



Rancang Bangun dan Implementasi Sistem Kebersihan Lingkungan Cerdas Berbasis IoT Menggunakan Sensor Partikulat dan Kontrol Kelembapan Adaptif

Heruman¹, Muhammad Robby Al Farolan², Tata Sutabri³

Universitas Bina Darma ^{1,2,3}

e-mail: heruman032@gmail.com

Abstract

Indoor environmental cleanliness and air quality play a crucial role in human health and comfort. High concentrations of fine particulate matter, such as PM_{2.5} and PM₁₀, combined with suboptimal humidity levels, can cause respiratory problems and discomfort. This study presents the design and implementation of a smart environmental hygiene system based on the Internet of Things (IoT), utilizing particulate sensors and adaptive humidity controllers. The system comprises particulate sensors, temperature and humidity sensors, an IoT microcontroller, and a cloud-based monitoring platform. Real-time data collected from the sensors are used to automatically operate actuators, such as air purifiers and humidifiers, to maintain optimal indoor conditions. Experimental results show that the system can reduce PM_{2.5} concentrations by more than 50% and maintain humidity within a comfortable range according to recommended standards. These findings demonstrate that the IoT-based system is effective in monitoring and controlling indoor environmental quality in real-time, while enhancing user comfort and health.

Keywords: *Internet of Things, Particulate Matter, Humidity Control, Smart Environment.*

Abstrak

Kebersihan lingkungan dan kualitas udara di dalam ruangan memiliki peran penting terhadap kesehatan dan kenyamanan manusia. Tingginya konsentrasi partikel halus seperti PM_{2.5} dan PM₁₀, disertai kelembapan yang tidak ideal, dapat menimbulkan gangguan pernapasan dan ketidaknyamanan. Penelitian ini memaparkan perancangan dan implementasi sistem kebersihan lingkungan pintar berbasis Internet of Things (IoT) yang memanfaatkan sensor partikulat dan pengatur kelembapan adaptif. Sistem terdiri dari sensor partikulat, sensor suhu dan kelembapan, mikrokontroler IoT, serta platform pemantauan berbasis cloud. Data yang diperoleh secara real-time digunakan untuk mengoperasikan aktuator seperti penyaring udara dan humidifier secara otomatis guna menjaga kondisi lingkungan tetap optimal. Hasil uji coba menunjukkan bahwa sistem mampu mengurangi kadar PM_{2.5} lebih dari 50% dan mempertahankan kelembapan di kisaran nyaman, sesuai standar rekomendasi. Temuan ini membuktikan bahwa sistem berbasis IoT efektif dalam memantau dan mengendalikan kualitas lingkungan indoor secara real-time, sekaligus meningkatkan kenyamanan dan kesehatan pengguna.

Kata Kunci: Internet of Things, Debu Partikulat, Pengaturan Kelembapan, Lingkungan Pintar.

PENDAHULUAN

Kualitas udara di dalam ruangan menjadi aspek penting yang memengaruhi kesehatan, kenyamanan, dan produktivitas manusia. Aktivitas manusia yang intens, urbanisasi yang meningkat, serta keterbatasan sirkulasi udara di ruang tertutup menyebabkan penumpukan polutan dan debu halus di dalam ruangan (WHO, 2016; Kim, Kabir & Kabir, 2015). Partikel debu halus seperti PM2.5 dan PM10 mampu menembus sistem pernapasan, menempel pada jaringan paru, dan memicu gangguan kesehatan jangka panjang, termasuk asma, bronkitis, penyakit kardiovaskular, dan iritasi saluran pernapasan (Pope & Dockery, 2006; Kim, Kabir & Kabir, 2015). Selain itu, kelembapan yang tidak sesuai, baik terlalu rendah maupun terlalu tinggi, dapat memengaruhi kenyamanan penghuni, menimbulkan iritasi pada saluran pernapasan, dan meningkatkan risiko pertumbuhan mikroorganisme seperti jamur dan bakteri (Arundel et al., 1986; Sterling, 2010). Kondisi ini menunjukkan bahwa pengendalian kualitas udara indoor tidak hanya berkaitan dengan konsentrasi polutan, tetapi juga mencakup pengaturan kelembapan untuk menciptakan lingkungan yang sehat dan nyaman.

Pemantauan kualitas udara indoor secara tradisional masih banyak mengandalkan pengukuran manual, seperti pengambilan sampel udara secara berkala atau penggunaan alat portabel yang harus dioperasikan secara rutin. Metode konvensional ini memiliki beberapa keterbatasan, termasuk kurangnya kontinuitas data, keterlambatan respons terhadap perubahan kondisi lingkungan, dan ketidakmampuan melakukan kontrol secara otomatis (Lu et al., 2015). Hal ini menjadi tantangan signifikan, terutama pada lingkungan yang padat penduduk atau ruangan dengan aktivitas tinggi, di mana konsentrasi partikel dapat berubah dengan cepat. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan dan pengendalian kualitas udara yang mampu bekerja secara real-time, akurat, dan otomatis.

Kemajuan teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan solusi untuk permasalahan tersebut. IoT memungkinkan integrasi antara sensor, mikrokontroler, aktuator, dan platform berbasis cloud sehingga sistem dapat memantau kondisi lingkungan, menyimpan data secara terpusat, serta mengambil tindakan pengendalian secara otomatis (Atzori, Iera & Morabito, 2010; Gubbi et al., 2013). Sensor yang digunakan dalam sistem IoT dapat berupa sensor partikulat untuk mengukur konsentrasi PM2.5 dan PM10, serta sensor suhu dan kelembapan untuk memonitor kondisi udara secara menyeluruh. Data sensor yang diperoleh secara real-time dapat diproses oleh mikrokontroler, dikirim ke platform cloud, dan ditampilkan dalam bentuk grafik atau tabel untuk memudahkan pemantauan dan pengambilan keputusan (Agarwal & Gupta, 2019). Pengendalian kualitas udara juga merupakan aspek penting dari sistem cerdas. Pengendalian dilakukan melalui aktuator yang bekerja secara otomatis berdasarkan nilai ambang batas (threshold-based)

tertentu. Misalnya, penyaring udara akan diaktifkan ketika konsentrasi partikel PM2.5 atau PM10 melebihi ambang batas yang telah ditentukan, sedangkan humidifier akan menyesuaikan kelembapan untuk berada dalam kisaran ideal, yaitu 40–60% relatif (Sterling, 2010; Arundel et al., 1986). Pendekatan ini memungkinkan lingkungan indoor tetap sehat dan nyaman, sekaligus mengurangi paparan polutan bagi penghuni.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sistem berbasis IoT mampu meningkatkan efektivitas pengendalian kualitas udara dibandingkan metode konvensional. Misalnya, sistem cerdas dapat merespons perubahan kondisi lingkungan secara real-time, menyesuaikan operasi aktuator sesuai data sensor, dan memberikan informasi yang mudah diakses melalui platform cloud atau aplikasi mobile (Lu et al., 2015; Wang, Li & Jing, 2018). Keunggulan lain dari sistem berbasis IoT adalah kemampuan untuk melakukan pemantauan jarak jauh, yang memungkinkan pengelolaan kualitas udara di berbagai ruangan atau bangunan secara efisien dan ekonomis.

Tujuan penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem kebersihan lingkungan pintar berbasis IoT yang mengintegrasikan pemantauan partikel udara dan kontrol kelembapan adaptif. Sistem ini diharapkan mampu menurunkan konsentrasi partikel halus, menyesuaikan kelembapan ke kisaran nyaman, serta memberikan data real-time yang dapat diakses secara langsung oleh pengguna. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya bertujuan meningkatkan kualitas udara, tetapi juga menciptakan lingkungan indoor yang lebih nyaman dan aman bagi kesehatan penghuni.

Pendekatan penelitian ini didasarkan pada konsep smart environment, di mana sensor, aktuator, dan algoritma kontrol saling terintegrasi untuk menciptakan sistem otomatis yang adaptif terhadap perubahan lingkungan. Arsitektur sistem mencakup sensor partikulat untuk mengukur PM2.5 dan PM10, sensor suhu dan kelembapan untuk memantau kondisi udara, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengolahan data, aktuator seperti penyaring udara dan humidifier, serta platform cloud untuk visualisasi data dan pemantauan jarak jauh (Agarwal & Gupta, 2019; Wang, Li & Jing, 2018). Algoritma pengendalian berbasis threshold memungkinkan sistem merespons secara otomatis terhadap fluktuasi kualitas udara dan kelembapan, sehingga menciptakan lingkungan indoor yang lebih sehat, nyaman, dan aman.

Sistem ini diharapkan dapat diterapkan pada berbagai jenis ruangan, termasuk ruang perkantoran, kelas, rumah sakit, maupun hunian padat penduduk. Implementasi IoT pada pengendalian kualitas udara indoor memberikan keuntungan ganda, yaitu pemantauan yang kontinu dan pengendalian yang adaptif, sekaligus menyediakan data historis yang dapat dianalisis untuk perbaikan lebih lanjut atau penelitian tambahan. Dengan kata lain, teknologi ini

memungkinkan pengelolaan lingkungan indoor yang lebih cerdas, efisien, dan berkelanjutan. Penelitian ini juga mempertimbangkan dampak kesehatan dan kenyamanan penghuni. Pemantauan real-time terhadap PM2.5, PM10, dan kelembapan memungkinkan identifikasi cepat terhadap kondisi lingkungan yang berpotensi membahayakan kesehatan. Hal ini sangat penting mengingat paparan jangka panjang terhadap partikel halus dapat menimbulkan risiko penyakit kronis (Pope & Dockery, 2006). Dengan pengendalian otomatis, sistem dapat mengurangi konsentrasi partikel sebelum menimbulkan dampak negatif, sekaligus menjaga kelembapan agar tetap nyaman bagi penghuni. Pendekatan ini sesuai dengan prinsip smart building dan smart home, di mana kualitas udara, kesehatan penghuni, dan efisiensi energi menjadi fokus utama (Gubbi et al., 2013).

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental terapan untuk merancang, mengimplementasikan, dan menguji sistem kebersihan lingkungan pintar berbasis Internet of Things (IoT). Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan sensor partikulat untuk mengukur konsentrasi PM2.5 dan PM10, sensor suhu dan kelembapan (DHT11) untuk memantau kondisi lingkungan, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengolahan data, serta aktuator seperti penyaring udara dan humidifier. Data yang diperoleh dari sensor dikirim secara real-time ke platform cloud untuk visualisasi dan pemantauan, sedangkan aktuator bekerja secara otomatis berdasarkan nilai ambang batas yang telah ditetapkan, sehingga sistem dapat menjaga kualitas udara dan kelembapan tetap optimal. Pengujian dilakukan di lingkungan indoor dengan variasi kelembapan dan aktivitas untuk memastikan performa sensor, algoritma kontrol, dan respons aktuator terhadap kondisi nyata.

Pengumpulan data dilakukan secara kontinu dengan mengamati parameter utama, yaitu konsentrasi partikel debu (PM2.5/PM10), kelembapan relatif, dan status aktuator (ON/OFF). Analisis data mencakup evaluasi efektivitas sistem dalam menurunkan konsentrasi debu dan menjaga kelembapan pada kisaran ideal, serta menilai hubungan antara kelembapan dan distribusi partikel debu. Validasi sistem dilakukan dengan pengujian berulang pada berbagai kondisi lingkungan untuk memastikan akurasi sensor dan respons pengendalian yang konsisten. Dengan metode ini, penelitian mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai kemampuan sistem IoT dalam memantau dan mengendalikan kualitas udara indoor secara real-time dan otomatis.

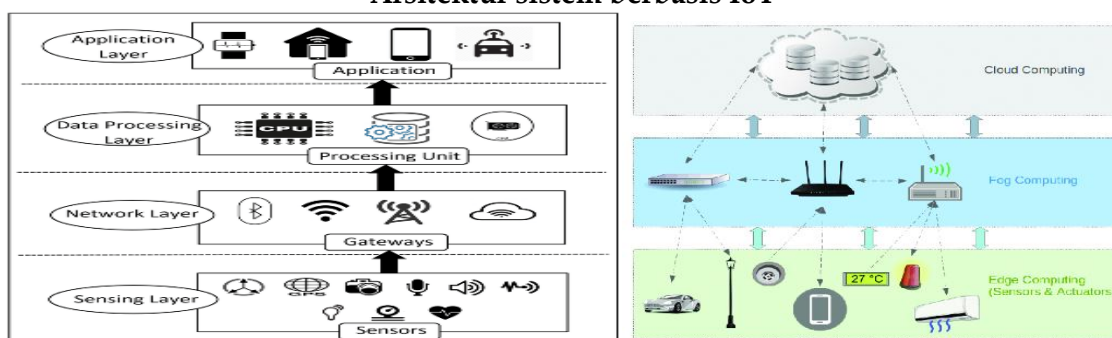
PEMBAHASAN

Arsitektur Sistem

Sistem yang diusulkan terdiri dari komponen utama, yaitu sensor partikulat untuk mengukur kadar PM2.5 dan PM10, sensor suhu

serta kelembapan untuk memantau kondisi lingkungan, mikrokontroler IoT (ESP32), aktuator, dan platform cloud. Data sensor diproses oleh mikrokontroler dan dikirim melalui WiFi ke platform cloud untuk visualisasi serta penyimpanan data. Berdasarkan ambang batas yang ditetapkan, sistem secara otomatis mengaktifkan aktuator seperti penyaring udara dan humidifier. Arsitektur sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.

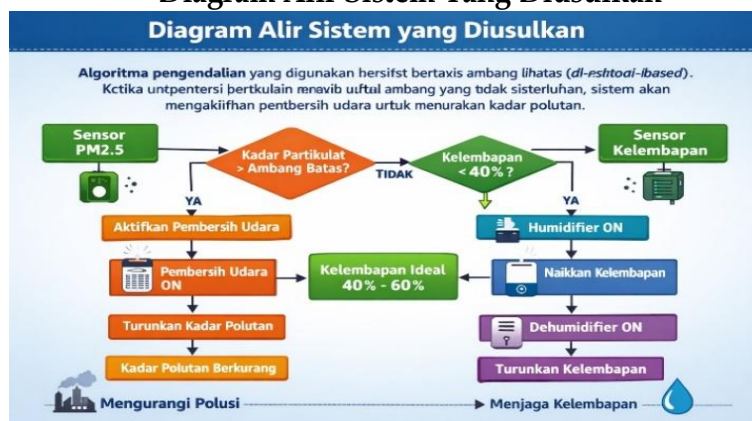
Gambar 1
Arsitektur sistem berbasis IoT



Algoritma Pengendalian

Algoritma pengendalian yang digunakan berbasis ambang batas (threshold-based). Jika konsentrasi partikel melebihi ambang tertentu, sistem akan mengaktifkan penyaring udara untuk mengurangi polutan. Selain itu, kontrol kelembapan dilakukan secara adaptif agar kelembapan relatif berada dalam rentang ideal, yaitu 40% hingga 60%. Sistem beroperasi terus-menerus dalam loop pemantauan, sehingga mampu merespons perubahan kondisi lingkungan secara real-time. Diagram alir algoritma sistem ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2
Diagram Alir Sistem Yang Diusulkan



Pengujian dan Hasil Eksperimen

Pengujian sistem dilakukan di lingkungan indoor selama beberapa hari (2018). Data dikumpulkan secara berkala untuk mengevaluasi kinerja sebelum dan

setelah kontrol diaktifkan. Hasilnya menunjukkan penurunan signifikan pada konsentrasi partikel setelah penyaring udara beroperasi. Rata-rata konsentrasi PM2.5 turun dari sekitar $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ menjadi $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, yang menunjukkan pengurangan lebih dari 50%. Selain itu, kelembapan yang awalnya di bawah 35% berhasil dinaikkan ke kisaran nyaman. Grafik penurunan PM2.5 ditampilkan pada Gambar 3.

Gambar 3
Perbandingan Konsentrasi PM2.5 Sebelum Dan Sesudah Pengendalian



Hasil pengujian sistem kebersihan lingkungan pintar berbasis IoT menunjukkan bahwa sistem ini efektif dalam meningkatkan kualitas udara indoor dan menjaga kenyamanan lingkungan secara real-time. Integrasi sensor partikulat untuk mengukur PM2.5 dan PM10, sensor suhu dan kelembapan, mikrokontroler ESP32, aktuator, dan platform cloud memungkinkan pemantauan lingkungan secara terus-menerus, penyimpanan data historis, dan pengendalian otomatis berdasarkan nilai ambang batas yang telah ditentukan (Atzori, Iera & Morabito, 2010; Gubbi et al., 2013). Dengan adanya arsitektur yang terintegrasi ini, sistem mampu mengurangi ketergantungan pada pengukuran manual, mempercepat respons terhadap fluktuasi kualitas udara, dan memberikan data visualisasi yang dapat diakses dari jarak jauh. Hal ini sejalan dengan temuan Lu et al. (2015) dan Wang, Li & Jing (2018), yang menyatakan bahwa sistem IoT dapat meningkatkan efektivitas pemantauan kualitas udara dibandingkan metode konvensional karena dapat melakukan monitoring secara kontinu dan mengaktifkan kontrol secara otomatis.

Analisis data pengujian menunjukkan adanya penurunan signifikan dalam konsentrasi partikel PM2.5 setelah sistem pengendalian diaktifkan. Rata-rata PM2.5 yang awalnya sekitar $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berhasil diturunkan menjadi $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, menandakan pengurangan lebih dari 50%. Penurunan ini memperlihatkan efektivitas aktuator, khususnya penyaring udara, dalam menurunkan partikel polutan di udara (Pope & Dockery, 2006; Kim, Kabir & Kabir, 2015). Selain itu, sistem juga mampu menyesuaikan kelembapan ruangan dari level awal di bawah 35% menjadi kisaran nyaman 40–60%, sehingga meningkatkan kenyamanan termal dan mengurangi risiko iritasi saluran pernapasan. Hasil ini

menguatkan temuan Sterling (2010) yang menyatakan bahwa kelembapan relatif yang ideal dapat meningkatkan kenyamanan penghuni sekaligus mengurangi pertumbuhan mikroorganisme dalam ruang tertutup.

Arsitektur sistem yang fleksibel memungkinkan pengembangan lebih lanjut dengan menambahkan sensor tambahan atau memperluas skala penerapan di lingkungan yang lebih luas, seperti gedung perkantoran, rumah sakit, atau kelas sekolah. Sensor tambahan seperti sensor gas (CO₂, VOCs) atau sensor kualitas udara lainnya dapat memberikan gambaran lebih lengkap tentang kondisi indoor dan memungkinkan pengendalian yang lebih komprehensif (Gubbi et al., 2013; Agarwal & Gupta, 2019). Sistem ini juga memungkinkan pemantauan historis yang dapat digunakan untuk analisis tren kualitas udara, identifikasi pola polusi, dan perencanaan strategi pengendalian jangka panjang. Keunggulan ini membuat sistem IoT lebih unggul dibandingkan metode tradisional yang hanya menyediakan data terbatas dan memerlukan intervensi manual yang sering kali lambat merespons perubahan kondisi lingkungan (Lu et al., 2015).

Beberapa keterbatasan tetap perlu diperhatikan. Saat ini, pengendalian masih menggunakan metode threshold-based, di mana aktuator hanya diaktifkan saat nilai partikel atau kelembapan melewati batas tertentu. Pendekatan ini tidak mempertimbangkan prediksi atau tren perubahan kualitas udara, sehingga mungkin kurang responsif terhadap fluktuasi mendadak yang terjadi sebelum ambang batas tercapai (Wang, Li & Jing, 2018). Penelitian lanjutan dapat memanfaatkan algoritma machine learning atau artificial intelligence untuk prediksi kondisi udara, sehingga pengendalian dapat dilakukan secara proaktif, bukan hanya reaktif. Misalnya, algoritma prediktif dapat memproyeksikan peningkatan PM_{2.5} berdasarkan pola aktivitas atau kelembapan, dan mengaktifkan penyaring udara lebih awal sebelum batas kritis tercapai (Agarwal & Gupta, 2019; Atzori, Iera & Morabito, 2010).

Kualitas data sensor juga memengaruhi performa sistem. Sensor partikulat dan DHT11 memiliki akurasi yang cukup baik untuk pemantauan umum, namun masih terdapat keterbatasan jika digunakan dalam kondisi ekstrem atau untuk pengukuran sangat presisi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa integrasi sensor presisi tinggi, seperti sensor laser atau gravimetri, dapat meningkatkan akurasi pengukuran PM_{2.5} dan PM₁₀ secara signifikan, walaupun biaya dan kompleksitas sistem meningkat (Kim, Kabir & Kabir, 2015; Pope & Dockery, 2006). Penggunaan platform cloud untuk penyimpanan dan visualisasi data terbukti sangat membantu dalam pemantauan jarak jauh. Data sensor yang dikirim secara real-time memungkinkan pengguna atau pengelola ruangan memantau kondisi lingkungan secara kontinu, membuat keputusan cepat, dan menyesuaikan strategi pengendalian jika diperlukan (Lu et al., 2015; Gubbi et al., 2013). Fitur ini juga mendukung pengumpulan data historis yang

dapat digunakan untuk analisis tren kualitas udara, perbandingan antar-ruangan, dan evaluasi efektivitas kontrol jangka panjang.

Pengujian menunjukkan bahwa kelembapan memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi partikel debu di dalam ruangan. Saat kelembapan relatif tinggi, partikel PM2.5 dan PM10 cenderung menempel pada permukaan atau terikat oleh uap air, sehingga konsentrasi di udara menurun (Sterling, 2010; Arundel et al., 1986). Sebaliknya, kelembapan rendah membuat partikel debu lebih mudah tersebar di udara, meningkatkan risiko paparan penghuni. Hal ini menegaskan bahwa pengendalian kelembapan merupakan bagian penting dari sistem manajemen kualitas udara indoor, selain pengendalian langsung partikel debu menggunakan penyaring udara. Integrasi kedua parameter ini dalam satu sistem IoT memberikan solusi lebih menyeluruh dibandingkan sistem yang hanya mengukur dan mengendalikan salah satu aspek saja.

Sistem IoT yang dirancang mampu memantau dan mengendalikan kualitas udara indoor secara efektif. Kombinasi sensor partikulat dan kelembapan, mikrokontroler ESP32, aktuator otomatis, dan platform cloud memberikan kemampuan untuk mengurangi polusi udara, menjaga kelembapan pada kisaran nyaman, dan memberikan data real-time untuk pemantauan jarak jauh. Sistem ini lebih responsif, fleksibel, dan efisien dibandingkan metode tradisional, sekaligus membuka peluang pengembangan lebih lanjut dengan algoritma prediktif dan integrasi sensor tambahan untuk pengendalian cerdas. Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa penerapan teknologi IoT merupakan langkah efektif dalam menciptakan lingkungan indoor yang sehat, nyaman, dan aman bagi penghuni (Gubbi et al., 2013; Lu et al., 2015; Agarwal & Gupta, 2019; Atzori, Iera & Morabito, 2010; Sterling, 2010; Kim, Kabir & Kabir, 2015; Pope & Dockery, 2006).

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kebersihan lingkungan pintar berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor partikulat dan kontrol kelembapan adaptif. Sistem mampu memantau kualitas udara secara real-time dan mengoperasikan aktuator secara otomatis sesuai ambang batas yang ditentukan. Hasil eksperimen menunjukkan penurunan signifikan konsentrasi partikel debu serta pemeliharaan kelembapan dalam rentang nyaman, yang meningkatkan kenyamanan dan kesehatan penghuni. Dengan kemampuan pemantauan dan pengendalian otomatis ini, sistem memiliki potensi untuk diterapkan pada berbagai lingkungan, termasuk bangunan pintar, perkantoran, dan rumah tangga, sebagai solusi efisien untuk pengelolaan kualitas udara indoor.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal, A. & Gupta, S. (2019) 'IoT-based smart environmental monitoring system', *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8(4), pp. 1-5.
- Arundel, A.V., Sterling, E.M., Biggin, J.H. & Sterling, T.D. (1986) 'Indirect health effects of relative humidity in indoor environments', *Environmental Health Perspectives*, 65, pp. 351-361.
- Atzori, L., Iera, A. & Morabito, G. (2010) 'The Internet of Things: A survey', *Computer Networks*, 54(15), pp. 2787-2805.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. & Palaniswami, M. (2013) 'Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions', *Future Generation Computer Systems*, 29(7), pp. 1645-1660.
- Kim, K.H., Kabir, E. & Kabir, S. (2015) 'A review on the human health impact of airborne particulate matter', *Environment International*, 74, pp. 136-143.
- Lu, X., Liu, Y., Chen, Q., & Zheng, Y. (2015) 'Smart indoor air quality monitoring system based on IoT', *Journal of Sensors*, 2015, pp. 1-10.
- Pope, C.A. & Dockery, D.W. (2006) 'Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect', *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), pp. 709-742.
- Sterling, E.M. (2010) *Effects of humidity on comfort, health, and indoor air quality*. Geneva: World Health Organization.
- Wang, Y., Li, J. & Jing, H. (2018) 'Air quality monitoring using optical dust sensors', *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(5), pp. 1-10.
- WHO (2016) *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. Geneva: World Health Organization.