi yang berlaku antara kedua-dua jenis model tersebut di peringkat geometri model dan (3) mengenalpasti aplikasi navigasi pengguna terhadap persekitaran dalaman bangunan dan menyatakan halatujuan untuk kajian melibatkan integrasi BIM dan GIS untuk masa hadapan.

SISTEM MAKLUMAT GEOGRAFI (GIS)

Sistem Maklumat Geografi atau GIS merupakan teknologi terkini yang mempunyai pengkhususan dalam memahami

faktor geografi dan membuat keputusan pintar (Teo & Cho 2016). Pada dasarnya GIS berfungsi dengan memanipulasi data geospasial untuk membolehkan pengguna membaca peta dan memilih data yang diperlukan untuk projek atau tugas tertentu. GIS dikenali sebagai teknologi yang mempunyai banyak kegunaan praktikal untuk pengurusan pelbagai antaranya pengurusan bencana, pengurusan bangunan, penyelenggaraan jalan dan lain-lain (Aimi Nadira et al. 2018; Fifi Susanti et al. 2018; Kim et al. 2016). GIS menawarkan fleksibiliti kepada pengguna untuk menjalankan pelbagai kerja pengurusan seperti pengurusan ruang, visualisasi, perancangan, tindak balas kecemasan serta pelbagai aplikasi lain (Dou et al. 2020).

Oleh kerana persekitaran luaran berbeza berbanding persekitaran dalaman bangunan, kaedah yang digunakan untuk pemetaan persekitaran dalaman mungkin berbeza. Sebagai contoh, pergerakan dalaman dibataskan oleh tiga perkara utama seperti kepadatan pengguna, keluasan laluan yang statik dan navigasi pergerakan dalaman yang kurang temporal (Dou et al. 2020). Secara asasnya, pendekatan GIS terhadap persekitaran 2D digunakan untuk menggambarkan maklumat luar ruangan spatial sementara 3D yang digunakan untuk perwakilan data spatial dalaman (Zhou et al. 2020). Menurut Fadli et al. (2018), penggambaran lokasi sebenar ruang dalaman bangunan dalam 3D membantu menyampaikan maklumat spatial dalaman yang membantu dalam perancangan strategi navigasi yang lebih bijak. Sebagai contoh, dengan mengaplikasikan persekitaran 3D, maklumat tingkah laku hasil simulasi kecemasan menjadi lebih mudah untuk disampaikan kepada pengguna bagi merancang proses pemindahan ketika kecemasan (Chen et al. 2020).

PERMODELAN MAKLUMAT BANGUNAN (BIM)

Permodelan Maklumat Bangunan juga dikenali sebagai BIM adalah proses menjana dan mengurus pangkalan data digital yang berorientasikan objek dan digunakan untuk visualisasi, anggaran kos, pengurusan fasiliti dan pengesanan perlanggaran ruang spatial (Costin et al. 2018).

BIM adalah sistem digital moden yang mewakili maklumat bangunan dan penggunaannya sebagai pendekatan Berorientasi Objek atau *Object Oriented* (OO). Ianya untuk menggambarkan ciri-ciri sama ada dalam bentuk semantik atau geometri, dan tingkah laku setiap unsur bangunan dengan hubungan antara maklumat lain (Zhu et al. 2018). BIM menggunakan Kelas Asas Industri atau *Industry Foundation Classes* (IFC) sebagai piawaian terbuka dan pada dasarnya digunakan untuk menubuhkan operasi saling kendali dalam industri pembinaan.

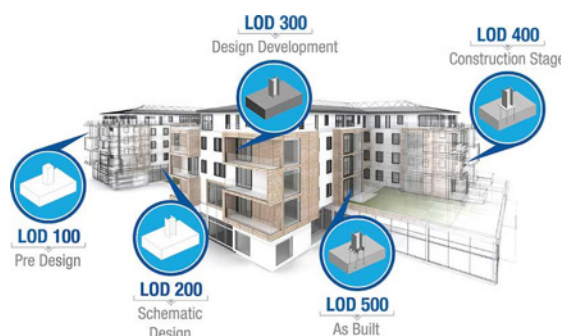
BIM menawarkan pendekatan fleksibiliti yang merangkumi semua unsur penting untuk fasa merancang model tertentu. Terdapat beberapa unsur asas BIM yang merangkumi reka bentuk keseluruhan, pembinaan dan proses pasca pembinaan dalam industri seni bina dan kejuruteraan. BIM juga mempunyai keupayaan dalam mewujudkan, mengurus, memperoleh dan berkongsi maklumat bangunan dengan platform lain yang turut melibatkan proses pembinaan untuk melakukan kerjasama perkongsian maklumat di antara mereka (Xu et al. 2016). Reka bentuk ini boleh berhubung dengan GIS dalam perkara seperti geometri, hubungan spatial, maklumat geografi dan sifat komponen bangunan. Jika maklumat operasi yang sesuai dapat dimasukkan ke dalam model ini, pengguna akhir akan memperoleh semua maklumat yang diperlukan untuk mengendalikan bangunan dalam satu pangkalan data tanpa melaksanakan sistem pengurusan aset yang berasingan (Abdul Rahman & Abdul Maulud 2019).

STRUKTUR 3D DALAM BIM DAN GIS

Untuk mengintegrasikan BIM dan GIS, pemahaman mengenai struktur sedia ada dari kedua-dua platform adalah penting. Secara umumnya BIM dan GIS mempunyai struktur skala butiran 3D yang berbeza. Untuk BIM, struktur 3D dibina dalam lima tahap asas pembangunan berdasarkan takrif yang digunakan oleh *The American Institute of Architects* (Hong et al. 2019). Semua struktur direka berdasarkan setiap fungsi dan dipecahkan kepada lima tahap utama seperti skim *IFC Level of Development (LOD)* iaitu:

1. LOD 100 - Pada reka bentuk konseptual, model ini mengandungi keseluruhan jisim bangunan. Ia boleh digunakan untuk mengkategorikan jenis-jenis bangunan serta jenis-jenis analisa seperti orientasi bangunan, jumlah, kos per kaki persegi, dan sebagainya.
2. LOD 200 - Ia dibangunkan sama seperti reka bentuk skema. Perhimpunan model dengan jumlah kuantiti, lokasi, bentuk dan orientasi. Penggunaannya membolehkan analisis sistem tertentu dilaksanakan dengan menggunakan piawaian prestasi komprehensif untuk menjadi piawai.
3. LOD 300 - Model ini sesuai untuk perancangan dokumentasi. Ia mampu menjalankan simulasi dan analisis untuk elemen dan sistem yang lengkap kerana mempunyai struktur asas yang menyerupai bentuk asal bangunan.
4. LOD 400 - Model ini sesuai untuk pembuatan dan pemasangan. Butiran LOD ini sesuai untuk digunakan diluar skop arkitek atau jurutera. Ia biasanya diimplimentasi dengan pemetaan utiliti atau permukaan.
5. LOD 500 - Tahap pembangunan ini mempunyai perincian yang sangat tinggi. Model ini sesuai untuk operasi dan penyelenggaraan fasiliti bangunan.

Secara ringkasnya, dapat difahami bahawa semakin tinggi tahap LOD, lebih banyak butiran terkandung dalam model. Pada LOD 100, satu struktur bongkah mewakili model, tetapi pada LOD 500, ia dibina sebagai model kompleks dengan pelbagai komponen, termasuk sendi pembesaran dan sebagainya (Zhu et al. 2018). Contoh-contoh model LOD BIM ditunjukkan pada Rajah 1.



RAJAH 1. Contoh model LOD BIM
Sumber: Hong et al. (2019)

Pada sudut yang lain, untuk GIS, struktur skala butiran 3D dibina berdasarkan skema yang dikeluarkan oleh *Open Geospatial Consortium (OGC) City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard* (Gröger et al. 2012; Zlatanova et al. 2020). Terdapat lima tahap asas *Level of Details (LoD)* dimana setiap perincian LoD merangkumi persekitaran luar dan dalam bangunan. Perincian LoD adalah seperti berikut:

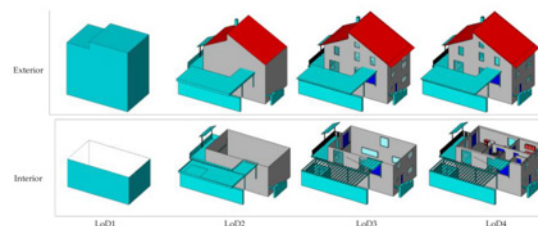
1. LoD0 - Secara fizikalnya, LoD0 merupakan tapak bangunan (*footprint*) didalam bentuk 2D. LoD0 biasanya digunakan sebagai penyimpanan maklumat sesuatu bangunan didalam persekitaran 2D.

2. LoD1 - LoD1 merupakan reka bentuk bongkah asas. Model ini mengandungi keseluruhan jisim bangunan dengan bentuk bumbung yang rata.
3. LoD2 - Ia dibangunkan dengan perincian bumbung, pintu, tingkap dan bentuk luaran yang ringkas. Model ini turut mengambil kira struktur dalaman yang asas.
4. LoD3 - Model ini dibangunkan dengan perincian bumbung, pintu, tingkap dan bentuk luaran yang lebih terperinci berbanding LoD2. Model ini turut mengambil kira struktur dalaman yang lebih terperinci serta mengambil kira struktur tambahan bangunan.

5. LoD4 - Tahap permodelan ini mempunyai perincian yang sangat tinggi. Model ini mengambil kira struktur luaran dan dalaman yang terperinci serta menyerupai struktur sebenar sesuatu bangunan. Ianya sesuai untuk operasi dan penyelenggaraan fasiliti tersebut.

Meskipun tahap perincian BIM dan GIS seakan serupa, akan tetapi model 3D CityGML adalah tidak terperinci jika

dibandingkan dengan model 3D IFC walaupun ditahap LoD4 (Amirebrahimi et al. 2016). Berbeza dengan IFC, struktur geometri 3D CityGML hanya diwakili oleh representasi batas (*boundary representation*, b-rep) sahaja. Akan tetapi ianya memberi kelebihan kepada CityGML dimana kepelbagaian maklumat boleh ditambah khususnya maklumat atribut atau hubungan semantik melalui geometri b-rep tersebut. Contoh-contoh model LoD GIS ditunjukkan pada Rajah 2.



RAJAH 2. Contoh model LoD GIS

Sumber: Gröger et al. (2012)

HUBUNGKAIT ANTARA BIM DAN GIS

Secara tradisinya, maklumat bangunan telah direka dan diselenggarakan dalam sistem *Computer Aided Design* (CAD). Sistem CAD ini pada asasnya bertujuan membina platform maklumat bangunan yang tidak wujud di dunia fizikal. Sebaliknya, GIS datang dalam konsep berbeza kerana ia dibangunkan untuk mewakili objek yang sudah wujud di sekeliling kita. Malangnya, terdapat beberapa masalah yang berlaku dalam mengintegrasikan BIM dengan maklumat GIS. Salah satunya adalah pada pemindahan maklumat geometri dari model BIM ke dalam model GIS (Song et al. 2017).

Di peringkat reka bentuk, BIM mewakili reka bentuk fizikal yang akan dibina melalui geometri terperinci yang juga mewakili struktur dalaman objek. BIM dan GIS dibina berdasarkan domain yang berlainan dan dibangunkan

untuk keperluan khusus bidang tersebut. Integrasi kedua-dua platform ini mampu menjana model sesuatu kawasan yang selari dan bebas daripada limitasi skala seperti yang digunakan oleh aplikasi pemetaan lain. Walau bagaimanapun, integrasi ini tidak mudah kerana terdapat perbezaan yang besar antara format dan pengkhususan sesatu platform itu sendiri. Ketidakselarasan hasil daripada integrasi ini dibincangkan dari segi skala spatial, tahap butiran, kaedah perwakilan geometri, kaedah penyimpanan dan akses serta ketidaksesuaian semantik di antara mereka.

Konsep khusus untuk BIM dan GIS disorot dalam Jadual 1. BIM dan GIS melengkapi antara satu sama lain. GIS membantu BIM untuk menghubungkan kepada persekitaran luar, dan kebolehan BIM meluaskan skop GIS ke persekitaran dalaman bangunan. Kombinasi ini boleh mencapai kebaikan yang lebih banyak dengan berkerjasama daripada bekerja secara berasingan.

JADUAL 1. Konsep khusus bagi BIM dan GIS

Bil.	Konsep	BIM	GIS
1.	Bidang industri	Arkitektur	Geospasial/Perancangan
2.	Perwakilan objek	Wakili objek fizikal yang belum wujud	Wakili objek fizikal yang sedia ada
3.	Maklumat persekitaran	Maklumat persekitaran dalaman	Maklumat persekitaran luar
4.	Maklumat semantik model	Maklumat terperinci	Maklumat umum
5.	Fungsi spatial	Tahap rendah	Tahap tinggi
6.	Model geometri 3D	Visualisasi tahap tinggi	Visualisasi tahap sederhana
7.	Spesifikasi visualisasi	LOD 100 – LOD 500	Tiada pengkhususan
8.	Kemampuan analisis	Memerlukan perisian pihak ketiga	Digunakan secara meluas untuk analisis

INTEGRASI GEOMETRI ANTARA BIM DAN GIS

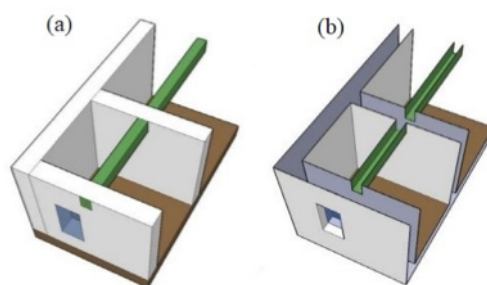
Integrasi antara BIM dan GIS sering dibincangkan dari semasa ke semasa. Dengan perkembangan pesat teknologi, teknik menterjemah data model antara BIM dan GIS berkembang pesat. Sebagai contoh, keupayaan perisian GIS dalam membaca format Revit Autodesk (.rvt) secara terus yang menjadikan visualisasi model 3D BIM digunakan

secara meluas dalam perisian GIS seperti ArcGIS Pro. Malangnya, terdapat pelbagai aspek yang perlu diambil kira sebelum mengeksploitasi data secara terus bagi kegunaan analisis 3D. Bagi integrasi tahap geometri, fokusnya adalah pada terjemahan maklumat yang berkaitan dengan geometri. Terdapat dua (2) masalah utama yang harus ditangani dalam situasi ini iaitu (1) geometri 3D dan (2) tahap perincian.

BIM dan GIS menggunakan pendekatan yang berbeza untuk mewakili geometri 3D. Sebagai contoh, untuk data IFC BIM, terdapat kepelbagaian kombinasi geometri data seperti *constructive solid geometry* (CSG), *sweep solid* (SS), dan representasi batas (*boundary representation*, b-rep) untuk mewakili geometri 3D, sementara GIS biasanya hanya menggunakan b-rep, seperti dalam CityGML dan *multipart shapefile*. Pelbagai sifat dari mekanisme penyimpanan geometri 3D yang berbeza itu menjadi penghalang terhadap transformasi data yang mudah. Limitasi platform GIS untuk membaca geometri CSG merupakan salah satu halangan untuk integrasi mudah dimana geometri CSG hanya dibaca sebagai geometri b-rep didalam platform GIS. Contoh perbezaan antara geometri CSG dan b-rep adalah seperti di Rajah 3.

Bagi tahap perincian, terdapat perbezaan yang dapat dilihat diantara LoD didalam GIS (CityGML) dengan LOD didalam BIM dalam mengenalpasti tahap perincian bagi sesuatu model. Walaupun kedua-duanya mempunyai lima tahap perincian model, namun masing-masing mempunyai perbezaan definisi bagi setiap tahap. Sebagai contoh, CityGML memberi definisi LoD0 sebagai tapak bangunan

manakala LOD100 didalam IFC memberi definisi sebagai model konseptual yang berkemungkinan tidak mewakili bentuk geometri bangunan yang akan dibangunkan (Forum, 2018). Ini menyebabkan proses integrasi secara terus tidak dapat dilaksanakan sekaligus memberi kesan terhadap proses kebolehooperasian antara BIM dan GIS. Terdapat beberapa solusi yang telah dikaji oleh pengkaji-pengkaji dahulu antaranya kajian oleh de Laat and Van Berlo (2011) dimana pengujian model IFC diintegrasikan kepada LoD3 CityGML (Noardo et al. 2020). Selain itu, Donkers et al. (2016) membangunkan kaedah untuk menghasilkan LoD 3 CityGML daripada model bandar pintar didalam format IFC dan Deng et al. (2016) berjaya mengintegrasikan bangunan model IFC kepada LoD1 hingga LoD4. Terdapat juga kajian yang menguji integrasi BIM kepada GIS didalam format *multipart shapefile* seperti yang dilakukan oleh Abdul Rahman dan Abdul Maulud (2019). Terdapat limitasi utama dikenalpasti dimana IFC mempunyai definisi geometri yang lebih daripada CityGML mahupun *multipart shapefile*. Kesannya, apabila geometri diintegrasikan, struktur “ceilings”, “column”, dan “door” digabungkan ke dalam satu lapisan data “Architecture” (Abdul Rahman & Abdul Maulud 2019).



RAJAH 3. Contoh geometri (a) CSG dan (b) b-rep
Sumber: Nagel et al. 2009)

Terdapat juga kajian-kajian terdahulu yang melibatkan integrasi geometri antara BIM dan GIS bagi tujuan pelbagai seperti kajian oleh Sani dan Rahman (2018), Atazadeh et al. (2017), Kang dan Hong (2018), Liu et al. (2017), Zhu et al. (2018), Ma dan Ren (2017) dan Pauwels et al. (2017) yang melibatkan kemajuan teknikal dalam pengintegrasian BIM dan GIS. Selain itu, kajian yang membincangkan berkenaan integrasi BIM-GIS dalam kitaran hidup *Architecture, Engineering and Construction* (AEC) seperti oleh Hu et al. (2018), Song et al. (2017), Wang et al. (2017) dan Hochmuth (2016). Terdapat juga pengaplikasian integrasi BIM-GIS dalam pengurusan tenaga seperti kajian oleh Salimzadeh dan Hammad (2017), Gocer et al (2016), Bottaccioli et al. (2016) dan Yamamura et al. (2016). Yang terakhir, kajian integrasi BIM-GIS yang melibatkan pengurusan bandar turut dilakukan seperti kajian oleh Zhou et al. (2017), Hu et al. 2016, Teo dan Cho (2016), Lyu et al. (2016) dan Amirebrahimi et al. (2016). Meskipun integrasi tahap geometri kebiasaannya dilakukan bagi tujuan visualisasi 3D sahaja, namun dapat dilihat bahawa kehilangan maklumat yang berlaku disebabkan ketidakselarisan antara kedua-dua

domain BIM dan GIS (De Laat & Van Berlo 2011; Noardo et al. 2020).

IMPLIMENTASI TERHADAP NAVIGATION PENGGUNA DI PERSEKITARAN DALAMAN

Penggunaan maklumat spatial 3D di pelbagai bidang dunia geo-saintifik untuk memaparkan landskap fizikal dan manusia di persekitaran bandar secara luas tersebar di kalangan penganalisa. Sebahagian daripadanya menumpukan kepada perancangan guna tanah 3D (Yépez Rincón & Lozano García 2017), pemantauan persekitaran (Stoter et al. 2020), kadastral 3D (Drobež et al. 2017) dan juga membangun simulasi bandar (Ilyassova et al. 2019). Kebanyakan analisa mengadaptasi keadaan dunia nyata dengan menganalisa tahap maklumat spatial dalam bidang tertentu seperti sistem pengurusan kecemasan (Chen et al. 2020), pengangkutan (Fonseca et al. 2017) dan pemantauan alam sekitar dalaman (Cheliotis 2020). Namun, makalah ini akan memberi tumpuan terhadap aplikasi yang

melibatkan navigasi pengguna bagi persekitaran dalam secara 3D. Secara umumnya terdapat dua (2) aplikasi yang mencerminkan navigasi pengguna dipersekitaran dalaman yang melibatkan data BIM-GIS iaitu *Location-Based Services* (LBS) dan analisa keselamatan.

PERKHIDMATAN BERASASKAN LOKASI (LBS)

Perkhidmatan berasaskan lokasi (LBS) membawa bermaksud perkhidmatan yang disediakan berdasarkan lokasi geografi yang ditentukan oleh peranti mudah alih (Huang et al. 2018). LBS merupakan salah satu perkhidmatan yang boleh digunakan oleh pengguna berdasarkan keperluan atau input yang ditetapkan oleh pengguna sebagai contoh navigasi dalaman bangunan (D'Roza & Bilchev 2003; Liu et al. 2017). Ianya berbeza dengan kaedah tradisional (Isikdag et al. 2008; Wang et al. 2019) dimana navigasi dalaman bangunan bergantung kepada visualisasi peta lokasi 2D. Akan tetapi, apabila melibatkan bangunan yang sedang dalam proses pembinaan, butiran seni bina dan kejuruteraan, seperti maklumat struktur semasa dalaman bangunan dan kawasan berbahaya diperlukan untuk membuat keputusan yang berkesan (Song et al. 2017).

Integrasi antara BIM dan GIS membuka ruang untuk memperluaskan skop LBS didalam dimensi 2D kepada 3D, khususnya di persekitaran dalaman bangunan (Li 2012; Liu et al. 2021). Sebagai contoh, terdapat beberapa cadangan bagi peningkatan respon dari aspek masa oleh Shayeganfar, et al. (2008) melalui penyelesaian navigasi dalaman yang lebih pantas (Liu et al. 2021) Ia menggabungkan BIM dan struktur halangan pengguna menggunakan teknologi web semantik. Kaedah penyatuan berasaskan teknologi web semantik membolehkan penukaran dua arah antara BIM dan GIS (Liu et al. 2017). Matlamat utama web semantik adalah untuk membolehkan data dikongsi dengan berkesan oleh masyarakat yang lebih luas, dan diproses secara automatik oleh alat secara automatik dan juga secara manual. Selain itu, Hwang et al. (2012) dan Zverovich et al. (2016) membangunkan sistem navigasi dalaman dengan memberi tumpuan kepada pembangunan alat bagi pengintegrasian BIM dan GIS (O'Donovan 2019). Selain daripada perwakilan terperinci bangunan, IndoorGML (Hwang et al. 2012; Li et al. 2016) mencadangkan penambahbaikan navigasi persekitaran dalaman bangunan dengan menggunakan pengenalan frekuensi radio (RFID) atau rangkaian tanpa wayar dalaman yang mampu meningkatkan ketepatan bagi kedudukan dalaman ruangan secara masa nyata dengan tepat (Truijens et al. 2014; Lee et al. 2018).

Aplikasi lain termasuk pengukuran laluan pejalan kaki di bangunan (Gwang-Gook et al. 2008; Amirebrahimi et al. 2016), pemantauan dan pelaporan aktiviti pembinaan bangunan (Shahi et al. 2013; Zhong et al. 2017) dan integrasi bagi tujuan analisa navigasi ruang. Sebagai contoh, Abdul Rahman et al. (2020a) menggabungkan elemen navigasi dalaman bangunan dengan simulasi pergerakan pengguna bagi merangka pengujian terhadap struktur susun atur bangunan. Pengujian tersebut mengaplikasikan model

yang diintegrasikan daripada BIM didalam platform GIS yang menekankan perincian tahap geometri dan semantik yang tepat untuk mendapatkan keputusan yang optimum. Walau bagaimanapun, pemeliharaan privasi diperlukan untuk pengaplikasian LBS terhadap BIM-GIS berikutan pelbagai pihak berkepentingan berkemungkinan memiliki hak akses ke maklumat yang dikongsi di seluruh persekitaran projek (Sengupta et al. 2011; Mahamadu et al. 2013; Liu et al. 2017).

KECEMASAN DAN KESELAMATAN

Selain daripada pengaplikasian LBS, integrasi antara BIM dan GIS turut membantu dalam pertimbangan keselamatan pembinaan yang lebih lengkap seperti yang dinyatakan oleh Zhou, et al. (2012) (Li et al. 2018). Bansal (2011) membentangkan mengenai batasan simulasi BIM terhadap proses pembinaan untuk pencegahan bahaya, seperti kurangnya pemodelan topografi dan analisis geospasial (Wang et al. 2019). Permodelan 3D GIS membantu dengan menilai potensi keselamatan dalam persekitaran dalaman dan sekitarnya dengan memberikan gambaran keseluruhan projek pembinaan (Akram et al. 2019). Sebagai contoh, simulasi 3D kecemasan berasaskan GIS yang dibangunkan oleh Bansal (2011) untuk meramalkan lokasi yang berbahaya dan tindakan yang boleh diambil atau diperlukan untuk tujuan perancangan keselamatan. Penggunaan pangkalan data GIS digunakan untuk membantu dalam menganalisis lokasi bahaya pembinaan (Bansal 2011; Wang et al. 2019).

Pada sudut yang lain, BIM dapat mengenalpasti masalah dari aspek keselamatan pembinaan dengan menggunakan maklumat yang diperolehi dari fasa reka bentuk (Gao et al. 2019). Selain daripada itu, algoritma pengesanan keselamatan secara automatik dibangunkan oleh Zhang et al. (2013) (Gao et al. 2019). Algoritma itu berkebolehan untuk menganalisa tahap keselamatan dan bahaya dalam sistem BIM, dan mencadangkan kaedah pencegahan yang sesuai. Abdul Rahman et al. (2020b) membentangkan kajian berkenaan kesan faktor pra-pemindahan pengguna ketika kecemasan. Penggunaan data-data demografik dan interaksi fizikal ditekankan dalam kajian tersebut. Selain itu, Abdul Rahman et al. (2021) turut mengkaji kesan parameter dinamik daripada analisa spatial ketika proses pemindahan pengguna semasa kecemasan dengan mengaplikasikan model geometri daripada BIM didalam platform GIS. Penggunaan model geometri BIM tersebut bertujuan untuk memastikan simulasi *Fruin's Level of Service* (LOS) yang digunakan menyerupai situasi sebenar ketika berada di bangunan tersebut.

Huang et al. (2021) menghubungkan pendekatan BIM dan GIS secara pembelajaran mesin dalam pengurusan pembinaan terowong dan bawah tanah. Isikdag et al. (2008) turut menggunakan gabungan BIM dan GIS untuk melaksanakan kajian terhadap operasi pengurusan tindak balas kebakaran, dan sistem ini juga merangkumi aspek pemilihan lokasi (Wang et al. 2019). Penerapan maklumat

semantik seperti pelan lantai serta maklumat geometri bangunan dilaksanakan bagi mengoptimumkan pemilihan lokasi dan tindak balas kecemasan bagi kajian tersebut. Aplikasi serupa juga dapat dikenal pasti melalui kajian yang dilaksanakan oleh Tashakkori et al. (2015) (Chen et al. 2021). Di samping itu, analisis laluan selamat dilaksanakan untuk menilai persekitaran pejalan kaki di Amerika Syarikat

yang merangkumi persekitaran dalaman dan luar bangunan. Penerangan eksplisit mengenai kemampuan persekitaran pejalan kaki di sekolah rendah turut diberi fokus melalui pengintegrasian BIM dan GIS (Kim et al. 2016). Antara contoh kajian lain aplikasi persekitaran dalaman 3D yang telah dilaksanakan adalah seperti di Jadual 2.

JADUAL 2. Aplikasi kajian persekitaran dalaman 3D

Bil.	Pengkaji (Tahun)	Platform		Dimensi		Maklumat		Aplikasi
		BIM/CAD	GIS	2D	3D	Geometri	Semantik	
1	Zverovich et al. (2016)	✓	✓		✓	✓	✓	Kecemasan
2	Cheng et al. (2017)	✓				✓	✓	Kecemasan
3	Xu et al. (2016)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Kecemasan
4	Xu et al. (2017)	✓			✓	✓	✓	LBS/Navigasi
5	Diakité & Zlatanova (2018)	IFC	✓		✓	✓		LBS/Navigasi
6	Wu & Zhang (2016)	✓	✓		✓	✓		Kecemasan
7	Vandecasteele et al. (2017)	✓			✓	✓	✓	Kecemasan & navigasi
8	Tsiliakou & Dimopoulou (2016)	✓	✓		✓	✓	✓	LBS/Navigasi
9	Teo & Cho (2016)	✓	✓		✓	✓	✓	LBS/Navigasi
10	Boguslawski et al. (2016)	✓			✓	✓	✓	Kecemasan
11	Jamali et al. (2016)	✓	✓		✓	✓		LBS/Navigasi

HALA TUJU UNTUK KAJIAN DI MASA HADAPAN DAN KONKLUSI

BIM dan GIS mentafsirkan pemodelan 3D dari dua perspektif yang berbeza meskipun kedua-duanya mempunyai beberapa aspek yang sama antara satu sama lain. Halatuju dan konklusi bagi makalah ini dibahagi kepada tiga (3) bahagian iaitu (1) halatuju integrasi BIM-GIS, (2) halatuju aplikasi LBS dan keselamatan dan konklusi.

HALA TUJU INTEGRASI BIM-GIS

Berdasarkan perbincangan yang telah dilakukan didalam makalah ini, dapat dilihat bahawa meskipun jurang perbezaan antara BIM dan GIS semakin mengecil, namun batasan dan potensi turut berkembang pada masa yang sama terhadap integrasi BIM dan GIS di masa hadapan. Pada masa yang sama, peningkatan jumlah aktiviti pengintegrasian BIM dan GIS juga adalah signifikan. Walau bagaimanapun, dapat dilihat masalah kehilangan dan perubahan maklumat semasa pengintegrasian geometri masih serius. Ini sebahagiannya disebabkan oleh matlamat pembangunan kedua sistem yang berbeza.

Transformasi antara bentuk geometri 3D yang lain, seperti SS dan CSG ke b-rep dari segi geometri perlu diberi tumpuan bagi mencapai transformasi geometri yang lancar dari IFC kepada CityGML. Selain itu, penyelarasan tahap perincian bagi IFC dan CityGML juga perlu diberi

perhatian lebih untuk mencapai aliran data antara BIM dan GIS yang harmoni. Penyelidikan masa hadapan perlu menumpukan perhatian pada pengembangan data model yang akan bersifat holistik kerana kebanyakan model yang dibangunkan lebih bersifat khusus untuk sesuatu aplikasi. Pada dasarnya, integrasi BIM dan GIS di masa depan perlu menyasarkan kebolehpayaan interoperabiliti di peringkat data agar proses peintegrasian maklumat lebih lancar untuk visualisasi dan analisis yang lebih efektif.

HALA TUJU APLIKASI LBS DAN KESELAMATAN

Seiring dengan perkembangan teknologi internet atau *internet of thing* (IoT) yang pesat, terdapat sebilangan besar integrasi yang dibina dengan bantuan teknologi web. Hasil integrasi yang baik telah dicapai dengan kaedah berasaskan perkhidmatan internet (*internet services*) dalam mengurangkan kehilangan maklumat. Namun, kerana fleksibiliti yang rendah, ruang untuk berkembang yang sempit dan kos perkhidmatan yang tinggi, ia tidak begitu popular seperti teknologi web semantik, yang memberikan penyelesaian integrasi yang lebih umum. Dapat diakui bahawa masa depan integrasi BIM dan GIS melalui teknologi web semantik masih cerah, kerana kajian terhadap integrasi model 3D melalui kaedah web semantik dilihat dapat menarik perhatian ramai pengkaji untuk menumpukan perhatian pada bidang ini.

Pembangunan aplikasi BIM dan GIS berasaskan papan pemuka (*dashboard*) disokong dengan medium sumber terbuka dapat menyelesaikan masalah dalam pendekatan menyeluruh dan pantas. Pelaksanaan simulasi berdasarkan LBS dan keselamatan dapat ditumpukan dengan lebih terperinci berikutan maklumat model yang digunakan lebih bersifat langsung berbanding penelitian data secara fizikal. Tambahan pula, kebolehpayaan teknologi web semantik untuk mengambilkira kaedah pembelajaran mesin (*machine learning*) dan pembelajaran mendalam (*deep learning*) mampu meningkatkan lagi hasil analisis yang dijalankan melalui pendekatan BIM dan GIS. Akhir sekali, keterbukaan dan kerjasama adalah kunci kejayaan integrasi BIM dan GIS.

KESIMPULAN

Perbincangan yang digariskan dalam makalah ini tidak terhad terhadap teori BIM-GIS sahaja. Ianya menumpukan kepentingan kefahaman dan penyediaan terhadap geometri BIM-GIS untuk diaplikasikan bagi tujuan navigasi persekitaran dalaman. Ianya sangat penting dimana melalui makalah ini juga, berbagai aplikasi melalui integrasi BIM dan GIS telah dibentang dan menunjukkan potensi besar produk integrasi untuk dimanipulasikan demi kepentingan umum. Hala tuju yang disimpulkan mengambilkira faktor-faktor terkini bagi memastikan perkembangan teknologi khususnya dalam arena BIM-GIS dapat diteruskan dengan lebih efektif dan memenuhi kehendak semasa.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Institut Perubahan Iklim, Universiti Kebangsaan Malaysia atas pembiayaan (KRA-2018-019 dan DIP-2021-006) dan Jabatan Ukur dan Pemetaan Malaysia atas bimbingan semasa menjalankan penyelidikan ini.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada

RUJUKAN

- Abd Malek, M. A., Ali, A. S., Baharum, M. R. & Zulkarnain, N. 2018. Sustainable asset management on decision making factors of building retrofitting. *Journal of Building Performance* 9(2): 1-4.
- Abdul Rahman, S. A. F. S., Abdul Maulud, K. N., Pradhan, B., Mustorpha, S. N. A. S. 2020a. Planning and evaluation of user evacuation through 3D emergency response simulation. *Geografia-Malaysian Journal of Society and Space* 16(3).
- Abdul Rahman, S. A. F. S., Abdul Maulud, K. N., Pradhan, B., Mustorpha, S. N. A. S. & Ani, A. I. C. 2021. Impact of evacuation design parameter on users' evacuation time using a multi-agent simulation. *Ain Shams Engineering Journal*.
- Abdul Rahman, S. A. F. S., Abdul Maulud, K. N., Syed Mustorpha, S. N. A., & Abdul Halim, N. Z. 2020b. Implication of pre-evacuation time based on 3D evacuation simulation by integrated BIM and GIS. *International Journal of Advanced Science and Technology* 29(5): 6988-7002.
- Abdul Rahman, S. A. F. S. & Abdul Maulud, K. N. 2019. Approaching BIM-GIS integration for 3D evacuation planning requirement using multipatch geometry data format. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 385: 012033.
- Aimi Nadira Mohd Safie, Khairul Nizam Abdul Maulud, Wan Shafrina Wan Mohd Jaafar, Abdul Aziz Ab Rahman, Faiz Arif, Muhammad Mukhlisin, Othman Jaafar. 2018. Auditing road maintenance work using unmanned aerial vehicle. *Jurnal Kejuruteraan SI* 1(5): 23- 27.
- Akram, R., Thaheem, M. J., Nasir, A. R., Ali, T. H., & Khan, S. 2019. Exploring the role of building information modeling in construction safety through science mapping. *Safety Science* 120: 456-470.
- Amirebrahimi, S., Rajabifard, A., Mendis, P. & Tuan, N. 2016. A BIM-GIS integration method in support of the assessment and 3D visualisation of flood damage to a building, *Journal of Spatial Science* 61(2): 317-350.
- Amirebrahimi, S. Rajabifard, A. Mendis, P. Ngo, T. 2016. A BIM-GIS integration method in support of the assessment and 3D visualisation of flood damage to a building. *J. Spat. Sci.* 61: 317-350
- Atazadeh, B., Rajabifard, A. & Kalantari, M. 2017. Assessing performance of three BIM-based views of building information systems for communication and management of vertically stratified legal interests, *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6(7).
- Bansal, V. 2011. Application of geographic information systems in construction safety planning. *Int. J. Project Manag.* 29: 66-77.
- Boguslawski, P., Mahdjoubi, L., Zverovich, V. & Fadli, F. 2016. Automated construction of variable density navigable networks in a 3D indoor environment for emergency response. *Autom. Constr.* 72(2): 115-128.
- Bottaccioli, L., Aliberti, A., Ugliotti, F. M., Osello, A. E. Macii, Patti, E. & Acquaviva, A. 2017. Building energy modelling and monitoring by integration of IoT devices and building information models, *41st IEEE Annual Computer Software and Applications Conference*, 914-922.
- Cheliotis, K. 2020. An agent-based model of public space use. *Computers, Environment and Urban Systems* 81: 101476.
- Chen, H., Hou, L., Zhang, G. K., & Moon, S. 2021. Development of BIM, IoT and AR/VR technologies for fire safety and upskilling. *Automation in Construction* 125: 103631.
- Chen, Y., Wang, C., Hui Yap, J. B., Li, H. & Zhang, S. 2020. Emergency evacuation simulation at starting connection of cross-sea bridge: Case study on Haicang Avenue Subway Station in Xiamen Rail Transit Line. *Journal of Building Engineering*: 101163.
- Cheng, M. Y., Chiu, K. C., Hsieh, Y. M., Yang, I. T., Chou, J. S., & Wu, Y. W. 2017. BIM integrated smart monitoring technique for building fire prevention and disaster relief. *Automation in Construction* 84: 14-30.

- Costin, A., Adibfar, A., Hu, H., Chen, S. S. 2018. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Automation in Construction* 94: 257–281.
- De Laat, R. & Van Berlo, L. 2011. Integration of BIM and GIS: The development of the CityGML GeoBIM extension. In *Advances in 3D Geo-Information Sciences*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- Deng, Y., Cheng, J. C. & Anumba, C. 2016. Mapping between BIM and 3D GIS in different levels of detail using schema mediation and instance comparison. *Autom. Constr.* 67: 1–21.
- Diakit , A. A., & Zlatanova, S. 2018. Spatial subdivision of complex indoor environments for 3D indoor navigation. *International Journal of Geographical Information Science* 32(2): 213-235.
- Donkers, S. Ledoux, H. Zhao, J. & Stoter, J. 2016. Automatic conversion of IFC datasets to geometrically and semantically correct CityGML LOD3 buildings. *Trans. GIS* 20: 547–569.
- Dou, S. Q., Zhang, H. H., Zhao, Y.Q., Wang, A.M., Xiong, Y. T. & Zuo, J. M. 2020. Research on construction of spatio-temporal data visualisation platform for GIS and BIM fusion. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-3/W10: 555– 563,
- Drobez, P., Fras, M. K., Ferlan, M., & Lisec, A. 2017. Transition from 2D to 3D real property cadastre: The case of the Slovenian cadastre. *Computers, Environment and Urban Systems* 62: 125–135.
- D’Roza, T. & Bilchev, G. 2003. An overview of location-based services. *BT Technol. J.* 21: 20–27.
- Fadli, F., Kutty, N., Wang, Z., Zlatanova, S., Mahdjoubi, L., Boguslawski, P., & Zverovich, V. 2018. Extending indoor open street mapping environments to navigable 3D CityGML building models: Emergency response assessment, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4: 161–168.
- Fifi Susanti Sjafrı, Khairul Nizam Abdul Maulud, Wan Shafrina Wan Mohd Jaafarb Faiz Arif, Abdul Aziz Ab Rahman, Muhammad Mukhlisin. 2018. Development of Road Maintenance Inventory in UKM by using Aerial Images, *Jurnal Kejuruteraan SI* 1(2) 2018: 65- 75.
- Fonseca, J. ., Est vez-Mauriz, L., Forgaci, C., & Bj rling, N. 2017. Spatial heterogeneity for environmental performance and resilient behavior in energy and transportation systems. *Computers, Environment and Urban Systems* 62: 136–145.
- Forum, B. 2018. Level of Development Specification. Available online: <http://bimforum.org/loa/> (accessed on 19 June 2021).
- Gao, H., Koch, C., & Wu, Y. 2019. Building information modelling based building energy modelling: A review. *Applied Energy* 238: 320-343.
- Gocer, O., Hua, Y. & Gocer, K. 2016. A BIM-GIS integrated pre-retrofit model for building data mapping, *Building Simulation* 9(5): 513–527.
- Gr ger, G., Kolbe, T., Nagel, C. & H fele, K. 2012. OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard, version 2.0; OGC Doc; Open Geospatial Consortium: Wayland, MA, USA.
- Gwang-Gook, L., Byeoung-su, K., Kee-Hwan, K., Hyoung-ki, K., Ja-Young, Y., Jae-Jun, K. & Whoi-Yul, K. 2008. Prototype development of a spatial information management system for large-scale buildings. In *Proceedings of the FGCNS ‘08. Second International Conference on Future Generation Communication and Networking Symposia*, Hainan, China, 125–129.
- Hochmuth, M. 2016. Parameterised bridge design - Conceptual, preliminary and detailed design, *Bautechnik* 93(3): 162-U99.
- Hong Y., Hammad A.W.A. & Akbarnezhad A. 2019. Forecasting the net costs to organisations of Building Information Modelling (BIM) implementation at different levels of development (LOD), *ITcon Vol. 24, Special issue Virtual, Augmented and Mixed: New Realities in Construction*, 588-603
- Hu, Z., Tian, P., Li, S. & Zhang, J. 2018. BIM-based integrated delivery technologies for intelligent MEP management in the operation and maintenance phase, *Advances in Engineering Software* 115: 1–16.
- Huang, H., Gartner, G., Krisp, J. M., Raubal, M., & Van de Weghe, N. 2018. Location based services: ongoing evolution and research agenda. *Journal of Location Based Services* 12(2): 63-93.
- Huang, M. Q., Nini , J., & Zhang, Q. B. 2021. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: current status and future perspectives. *Tunnelling and Underground Space Technology* 108: 103677.
- Hwang, J.-R., Kang, H.-Y. & Choi, J.-W. 2012. Development of an editor and a viewer for indoorgml. In *Proceedings of the Fourth ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness*. New York, NY, USA.
- Ilyassova, A., Kantakumar, L. N. & Boyd, D. 2019. Urban growth analysis and simulations using cellular automata and geo-informatics: Comparison between Almaty and Astana in Kazakhstan. *Geocarto International*, 1–16.
- Isikdag, U., Underwood, J. & Aouad, G. 2008. An investigation into the applicability of building information models in geospatial environment in support of site selection and fire response management processes. *Adv. Eng. Inf.* 22: 504–519.
- Jabatan Bomba dan Penyelamat Malaysia. 2019. Statistik kebakaran struktur disiasat mengikut jenis premis bagi tahun 2018. <http://www.bomba.gov.my/index.php/pages/view/544>
- Jamali, A., Abdul Rahman, A. & Boguslawski, P. 2016. 3D topological indoor building modeling integrated with open street map. *ISPRS—International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42(2): 111–117.
- Kang, T.W. & Hong, C.H. 2018. IFC-CityGML LOD mapping automation using multiprocessing-based screen-buffer scanning including mapping rule, *KSCE Journal of Civil Engineering* 22(2): 373–383.
- Kim, J.I., Koo, B., Suh, S. & Suh, W. 2016. Integration of BIM and GIS for formal representation of walkability for safe routes to school programs. *KSCE J. Civ. Eng.* 20: 1669–1675.

- Lee, C. Y., Chong, H. Y., & Wang, X. 2018. Streamlining digital modeling and building information modelling (BIM) uses for the oil and gas projects. *Archives of Computational Methods in Engineering* 25(2): 349-396.
- Li, K.-J., Lee, J., Zlatanova, S. & Morley, J. 2016. Indoorgml SWG. Available online: <http://www.opengeospatial.org/projects/groups/indoorgmlswg> (accessed on 19 June 2021).
- Li, X., Yi, W., Chi, H. L., Wang, X., & Chan, A. P. 2018. A critical review of virtual and augmented reality (VR/AR) applications in construction safety. *Automation in Construction* 86: 150-162.
- Li, Y. 2012. Building information model for 3D indoor navigation in emergency response. *Adv. Mater. Res.* 368: 3837-3840
- Liu, L., Li, B., Zlatanova, S. & Liu, H. 2018. The path from BIM to a 3D Indoor framework – A requirement analysis. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42: 1-5.
- Liu, L., Li, B., Zlatanova, S., & van Oosterom, P. 2021. Indoor navigation supported by the Industry Foundation Classes (IFC): A survey. *Automation in Construction* 121: 103436.
- Liu, X., Wang, X. Wright, G., Cheng, J.C.P., Li, X. & Liu, R. 2017. A state-of-the-art review on the integration of building information modeling (BIM) and geographic information system (GIS), *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6(2).
- Lyu, H., Wang, G., Shen, J., Lu, L. & Wang, G. 2016. Analysis and GIS mapping of flooding hazards. *Water* 8(10).
- Ma, Z. & Ren, Y. 2017. Integrated application of BIM and GIS: An overview, *Creative Construction Conference*, 1072-1079.
- Mahamadu, A.M., Mahdjoubi, L. & Booth, C. 2013. Challenges to BIM-cloud integration: Implication of security issues on secure collaboration. In *Proceedings of the 2013 IEEE 5th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*. Bristol, UK.
- Nagel, C., Stadler, A., Kolbe, T. H. 2009. Conceptual requirements for the automatic reconstruction of building information models from uninterpreted 3D models. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34.
- Noardo, F., Ellul, C., Harrie, L., Overland, I., Shariat, M., Arroyo Ogori, K., & Stoter, J. 2020. Opportunities and challenges for GeoBIM in Europe: developing a building permits use-case to raise awareness and examine technical interoperability challenges. *Journal of Spatial Science* 65(2): 209-233.
- O'Donovan, J. 2019. Supporting the Integration of Building Data and Geospatial Data (Doctoral dissertation, Trinity College).
- Pauwels, P., Zhang, S. & Lee, Y.-C. 2017. Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview, *Automation in Construction* 73: 145-165.
- Salimzadeh, N. & Hammad, A. 2017. High-level framework for GIS-based optimisation of building photovoltaic potential at urban scale using BIM and LiDAR, *International Conference on Sustainable Infrastructure*, 123-134.
- Sani, M. J., & Rahman, A. A. 2018. GIS and BIM integration at data level: A review. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42(4/W9).
- Sengupta, S., Kaulgud, V. & Sharma, V.S. 2011. Cloud computing security-trends and research directions. In *Proceedings of the 2011 IEEE World Congress on Services (SERVICES)*, Washington, DC, USA, 524-531.
- Shahi, A., West, J.S. & Haas, C.T. 2013. Onsite 3D marking for construction activity tracking. *Autom. Constr.* 30: 136-143
- Shayeganfar, F., Anjomshoaa, A. & Tjoa, A. 2008. A smart indoor navigation solution based on building information model and google android. In *Computers Helping People with Special Needs*; Springer: Berlin, Germany.
- Song, Y., Wang, X., Tan, Y., Wu, P., Sutrisna, M., Cheng, J., & Hampson, K. 2017. Trends and opportunities of BIM-GIS integration in the architecture, engineering and construction industry: A review from a spatio-temporal statistical perspective. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6(12): 397.
- Stoter, J., Peters, R., Commandeur, T., Dukai, B., Kumar, K., & Ledoux, H. 2020. Automated reconstruction of 3D input data for noise simulation. *Computers, Environment and Urban Systems* 80: 101424.
- Tashakkori, H., Rajabifard, A. & Kalantari, M. 2015. A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation. *Build. Environ.* 89: 170-182.
- Teo, T.A., & Cho, K.-H. 2016. BIM-oriented indoor network model for indoor and outdoor combined route planning. *Advanced Engineering Informatics* 30(3): 268-282.
- Truijens, M., Wang, X., de Graaf, H. & Liu, J. 2014. Evaluating the performance of absolute rssi positioning algorithm-based microzoning and rfid in construction materials tracking. *Math. Probl. Eng.*
- Tsiliakou, E. & Dimopoulou, E. 2016. 3D network analysis for indoor space applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 42(2).
- Vandecasteele, F., Merci, B. & Verstockt, S. 2017. Fireground location understanding by semantic linking of visual objects and building information models. *Fire Saf.* 9: 1026-1034.
- Wang, H., Pan, Y., & Luo, X. 2019. Integration of BIM and GIS in sustainable built environment: A review and bibliometric analysis. *Automation in Construction* 103: 41-52.
- Wang, T.-K., Zhang, Q., Chong, H.-Y. & Wang, X. 2017. Integrated supplier selection framework in a resilient construction supply chain: An approach via analytic hierarchy process (AHP) and grey relational analysis (GRA), *Sustainability* 9(2).
- Wu, B. & Zhang, S. 2016. Integration of GIS and BIM for indoor geovisual analytics. In: *XXIII ISPRS Congress* 2: 455-458.
- Xu, M., Hijazi, I., Mebarki, A., Meouche, R. E., & Abune'meh, M. 2016. Indoor guided evacuation: TIN for graph generation and crowd evacuation. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 7(1): 47-56.
- Xu, M., Wei, M., Zlatanova, S. & Zhang, R. 2017. BIM-based indoor path planning considering obstacles—*ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 4.

- Yamamura, S., Fan, L. & Suzuki, Y. 2016. Assessment of urban energy performance through integration of BIM and GIS for smart city planning, *International High-Performance Built Environment Conference*, 1462–1472.
- Yépez Rincón, F. D., Lozano García, D. F. 2017. Synergetic efficiency of Lidar and WorldView-2 for 3D urban cartography in Northeast Mexico. *Geocarto International*, 1–15.
- Zhang, S., Teizer, J., Lee, J.-K., Eastman, C.M. & Venugopal, M. 2013. Building information modeling (BIM) and safety: Automatic safety checking of construction models and schedules. *Autom. Constr.* 29: 183–195.
- Zhong, R. Y., Peng, Y., Xue, F., Fang, J., Zou, W., Luo, H., ... & Huang, G. Q. 2017. Prefabricated construction enabled by the Internet-of-Things. *Automation in Construction* 76: 59-70.
- Zhou, W., Qin, H., Qiu, J., Fan, H., Lai, J., Wang, K. & Wang, L. 2017. Building information modelling review with potential applications in tunnel engineering of Chin. *Royal Society Open Science* 4(8).
- Zhou, W., Whyte, J. & Sacks, R. 2012. Construction safety and digital design: A review. *Autom. Constr.* 22: 102–111.
- Zhou, X., Xie, Q., Guo, M., Zhao, J., & Wang, J. 2020. Accurate and Efficient Indoor Pathfinding Based on Building Information Modelling Data. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1–1.
- Zhu, J., Wright, G., Wang, J., & Wang, X. 2018. A critical review of the integration of geographic information system and building information modelling at the data level. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7(2): 66.
- Zlatanova, S., Yan, J., Wang, Y., Diakité, A., Isikdag, U., Sithole, G., & Barton, J. 2020. Spaces in spatial science and urban applications—state of the art review. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9(1): 58.
- Zverovich, V., Mahdjoubi, L., Boguslawski, P., Fadli, F. & Barki, H. 2016. Emergency response in complex buildings: Aaaaaaaaautomated selection of safest and balanced routes. *Comput. Aided Civil Infrastruct. Eng.* 31(8): 617–632