

Kajian Termal Akibat Paparan Panas dan Perbaikan Lingkungan Kerja

Listiani Nurul Huda^{1*}, Kristoffel Colbert Pandiangan¹

Abstract: This study aims to analyze thermal condition and improve working environment by designed ventilation systems due to improve air circulation and reduce heat exposure occurred so that workers feel more comfortable working. This study describes the thermal conditions of work and its relation to psychological aspects operator traced through thermal questionnaires. By knowing the conditions of the proposed design is further improved ventilation system. The measurement results show that the thermal average air temperature in the formulations room was 31.7 °C and wind speed of 0.27 m/s. Heat Stress Index (HSI) in the workplace about 94.41%, which indicates the great potential of the dangers of heat stress. Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) index gained 27.64 °C so that the percentage of working time and rest time workers was 6.55 and 1.55 hours, where the percentage is not according to the standard. Productive work time workers only achieved ranged from (76.58 ± 5.91)%, where the figure is still below the standards of the company. Simulation with Computer Fluid Dynamic (CFD) software shows actual workplace conditions are very hot and poorly ventilated. By conducting some simulations improvement, then found a comfortable room conditions and air circulation smoothly. Thermal comfort is finally concluded comfortable room after Cv's room obtained exceeds 0.34 m/s in accordance with the Macfarlane theory's.

Keywords: Thermal comfort, ventilation systems, CFD, productive work time.

Pendahuluan

Kondisi termal tempat kerja merupakan suatu kondisi lingkungan kerja yang dipengaruhi oleh beberapa aspek lingkungan kerja fisik. Adapun aspek-aspek tersebut dapat berupa temperatur, kelembaban relatif, pergerakan udara serta aspek personal seperti insulasi pakaian dan jenis kegiatan. Kondisi termal dapat mengakibatkan kenyamanan dan juga ketidaknyamanan dalam bekerja. Ketidaknyamanan kerja dapat disebabkan oleh adanya paparan panas di tempat kerja. Paparan panas terjadi ketika tubuh menyerap atau memproduksi panas yang lebih besar dari pada yang diterima melalui proses regulasi termal. Paparan panas akibat adanya temperatur yang tinggi dalam ruangan kerja bisa ditimbulkan oleh kondisi ruangan, mesin-mesin ataupun alat yang mengeluarkan panas serta panas yang bersumber dari sinar matahari yang memanasi atap pabrik yang kemudian menimbulkan radiasi kedalam ruangan kerja produksi.

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Indrani [5] pada ruangan rumah susun diperoleh hasil bahwa keberadaan ventilasi pada bangunan di daerah tropis sangat penting bagi kesehatan dan berperan dalam menciptakan kenyamanan termal ruang dalam.

Ukuran ventilasi yang pada standar nya berkisar antara 10 sampai 20% dapat ditingkatkan hingga mencapai 50% dari luasan lantai jika kebutuhan kecepatan angin dalam ruangan belum memadai. Pemilihan jenis bukaan atau jendela dapat mendorong terjadinya pergerakan yang lebih cepat atau memperbesar kecepatan udara.

Menurut Prianto dan Depecker [12], pada hunian di lingkungan beriklim tropis terutama dengan kelembaban tinggi, kenyamanan lingkungan kerja tidak hanya tergantung pada banyaknya suplai udara segar ke dalam ruangan, tetapi juga tergantung pada kecepatan angin. Hal ini diperkuat oleh teori Macfarlane dalam buku berjudul *Architectural Aerodynamics* (Aynsley [2]) yang menyatakan bahwa kenyamanan termal dapat diprediksi dengan menggunakan indeks keefektifan bukaan (dalam m/s) dengan memasukkan temperatur kering dan kelembaban ke dalam persamaan Macfarlane. Teori ini juga didukung oleh penelitian Liping dan Hien [9] yang mengatakan bahwa ada dua cara dalam meningkatkan kenyamanan termal ruangan, yaitu meningkatkan kecepatan angin dan menentukan posisi serta ukuran bukaan yang tepat.

Salah satu lingkungan kerja yang terpapar panas ini terjadi pada salah satu pabrik pembuatan anti nyamuk bakar yaitu sebuah perusahaan yang berlokasi di kota Medan. Pada salah satu ruangan di perusahaan tersebut yaitu ruangan formulasi, temperatur ruang kerja memiliki temperatur berkisar antara 34 sampai 35°C, dengan tingkat kelembaban antara 59 sampai 68%, dan kecepatan udara sekitar

¹ Fakultas Teknik, Departemen Teknik Industri, Universitas Sumatera Utara, Jl. Almamater Kampus USU, Medan 20155. Email: listiani@usu.ac.id.

* Penulis korespondensi

0 sampai 0,1m/s. Sumber panas dalam ruangan berasal dari mesin produksi yang memproses pencampuran bahan, panas radiasi sinar matahari melalui atap pabrik serta kurangnya bukaan atau ventilasi dalam ruangan. Sedikitnya bukaan ventilasi ruangan menambah beban panas ruangan kerja. Hal tersebut diakibatkan oleh panas dalam ruangan cenderung terakumulasi dan terperangkap di dalam ruangan karena tidak adanya saluran pertukaran udara dalam dan udara luar. Kondisi ini mengakibatkan banyak pekerja merasakan ketidaknyamanan dalam bekerja yang ditunjukkan dengan pekerja keluar dan masuk ruangan pada saat bekerja.

Berdasarkan pengamatan pendahuluan dan laporan dari pihak perusahaan, lama durasi keluar dan masuk pekerja dapat mencapai 20 sampai 30% dari waktu kerja. Para pekerja tersebut keluar dari ruangan formulasi menuju kantor produksi yang letaknya berdekatan dan dilengkapi alat pendingin ruangan. Hal ini dilakukan oleh pekerja untuk mendapatkan kenyamanan agar suhu tubuh menjadi netral akibat paparan panas di ruang kerja. Hal ini tentu menyebabkan turunnya waktu kerja produktif pekerja. Penurunan ini ditunjukkan oleh semakin banyaknya waktu pekerja di luar ruangan formulasi untuk mendinginkan temperatur tubuh. Bagian formulasi ini memiliki peranan sentral dalam proses produksi, dimana campuran bahan baku yang dihasilkan akan mempengaruhi jumlah dan mutu produk akhir. Penurunan waktu kerja produktif di bagian formulasi akan berakibat pada proses produksi secara keseluruhan.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di ruangan formulasi salah satu pabrik anti nyamuk di kota Medan, Sumatera Utara. Waktu pengumpulan data dilaksanakan pada bulan Juli 2012. Responden yang digunakan sebagai objek penelitian adalah pekerja di ruangan formulasi. Data yang diambil pada penelitian ini adalah data kondisi termal dan data psikologi termal pekerja. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Matjaz [10] yang mengatakan bahwa kenyamanan termal dapat diprediksi dengan mengkombinasikan faktor lingkungan termal dengan persepsi psikologi termal manusia. Data kondisi termal diambil menggunakan alat ukur Questemp 32 untuk data temperatur udara, temperatur basah, temperatur kering, temperatur globe dan kelembaban udara, serta Anemometer untuk mengukur kecepatan angin. Data psikologi termal pekerja diambil menggunakan kuesioner termal yang terdiri dari sensasi termal, kondisi aliran udara, kondisi termal dan identifikasi keluhan fisik akibat termal.

Metode audit termal yang digunakan pada penelitian ini adalah *Heat Stress Index* (HSI) dan *Wet*

Bulb Globe Temperature (WBGT) atau sering pula disebut sebagai Indeks Suhu Bola Basah (ISBB). Metode HSI digunakan untuk melihat besarnya indeks tekanan paparan panas yang dirasakan pekerja dalam ruangan (Stanton [14]). Metode ISBB digunakan untuk menentukan proporsi waktu kerja dan waktu istirahat ketika bekerja pada ruangan yang terpapar panas (Stanton [14]). Kondisi sistem ventilasi dianalisis melalui simulasi dengan menggunakan software CFD yaitu Gambit dan Fluent. Hasil simulasi ini akan disajikan melalui gambar kontur temperatur dan pola sebaran kecepatan angin secara tiga dimensi.

Prosedur Kajian Termal

Audit termal dilakukan melalui pengukuran langsung faktor-faktor lingkungan kerja fisik seperti temperatur udara, temperatur basah, temperatur kering, temperatur *globe*, kelembaban dan kecepatan angin. Pengukuran dilakukan pada 5 titik yang tersebar merata pada ruangan formulasi. Tingkat gradien ketinggian pengukuran terdiri dari 5 titik yaitu ketinggian 0,1m; 1,1m; 1,7m; 3m; 5m. Ketinggian 0,1 sampai 1,7m berdasarkan standar pengukuran ASHRAE 55 [1], sedangkan ketinggian 3 sampai 5m digunakan untuk analisis penempatan ventilasi. Pengukuran dilakukan selama 5 hari kerja dari pukul 07.00 sampai 15.00 WIB (jam kerja aktif di ruangan formulasi) dengan interval waktu pengukuran selama 120 menit. Hasil pengukuran ini akan dianalisis berdasarkan grafik. Temperatur udara, temperatur *globe*, kelembaban dan kecepatan angin akan dimasukkan ke persamaan HSI untuk melihat sejauh mana indeks tekanan paparan panas dalam ruangan. Temperatur basah, temperatur kering dan temperatur *globe* akan dimasukkan ke persamaan ISBB untuk menentukan proporsi jam kerja dan jam istirahat dengan kondisi pekerja yang terpapar panas. Audit termal juga dilakukan dengan menggunakan kuesioner termal. Adapun pertanyaan yang diajukan dalam kuesioner tersebut adalah sensasi termal, kondisi aliran udara, kondisi termal dan identifikasi keluhan fisik akibat termal yang dirasakan pekerja di dalam ruangan. Kuesioner ini diisi oleh 13 orang pekerja selama 5 hari kerja. Pengisian kuesioner dilakukan sebanyak 2 kali setiap hari, yaitu pukul 10.00 WIB (sebelum istirahat) dan pukul 14.00 WIB (sesudah istirahat). Hasil rekapitulasi kuesioner ini akan dianalisis dan dibandingkan dengan hasil pengukuran langsung lingkungan kerja fisik.

Kuesioner Termal

Kuesioner termal digunakan untuk mengidentifikasi persepsi pekerja mengenai kondisi termal dan dampak keluhan fisik akibat termal. Kondisi termal yang diidentifikasi melalui kuesioner adalah sensasi termal, kondisi aliran udara dan kondisi termal (Homma dan Huda [4]). Sensasi termal diberi skala

nilai dari 1 sampai 5, dimana nilai 1 untuk sangat panas dan nilai 5 untuk normal. Aliran Udara diberi skala nilai dari 1 sampai 4, dimana nilai 1 untuk lemah dan nilai 4 untuk sangat kuat. Kondisi termal diberi skala nilai dari 1 sampai 5, dimana nilai 1 untuk sangat tidak nyaman dan nilai 5 untuk sangat nyaman. Dampak keluhan fisik yang diidentifikasi terdiri dari keletihan, kantuk dan ketidakstabilan dalam bekerja. Untuk masing-masing pertanyaan diberi skala 0 untuk jawaban “tidak”, dan skala 1 untuk jawaban “ya”. Adapun kuesioner ini diberikan kepada seluruh pekerja di bagian formulasi yang berjumlah 13 orang.

Prosedur Perancangan Sistem Ventilasi

Sistem ventilasi aktual dianalisis dengan menggunakan *software Computational Fluid Dynamic* (CFD). Software CFD yang digunakan dalam memproses kondisi termal dan sistem ventilasi ini adalah ANSYS Gambit 2.4.6. dan Fluent 6.3.26. Dalam menghasilkan analisis CFD, maka ada beberapa tahapan yang harus dilakukan, yaitu menggambar struktur bangunan dan mengatur *boundary condition* dengan menggunakan Gambit 2.4.6. Setelah selesai digambar, maka selanjutnya *meshing* dengan menentukan *spacing* yang akan digunakan. Hasil *meshing* tersebut di transfer ke Fluent. Pengaturan pemrosesan untuk input data termal dan *velocity* nya dilakukan dengan Fluent. Iterasi objek akan dilakukan Fluent setelah semua data di input dengan benar. Hasil iterasi dapat dilihat dari sub menu *display*.

Dari hasil simulasi, maka akan didapatkan kontur aliran udara dan kontur temperatur dalam ruangan. Kontur tersebut akan menunjukkan koordinat ruangan yang perlu dipasang ventilasi dan fasilitas penanganan panas lainnya.

Prosedur Activity Sampling

Sampling kerja dalam penelitian dilakukan dengan mengumpulkan persentase jumlah *work* dan *idle* operator bagian formulasi selama jam kerja. Definisi *work* dalam penelitian ini adalah kegiatan-kegiatan yang dilakukan di tempat kerja, sedangkan *idle* merupakan suatu keadaan seorang operator yang sedang tidak melakukan kegiatannya. Teknik *sampling* yang digunakan dalam penelitian *activity sampling* ini adalah *simple random sampling*. Teknik ini memiliki konsep bahwa semua anggota populasi dapat dijadikan sampel. Pemilihan sampel dilakukan dengan cara mengambil tabel bilangan acak dan kemudian mengambil data dengan pola tingkat angka berturut-turut. Jika pola angka tersebut melebihi jumlah sampel, maka data tersebut dibuang. Demikianlah dilakukan sampai semua jumlah sampel terpenuhi (Currie [3]). Operator bekerja dari pukul 07.00 sampai 15.00 WIB dengan jam istirahat

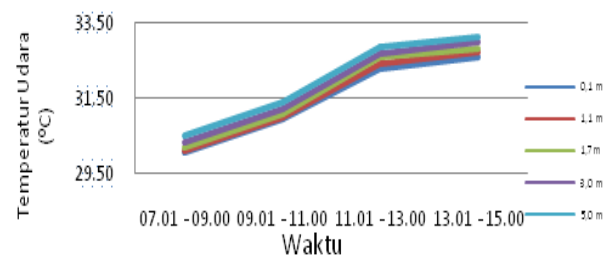
dari pukul 12.00 sampai 13.00 WIB. Adapun jumlah populasi penelitian adalah jumlah waktu kerja per satuan menit tanpa menghitung waktu istirahat. Jumlah satuan menit dari pukul 07.00 sampai 12.00 WIB dan 13.00 sampai 15.00 WIB adalah 419 data, dan itulah yang menjadi populasi waktu penelitian. Untuk menentukan jumlah sampel dari populasi tersebut, maka digunakan teknik pengambilan sampel dengan rumus slovin. Jumlah sampel pada pengamatan *activity sampling* ini adalah 205 sampel. Setelah menentukan jumlah sampel, maka ditentukan sampel berdasarkan tabel bilangan acak.

Hasil dan Pembahasan

Kenyamanan Termal

Kondisi lingkungan termal di ruangan formulasi dipengaruhi oleh beberapa hal seperti pengaruh radiasi sinar matahari yang menembus ruangan, paparan panas yang dihasilkan mesin-mesin dalam ruangan, kelembaban, panas hasil metabolisme tubuh, dan kurangnya sirkulasi udara dalam ruangan.

Berdasarkan hasil pengukuran selama 5 hari, maka diketahui bahwa temperatur udara paling tinggi berada pada 35,3°C, temperatur udara paling rendah berada pada 27,8°C, dan temperatur udara rata-rata adalah 31,7°C. Berdasarkan pengamatan, diketahui bahwa pengaruh radiasi sinar matahari memiliki peranan paling besar dalam meningkatkan paparan panas. Hasil pengujian korelasi juga menunjukkan bahwa faktor yang paling mempengaruhi indeks tekanan paparan panas adalah temperatur *globe*, kecepatan angin dan temperatur udara dengan nilai korelasi (r) sebesar 0,99875; -0,99536; 0,9531 secara berturut-turut. Hal ini diakibatkan ruangan formulasi menggunakan atap yang terbuat dari seng dan tanpa menggunakan langit-langit atau asbes, sehingga panas dari atap dengan cepat merambat. Berdasarkan hasil pengumpulan data, diketahui bahwa temperatur udara pada ketinggian 3 sampai 5m lebih tinggi dibandingkan temperatur udara pada ketinggian 0,1 sampai 1,7m. Hal ini menjadi salah satu pertimbangan dalam penentuan ketinggian bukaan ventilasi. Adapun grafik temperatur udara berdasarkan ketinggian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik temperatur udara berdasarkan ketinggian

Tabel 1. Vote kuesioner termal

Pertanyaan	Sebelum istirahat			Sesudah istirahat		
	Nilai			Nilai		
	min	max	mean	min	max	mean
Sensasi termal	1	5	2,15	1	5	2,10
Kondisi aliran udara	1	2	1,20	1	2	2,30
Kondisi termal	1	3	1,80	1	3	1,60

Adapun analisis psikologi termal yang dilakukan adalah berdasarkan data yang dikumpulkan dengan kuesioner termal kepada operator. Rekapitulasi data psikologi termal operator dapat dilihat pada Tabel 1.

Berdasarkan data tersebut maka dapat diketahui bahwa secara rata-rata sensasi termal yang dirasakan operator berada dalam rentang panas-hangat, kondisi aliran udara berada pada rentang lemah-cukup lemah, dan kondisi termal berada pada rentang sangat tidak nyaman-tidak nyaman. Dengan demikian maka kondisi termal ini sudah sangat membutuhkan perbaikan untuk meningkatkan kenyamanan termal operator di dalam ruangan formulasi. Adapun grafik *mean vote* kuesioner termal dapat dilihat pada Gambar 2.

Data keluhan fisik diakibatkan kondisi termal yang didapatkan dari kuesioner sebelum istirahat adalah 100% operator menjadi letih, 40% operator menjadi mengantuk, dan 70% operator menjadi tidak stabil. Untuk kuesioner setelah istirahat adalah 90% operator menjadi letih, 70% operator menjadi mengantuk, dan 60% operator menjadi tidak stabil. Dari data tersebut, maka dapat diketahui bahwa dengan pemberian istirahat selama 1 jam hanya membantu sedikit terhadap keadaan operator. Adapun data HSI yang dianalisis adalah data pengolahan berdasarkan ketinggian pengukuran. Hal ini dilakukan karena data ketinggian pengukuran memiliki nilai korelasi yang sangat kuat terhadap faktor-faktor lingkungan kerja fisik dibandingkan dengan lainnya.

HSI dihitung dengan menggunakan persamaan:

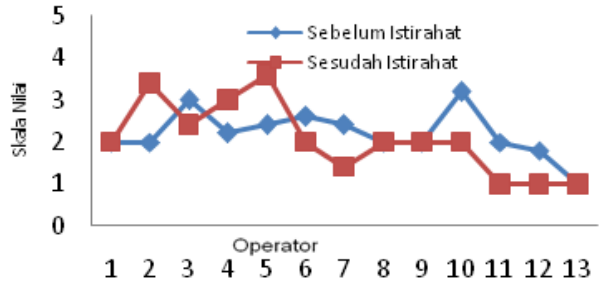
$$HSI = (E_{req}/E_{max}) \times 100\%$$

$$E_{max} = k_3 v^{0,6} (56 - Pa) Wm^{-2}$$

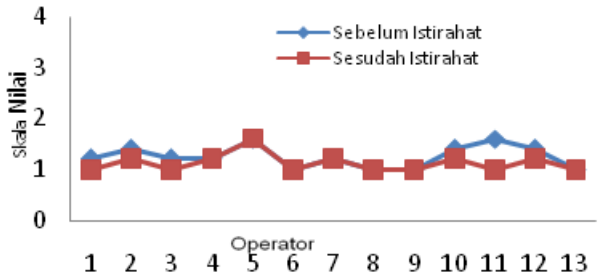
$$E_{req} = M - C - C$$

dimana:

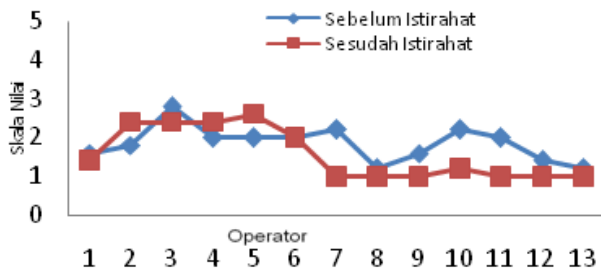
- k_3 : faktor pengali evaporasi; $k_{3clothed} = 7,0$;
 $k_{3unclthed} = 11,7$.
- E_{max} : penguapan maksimal
- E_{req} : kebutuhan penguapan
- M : metabolisme (180 W/M²)
- R : radiation loss
- C : convection Loss



(a) Sensasi termal

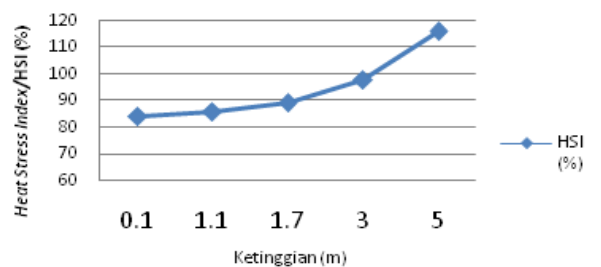


(b) Aliran udara



(c) Kondisi termal

Gambar 2. Grafik *mean vote* kuesioner termal



Gambar 3. Grafik *heat stress index* (hsi) berdasarkan ketinggian

Adapun nilai HSI berdasarkan hasil perhitungan di pengolahan data dapat dilihat pada Tabel 2.

Dari data di atas dapat dilihat bahwa indeks *heat stress* secara rata-rata adalah 94,41%. Hal ini menunjukkan bahwa indeks *heat stress* di ruangan formulasi sudah dalam kategori “*very severe heat strain*”, dimana pada kategori ini, kondisi tekanan panas di ruangan sudah akan mengganggu kesehatan operator bagian formulasi (Parsons [11]).

Tabel 2. Nilai HSI berdasarkan ketinggian pengukuran

Ketinggian (m)	tr (°C)	Pa (kPa)	R	C	Emax	Ereq	HSI (%)
0.1	31,02	3,18	17,53	5,79	186,63	156,68	83,95
1.1	30,96	3,19	17,76	5,64	183,09	156,60	85,53
1.7	30,92	3,20	17,94	5,46	175,87	156,60	89,04
3	30,98	3,18	17,70	5,26	160,94	157,04	97,58
5	31,17	3,20	16,84	4,98	136,45	158,18	115,92
Rata-rata							94,41

Tabel 3. Hasil rekapitulasi perhitungan ISBB

Waktu	Suhu basah (°C)	Suhu globe (°C)	Suhu kering (°C)	ISBB
Pagi	25,9	30,3	29,5	27,11
Siang	26,5	32,4	31,4	28,17
Rata-rata				27,64

Adapun grafik indeks HSI terhadap ketinggian dapat dilihat pada Gambar 3.

Dari data di atas juga dapat dilihat bahwa semakin tinggi ketinggian pengukuran, maka semakin tinggi nilai HSI nya. Pada ketinggian 5 meter ditunjukkan bahwa nilai HSI sudah melebihi 100%, dimana hal ini sudah melebihi batas nilai indeks *heat stress* yang ditoleransi dengan pertimbangan khusus. Pada Gambar 4 berikut ini dapat dilihat ada beberapa tumpukan bahan di ruangan formulasi. Para pekerja ada yang bekerja di atas tumpukan tersebut yang berada pada ketinggian 3 sampai 5m. Tingginya temperatur udara dan indeks HSI pada ketinggian 3 sampai 5m melatarbelakangi perlunya perancangan sistem ventilasi pada ketinggian tersebut.

Berdasarkan perhitungan pada pengolahan data, maka diperoleh hasil indeks suhu bola basah. Rekapitulasi ISBB dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 menunjukkan adanya peningkatan nilai ISBB dari pagi hingga siang hari. Hasil ISBB dan kategori beban kerja dikombinasikan untuk mengetahui persentase jam kerja dan istirahat. Adapun ISBB rata-rata adalah 27,64(°C) dan kategori beban kerja adalah sedang, maka diketahui bahwa waktu kerja berada pada 75-100% dan waktu istirahat pada 0-25% (KEP.51/MEN/1999). Dengan melakukan interpolasi Tabel 3 terhadap nilai yang diberikan KEP.51/MEN/1999, maka dapat diketahui nilainya sebagai berikut,

$$y = 1 + \frac{0,75-1}{28-26,7} (27,64 - 26,7) = 0,8192$$

maka diketahui waktu kerja adalah 81,92% atau sekitar 6,55 jam dan waktu istirahat adalah 18,08% atau sekitar 1,45 jam. Jika dibandingkan dengan jam kerja aktual di pabrik yaitu waktu kerja 7 jam dan waktu istirahat 1 jam, maka dapat disimpulkan bahwa hal tersebut tidak sesuai dengan rekomendasi Keputusan Menteri Tenaga Kerja Nomor: KEP. 51/MEN/1999 [8]. Berdasarkan keputusan Kement-

rian Dinas Tenaga Kerja untuk kondisi di ruangan formulasi, maka jam istirahat paling sedikit 1 jam 27 menit atau sekitar 1 jam 30 menit.

Pengukuran Waktu Kerja Produktif dengan Activity Sampling

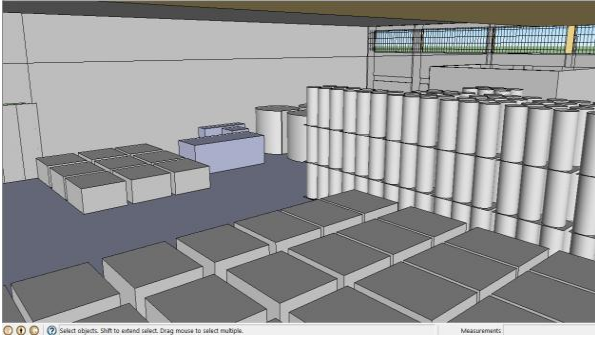
Sampling kerja dalam penelitian dilakukan dengan mengumpulkan persentase jumlah *work* dan *idle* operator bagian formulasi selama jam kerja. Adapun defenisi *work* disini adalah suatu kegiatan yang dilakukan di tempat kerja, sedangkan *idle* merupakan suatu keadaan seorang operator yang sedang tidak melakukan kegiatannya.

Secara rata-rata dapat diketahui bahwa waktu kerja produktif operator bagian formulasi adalah 76,58% dengan penyimpangan maksimum sekitar 5,91%. Angka ini berada di bawah standar yang ditetapkan oleh perusahaan yaitu 85%. Hal ini mengindikasikan perbaikan sangat dibutuhkan dalam meningkatkan waktu kerja produktif operator formulasi setidaknya dapat memenuhi angka 85%.

Berdasarkan pengamatan secara langsung di lapangan juga menunjukkan bahwa banyaknya proporsi waktu *idle* operator ini diakibatkan oleh banyaknya operator tidak tahan berada di ruangan formulasi yang terpapar panas. Mereka mendinginkan temperatur tubuh dengan meninggalkan ruangan formulasi dan masuk ke ruangan kantor staf produksi yang menggunakan *Air Conditioning*. Hal inilah yang menjadi alasan mereka ketika meninggalkan ruangan formulasi untuk mengambil waktu istirahat.

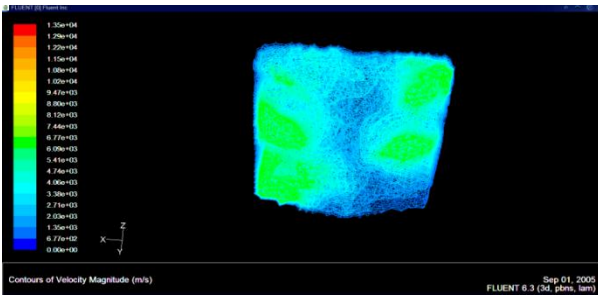
Sistem ventilasi dianalisis dengan menggunakan *software CFD*. *Software* ini dapat digunakan untuk melihat pola sebaran kecepatan angin dan juga sebaran paparan panas di dalam ruangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa warna hijau pada gambar menunjukkan adanya pergerakan udara yang lebih kuat dibandingkan yang berwarna biru. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kecepatan angin rata-rata di ruangan hanya 0,1 sampai 0,2 m/s. Sirkulasi udara juga terlihat cenderung berkumpul di tengah ruangan yang menambah kegerahan bagi operator di dalam ruangan (Gambar 5).

Panas radiasi matahari yang menembus atap terlihat pada Gambar 5. Adapun panas radiasi tersebut ditunjukkan oleh warna merah di bagian atap. Temperatur atap yang ditunjukkan *software* berkisar antara 308-309°K. Permukaan dinding berwarna biru menunjukkan bahwa dinding tersebut tidak terkena sinar radiasi panas. Hal ini terjadi karena dinding tersebut bersebelahan dengan ruangan lain yang terlindung dari sinar matahari, sedangkan dinding yang berwarna *orange* menunjukkan bahwa dinding tersebut terkena radiasi matahari juga.

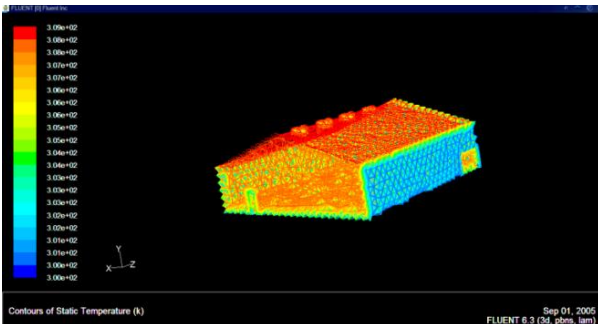


Gambar 4. Tempat kerja bagian formulasi

Sistem Ventilasi



Gambar 5a. Kontur kecepatan angin aktual



Gambar 5b. Kontur temperatur aktual

Akumulasi dari sumber-sumber panas ini mengakibatkan ruangan berwarna kekuningan dengan temperatur 33 sampai 34°C (pada *software* ditunjukkan 306-307°K). Hal ini mengakibatkan operator-operator yang berada di ruangan merasakan panas ketika bekerja.

Aspek Perancangan dan Perbaikan

Salah satu perancangan yang dibutuhkan dalam mengurangi panas di dalam ruangan adalah turbin ventilator (SNI 03-6572-2001 [15]). Jika turbin ventilator yang digunakan saat ini adalah L-45 dengan kapasitas hisap 42,39m³ dan waktu sirkulasi 10 menit, maka jumlah yang direkomendasikan adalah:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah turbin ventilator} &= \frac{\text{Volume ruangan}}{\text{Kapasitas sedot} \times \text{Waktu sirkulasi}} \\ &= \frac{4661,28 \text{ m}^3}{42,39 \text{ m}^3 / \text{menit} \times 10 \text{ menit}} \\ &= 10,99 \sim 11 \text{ buah} \end{aligned}$$

Jika turbin ventilator yang digunakan adalah L-60 dengan kapasitas hisap 75,36 m³ dan waktu sirkulasi 10 menit, maka jumlah yang direkomendasikan adalah:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah turbin ventilator} &= \frac{4661,28 \text{ m}^3}{75,36 \text{ m}^3 / \text{menit} \times 10 \text{ menit}} \\ &= 6,18 \sim 6 \text{ buah} \end{aligned}$$

Pemasangan turbin ventilator didukung oleh adanya bukaan *inlet* dan *outlet* pada dinding bangunan. Bukaan ini ditempatkan pada ketinggian 4,75m dari lantai. Hal tersebut dilakukan supaya udara yang terpapar panas dari ketinggian 3 sampai 5m dapat disirkulasikan ke luar ruangan.

Persyaratan kecepatan angin untuk menyatakan kenyamanan termal pada bangunan sangat dipengaruhi oleh temperatur *internal* dan kelembaban relatif (RH). Semakin tidak nyaman, kecepatan angin yang dibutuhkan semakin tinggi. Dari hasil studi yang dilakukan oleh Macfarlane, telah dibuat sebuah persamaan untuk menghitung kecepatan angin yang dibutuhkan untuk kenyamanan termal dan telah memasukkan unsur temperatur dan kelembaban, yaitu:

$$C_v = 0,15 \{DBT - 27,2 + ((RH - 60)/10) \times 0,56\} \text{ m/s}$$

dimana,

- C_v : kecepatan pergerakan angin untuk memperbaiki kenyamanan termal (m/s)
- DBT : temperatur bola kering(°C)
- RH : kelembaban relatif(%)

Bila nilai DBT = 30,45, RH = 68,21, maka akan diperoleh nilai C_v = 0,34 m/s

Nilai tersebut menunjukkan bahwa kecepatan udara harus dipertahankan minimal 0,34 m/s di segala penjuru ruangan. Dalam mempertahankan kecepatan udara tersebut, maka pemasangan *fan exhauser* dan *fan blower* diperlukan dengan pertimbangan kecepatan dan diameter tertentu. Kenyamanan termal diharapkan akan dapat tercapai dengan perbaikan tersebut. Dalam mengantisipasi tingginya panas yang menembus atap ruangan, maka perlu digunakan *aluminium foil*. *Aluminium foil* berfungsi dalam mereduksi panas radiasi yang menembus atap dengan kemampuan reduksi hingga 90% panas radiasi dari atap (Satwiko [13]). Adapun *aluminium foil* yang dibutuhkan untuk melapisi atap ruangan formulasi adalah sebesar luas penampang atap, yaitu 614,88 m².

Penambahan bukaan ventilasi juga dibutuhkan sebagai salah satu penangan kurangnya sirkulasi udara dalam ruangan. *ASHRAE Fundamental Handbook* [1] sebagai acuan penentuan bukaan ven-

tilasi bangunan mengharuskan bahwa untuk kategori bangunan pabrik harus memiliki setidaknya 10% dari luas lantai pabrik. Jika luas lantai pabrik adalah 583,16 m² (24,4m x 23,9m), maka luas bukaan minimal yang harus dimiliki bangunan ruangan ventilasi adalah 58,316m².

Adapun bukaan tersebut akan ditempatkan di sisi bangunan sebelah utara dan barat. Dimensi bukaan yang akan dibuka adalah 24m x 1,25m untuk dinding bagian utara dan 23m x 1,25m untuk dinding bagian barat. Penempatan bukaan tersebut berada pada ketinggian 4,75m dari lantai. Hal tersebut dilakukan untuk menjaga kerahasiaan aktivitas dalam ruangan, sehingga tidak dapat terlihat apa yang sedang dikerjakan di dalam ruangan.

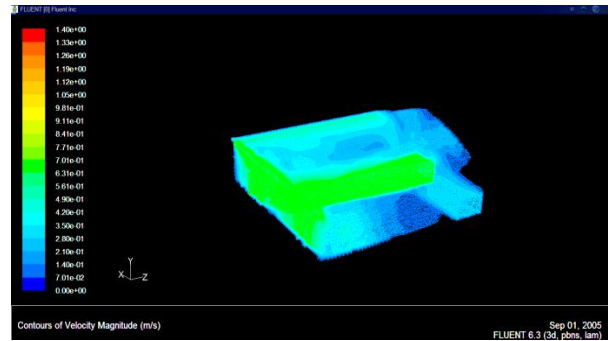
Rangkuman perbaikan yang dilakukan adalah sebagai penambahan jumlah turbin ventilator sesuai dengan hasil perhitungan, yaitu turbin ventilator L-60 sebanyak 6 buah, penambahan bukaan ventilasi dengan ukuran 24m x 1,25m untuk dinding bagian utara dan 23m x 1,25m untuk dinding bagian barat dan ketinggian 4,75m dari lantai ruangan, dan penginstalasian *aluminium foil* untuk melapisi atap dengan luas penampang 614,88 m².

Adapun penambahan *fan exhauser* dan *fan blower* menjadi pertimbangan khusus untuk dilaksanakan karena ruangan formulasi tersebut menyimpan karung-karung yang berisi tepung. Jika karung yang berisi tepung tersebut ditiup oleh *fan*, maka akan mengakibatkan semakin banyaknya debu tepung yang beterbangan di ruangan formulasi tersebut. Oleh karena itu, maka dilakukan terlebih dahulu analisis CFD untuk melihat perubahan kondisi termal yang terjadi dengan perbaikan-perbaikan sebelumnya sekalipun tanpa penggunaan *fan*, dan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 6.

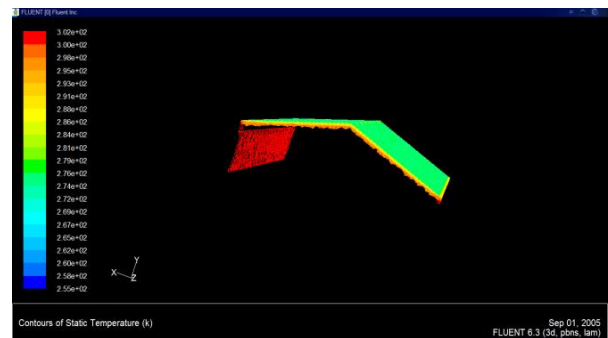
Adapun rangkuman perbandingan kondisi sebelum perbaikan dan sesudah perbaikan ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Analisis perbandingan sebelum dan sesudah perbaikan

Variabel	Kondisi sebelum perbaikan	Kondisi sesudah perbaikan
Temperatur Udara	Berkisar antara 31-33°C	Berkisar antara 28-30°C
Kecepatan Angin	Berkisar antara 0,1-0,2 m/s	Berkisar antara 0,2-0,7 m/s
Sirkulasi Udara	Cenderung tidak bergerak, vakum di bagian tengah ruangan dan membentuk putaran di pinggir ruangan.	Bergerak lancar dari arah timur ke arah barat dengan gerakan lurus tanpa adanya putaran di dalam ruangan.



Gambar 6a. Kontur kecepatan angin usulan



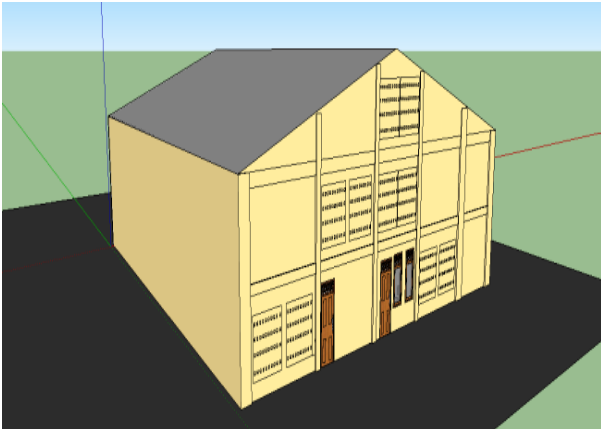
Gambar 6b. Kontur temperatur usulan

Kecepatan angin pada kondisi sesudah perbaikan berkisar antara 0,2 sampai 0,7 m/s berada sedikit di atas standar yaitu 0,2 sampai 0,3 m/s (Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1405/Menkes/SK/XI/2002 [7]), tetapi hal tersebut dapat diterima sesuai dengan beberapa eksperimen yang sudah dilakukan bahwa kecepatan angin yang lebih tinggi dari standar dapat diterima untuk manusia yang berada pada area kerja yang panas atau temperatur tinggi (Homma *et al.* [5]).

Dengan melakukan analisis CFD tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa ruangan dengan perbaikan seperti yang diuraikan sebelumnya telah mencapai kenyamanan termal. Untuk desain ruangan yang diperbaiki dapat dilihat pada Gambar 7.

Simpulan

Berdasarkan hasil analisis dari pembahasan yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa, hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata temperatur udara adalah 31,7°C, kecepatan angin 0,27m/s, kelembaban 68,21%, temperatur basah 26,18°C, temperatur kering 30,45 °C, dan temperatur *globe* 31,35 °C. Indeks paparan tekanan panas adalah 94,41% yang mengindikasikan bahwa ruangan formulasi tersebut sudah akan membahayakan kesehatan pekerja. Perhitungan ISBB menunjukkan bahwa persentase waktu istirahat seharusnya sekitar 1,45 jam menjadi 1 jam. Waktu kerja produktif operator yang terpapar panas berkisar antara (76,58±5,91)% dan tidak memenuhi standar perusahaan 85%.



Gambar 7a. Formulasi ruangan sebelum perbaikan sistem ventilasi



Gambar 7b. Rancangan ruangan setelah perbaikan sistem ventilasi

Hasil analisis sistem ventilasi dengan simulasi *software* CFD menunjukkan bahwa, setelah perbaikan, tidak ada lagi panas yang terakumulasi di area operator dalam ruangan formulasi. Setelah perbaikan, sirkulasi udara sudah berjalan lancar dengan pengaruh penambahan *inlet* dan *outlet*. Kondisi termal ruangan sudah mencapai kondisi kenyamanan, hal tersebut disimpulkan melalui teori Macfarlane, dalam persamaan kecepatan angin untuk Kenyamanan termal. Jika melihat kondisi $DBT = 30,45$ dan $RH = 68,21$, maka C_v yang dibutuhkan supaya tercipta nyaman termal adalah $0,34$ m/s. Hasil CFD menunjukkan bahwa kecepatan angin setelah perbaikan sudah di atas angka tersebut.

Perbaikan sistem ventilasi adalah penambahan bukaan ventilasi dengan ukuran $24\text{m} \times 1,25\text{m}$ untuk dinding bagian utara dan $23\text{m} \times 1,25\text{m}$ untuk dinding bagian barat dan ketinggian $4,75\text{m}$ dari lantai ruangan. Penginstalasian *aluminium foil* untuk melapisi atap dengan luas penampang $614,88\text{m}^2$. Perbaikan sistem ventilasi mekanis adalah dengan melakukan penambahan jumlah turbin ventilator sesuai dengan hasil perhitungan, yaitu turbin ventilator L-60 sebanyak 6 buah.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. A. Jabbar M. Rambe, M.Eng. yang telah membantu dalam penulisan *paper* ini.

Daftar Pustaka

1. ASHRAE, *Standard Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ANSI/ASHRAE, 55,1992.
2. Aynsley, R. M., *Architectural Aerodynamics: Handbook of Architectural Technology*. New York: van Nostrand Reinhold, 1995.
3. Currie, R. M. C.B.E., *Work Study*. PITMAN Publishing: London, 1977.
4. Homma, H., and Huda, L. N., Thermal Comfort Disturbed by Local Airflows in Winter, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 62, 2004, pp. 55-62.
5. Homma, H., Matsumoto, H., and Huda, L. N., Effect of Faster Airflows on Human Thermal Comfort in Summer, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 182, 2006, pp. 177-182.
6. Indrani, C. H. *Kinerja Ventilasi pada Hunian Rumah Susun Dupak Bangunrejo*, Surabaya, Universitas Kristen Petra, 2008.
7. Keputusan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor: 1405/Menkes/SK/XI/2002.
8. Keputusan Menteri Tenaga Kerja Nomor: KEP-51/MEN/1999.
9. Liping, W., and Hien, W. N., Applying Natural Ventilation for Thermal Comfort in Residential Buildings in Singapore, *Journal of Architectural Science University of Sydney*, 50(3), 2007, pp. 224-233.
10. Matjaz, P., Thermal Thermodynamical Analysis of Human Thermal Comfort, *Journal of Energy*, 31, 2006, pp. 732-743.
11. Parsons, K., *Human Thermal Environments: The Effect of Hot, Moderate, and Cold Environment on Human Health, Comfort and Performance*, Second Edition. London: Taylor and Francis, 2004.
12. Prianto, E., and Depecker, P., *A Case Study of Traditional Dwelling in Urban Living Quarter in Tropical Humid Region*, CERMA Laboratory Ecole d'Architecture de Nantes Rue Massenet, 2001.
13. Satwiko, P., *Fisika Bangunan*, Penerbit Andy: Yogyakarta, 2008.
14. Stanton, N., *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods*, Florida: CNC Press, 2004.
15. Tata Cara Perancangan Sistem Ventilasi dan Pengkondisian Udara pada Bangunan Gedung: SNI 03-6572-2001.