

Pengaruh Konfigurasi Lampu Pijar terhadap Distribusi Temperatur Internal Inkubator Telur Menggunakan Metode Pemetaan Termal Multi-Titik Berbasis Sensor Digital

Muhammad Syahril¹⁾, Lutfi Rustica Mundy²⁾, Khairunnas³⁾, Ulul Azmi⁴⁾, Ditya Riswandha^{5*)}.

¹⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Samudra
^{2,4,5)} Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik Iskandar Thani
³⁾ Program Studi Teknik Mesin Pendingin, BPPSDM KP SUPM LADONG

E-mail: ¹⁾muhammadsyahril@unsam.ac.id, ²⁾academylutfi@gmail.com,
³⁾khairunnaszakaria@gmail.com, ⁴⁾uazmi2738@gmail.com,
^{5*)}dityariswandha@gmail.com

Abstrak

Kebutuhan telur yang terus meningkat menuntut tersedianya sistem penetasan yang mampu menghasilkan daya tetas tinggi secara stabil. Salah satu komponen penting dalam proses penetasan adalah kestabilan dan keseragaman temperatur di dalam inkubator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pemanas inkubator telur berbasis lampu pijar terhadap distribusi temperatur internal serta pengaruhnya terhadap persentase penetasan telur. Inkubator bertingkat berkapasitas 400 telur dirancang menggunakan bahan tripleks berisolasi serbuk kayu, dilengkapi thermostat digital, thermohygrometer, ventilasi udara, wadah air, serta variasi jumlah lampu pijar sebanyak 4, 6, 8, 10, dan 12 unit. Pengujian dilakukan pada dua kondisi, yaitu tanpa dan dengan penggunaan plat seng di bawah lampu pijar sebagai penyebar panas. Pengukuran temperatur dilakukan pada beberapa titik untuk mengetahui tingkat keseragaman suhu di dalam inkubator. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah lampu pijar yang digunakan, maka perbedaan temperatur antar titik semakin kecil. Penggunaan plat seng terbukti mampu menurunkan beda temperatur dan meningkatkan keseragaman distribusi panas, dengan selisih temperatur terkecil sebesar 0,36°C pada penggunaan 12 lampu pijar. Uji penetasan menunjukkan bahwa baik pada kondisi tanpa maupun dengan plat seng, dari 45 butir telur yang diuji diperoleh jumlah menetas sebanyak 44 butir atau setara dengan persentase penetasan sebesar 97%. Dengan demikian, meskipun plat seng meningkatkan keseragaman temperatur, keberadaannya tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap besar kecilnya tingkat keberhasilan penetasan. Faktor utama yang memengaruhi keberhasilan penetasan adalah kestabilan suhu inkubator secara keseluruhan.

Kata Kunci: Inkubator Telur, Lampu Pijar, Distribusi Temperatur, Plat Seng, Penetas Telur.

Abstract

The increasing demand for eggs requires a reliable and stable incubation system with a high hatching success rate. One of the most critical factors in egg incubation is the stability and uniformity of temperature inside the incubator. This study aims to analyze the performance of an incandescent lamp-based egg incubator heating system on the internal temperature distribution and its effect on the egg hatching percentage. A multi-tier incubator with a capacity of 400 eggs was designed using insulated plywood filled with sawdust, equipped with a digital thermostat, thermohydrometer, air ventilation, a water tray for humidity control, and variations of incandescent lamps of 4, 6, 8, 10, and 12 units. The tests were carried out under two conditions, namely without

and with the addition of a zinc plate installed underneath the lamps as a heat spreader. Temperature measurements were taken at several points to evaluate the uniformity of heat distribution inside the incubator. The results showed that an increase in the number of lamps reduced the temperature differences between measurement points. The use of the zinc plate further improved temperature uniformity, producing the smallest temperature difference of 0.36°C with 12 incandescent lamps. The hatching test results indicated that both configurations, with and without the zinc plate, produced the same hatching success rate. Out of 45 eggs tested, 44 eggs hatched successfully, corresponding to a hatching percentage of 97%. These results indicate that although the zinc plate improves temperature uniformity, it does not significantly affect the hatching success rate. The main factor influencing hatching success is the overall temperature stability of the incubator.

Keywords: *egg incubator, incandescent lamp, temperature distribution, zinc plate, egg hatching.*

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan telur ayam di Provinsi Aceh terbilang sangat besar. Berdasarkan data dari instansi terkait, kebutuhan harian masyarakat Aceh diperkirakan mencapai antara 1,3 hingga 2,0 juta butir telur. Namun kenyataannya, produksi lokal di Aceh masih sangat terbatas hanya mampu memenuhi sekitar 7-10% dari kebutuhan harian tersebut, lebih dari 90% pasokan telur konsumsi di Aceh bergantung pada daerah lain, terutama Sumatera Utara ini menyebabkan Aceh rentan terhadap fluktuasi harga serta pasokan misalnya saat terjadi gangguan distribusi, cuaca buruk, atau kondisi logistik di daerah asal telur [1].

Situasi tersebut menunjukkan bahwa Aceh masih jauh dari kemandirian dalam ketahanan pangan telur, meskipun potensi untuk meningkatkan produksi lokal sebenarnya ada. Pemerintah provinsi pun telah menginisiasi program peningkatan peternakan ayam petelur dan pengembangan usaha di sektor unggas. Namun upaya ini masih menghadapi tantangan besar salah satunya adalah terbatasnya kapasitas inkubator [2] dan fasilitas penetasan telur di tingkat lokal [3]. Sebagai contoh, sebuah unit peternakan (peternakan skala kecil/menengah) di Aceh hanya mampu menghasilkan puluhan ribu butir telur per hari, namun jumlah ini masih jauh dari kebutuhan provinsi secara keseluruhan. Kondisi ini mendorong peningkatan produktivitas peternakan unggas, salah satunya melalui penggunaan inkubator telur untuk meningkatkan kapasitas penetasan.

Dalam konteks penetasan telur dan penyediaan bibit ayam di Aceh, dibutuhkan sistem inkubator yang andal untuk memastikan tingkat keberhasilan tetas yang optimal [4]. Keberhasilan penetasan telur sangat dipengaruhi oleh temperatur di dalam inkubator. Distribusi temperatur yang tidak merata dapat menyebabkan perkembangan embrio terganggu dan menurunkan daya tetas telur. Oleh karena itu, distribusi temperatur yang seragam menjadi faktor penting dalam menciptakan kondisi inkubasi yang optimal serta Kualitas telur sangat penting bagi daya tetas dan kualitas anak ayam [5]. Salah satu solusi yang dipertimbangkan adalah penggunaan sistem pemanas sederhana berbasis lampu pijar sebagai elemen pemanas sebuah alternatif yang relatif murah dan mudah diaplikasikan di skala kecil hingga menengah. Namun demikian, efektivitas sistem semacam ini sangat bergantung pada bagaimana distribusi temperatur internal inkubator dapat tercapai secara merata dan stabil selama periode penetasan. Bila distribusi panas buruk

misalnya ada titik panas atau area yang terlalu dingin maka hasil tetas bisa terpengaruh, menyebabkan rasio keberhasilan menetas rendah, bibit gagal berkembang, atau kualitas bibit ayam menurun [6].

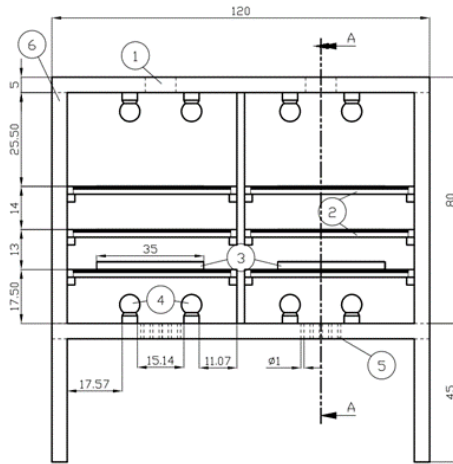
Dengan latar belakang ketergantungan tinggi terhadap pasokan luar provinsi, kapasitas produksi lokal yang rendah, dan kebutuhan untuk membangun kemandirian melalui peningkatan peternakan lokal penelitian tentang kinerja sistem pemanas inkubator berbasis lampu pijar menjadi sangat relevan. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah penggunaan lampu pijar sebagai sumber panas dapat menjamin distribusi temperatur internal yang memadai agar penetasan telur optimal, sehingga mendukung upaya swasembada telur dan bibit ayam di Aceh.

Penetasan telur yang efisien memerlukan distribusi temperatur yang seragam di dalam ruang inkubator, namun banyak inkubator bertingkat skala kecil masih menghadapi ketidakmerataan panas akibat posisi sumber pemanas yang kurang tepat. Penelitian mengenai kinerja sistem pemanas inkubator telur berbasis lampu pijar perlu dilakukan untuk mengetahui kemampuannya dalam menghasilkan distribusi temperatur yang merata. Penggunaan lampu pijar sebagai pemanas sering menimbulkan perbedaan temperatur antar-tingkat sehingga menurunkan persentase keberhasilan penetasan. Oleh karena itu, diperlukan kajian untuk memperoleh konfigurasi sistem pemanas inkubator bertingkat yang mampu menghasilkan temperatur lebih seragam.

Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh variasi posisi lampu pijar (di alas dan di atas ruang inkubator) serta keberadaan plat seng di bawah lampu pijar terhadap keseragaman temperatur dan persentase penetasan inkubator bertingkat. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja penetasan telur pada beberapa konfigurasi pemanas lampu pijar yang ditempatkan di bagian alas dan di bagian atas ruang inkubator serta kondisi dengan dan tanpa plat seng untuk menentukan sistem pemanas inkubator bertingkat yang mampu menghasilkan distribusi temperatur paling seragam dan efisiensi penetasan terbaik.

2. METODE PENELITIAN

Inkubator penetasan dirancang menggunakan beberapa perangkat utama, yaitu thermostat digital dengan resolusi: $0,1^{\circ}\text{C}$, dan akurasi: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (-50°C - 70°C) untuk mengatur temperatur, thermohygrometer digital dengan ukuran kelembaban (RH): 10% - 99%, resolusi: 1%, akurasi: $\pm 5\%$ dan ukuran temperatur ($^{\circ}\text{C}$): -50°C - 70°C , resolusi: $0,1^{\circ}\text{C}$, akurasi: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ untuk mengukur temperatur dan kelembaban, termometer sebagai alat ukur temperatur pendukung, serta lampu pijar dengan total 120 Watt sebagai sumber panas. Inkubator dibuat berbahan triplek berinsulasi serbuk kayu dengan panjang 120 cm dan tinggi inkubator 80 cm serta tinggi kaki inkubator 45 cm juga lebar inkubator 80 cm, dilengkapi ventilasi atas - bawah, rak kawat, wadah air sebagai pelembab, dan variasi jumlah lampu pijar 4 -12 unit untuk menghasilkan panas yang diperlukan.

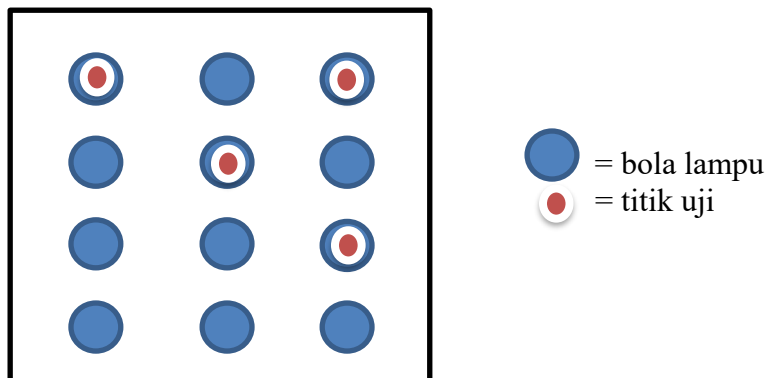


Gambar 1. Peralatan Penelitian

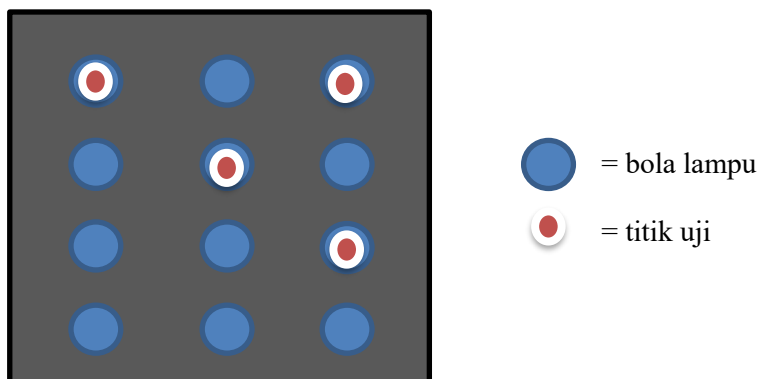
Keterangan Gambar :

- | | |
|--------------------|--------------------------|
| 1. Ventilasi Udara | 4. Lampu Pijar / Pemanas |
| 2. Rak Telur | 5. Ventilasi Udara |
| 3. Wadah Air | 6. Isolasi Thermal |

Proses perancangan meliputi penentuan ukuran inkubator dan penempatan sumber panas agar distribusi temperatur merata pada inkubator bertingkat berkapasitas 400 telur. Setelah inkubator selesai dibuat, dilakukan pengujian keseragaman temperatur pada empat titik pengukuran menggunakan termometer dan thermostat, baik tanpa plat seng maupun dengan tambahan plat seng di bawah lampu pijar.



Gambar 2. Pengambilan data uji tanpa plat seng



Gambar 3. Pengambilan data uji dengan plat seng

Setelah distribusi temperatur dinyatakan seragam melalui metode eksperimental, dilakukan pengujian penetasan telur. Uji dilakukan dengan dua perlakuan: pertama, variasi jumlah lampu tanpa plat seng; kedua, variasi jumlah lampu dengan plat seng pada jarak 10 cm. Setiap perlakuan diobservasi mulai dari hari pertama hingga telur menetas [7] selama 16 hari dengan menggunakan empat titik pengukuran yaitu pada titik T1 (Termometer digital dibawah lampu pijar), T2 (Termometer digital ditengah lampu pijar, T3 (Termometer digital ditengah lampu pijar), dan T4 (Thermostat digital dibawah lampu pijar) untuk setiap perlakuan pengujian dengan 3 (tiga) kali pengulangan pengambilan data, dengan pemantauan temperatur, kelembaban, dan perkembangan embrio [8], [9], [10]. Hasil penetasan kemudian dibandingkan untuk menentukan konfigurasi pemanas paling efisien.



Gambar 4. Tampak depan inkubator dengan pintu terbuka



Gambar 5. Tampak depan inkubator dengan ditutupi plat seng dibawah lampu

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Hasil pengujian antara jumlah bola lampu dan beda temperatur (°C) dengan tanpa atau ada menggunakan plat seng dibawah lampu

No	Jumlah bola lampu pijar	beda temperatur (°C) tanpa menggunakan plat seng dibawah lampu pijar	beda temperatur (°C) dengan menggunakan plat seng dibawah lampu pijar
1	4	0,92	0,71
2	6	0,83	0,68
3	8	0,74	0,52
4	10	0,57	0,45
5	12	0,42	0,36

Berdasarkan hasil pengukuran keseragaman temperatur pada inkubator

bertingkat, diperoleh bahwa jumlah bola lampu pijar berpengaruh terhadap besar kecilnya perbedaan temperatur antar titik pengukuran. Pada kondisi tanpa plat seng, perbedaan temperatur tertinggi terjadi pada penggunaan 4 bola lampu pijar dengan selisih suhu sebesar $0,92^{\circ}\text{C}$, sedangkan perbedaan temperatur paling kecil dicapai pada penggunaan 12 bola lampu dengan selisih $0,42^{\circ}\text{C}$. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah lampu pijar yang digunakan, distribusi panas menjadi lebih merata meskipun masih terdapat sedikit ketidaksamaan suhu.

Temperatur yang lebih tinggi pada titik yang berdekatan dengan lampu pijar disebabkan oleh dominasi perpindahan panas secara radiasi. Sementara itu, penurunan temperatur pada titik yang lebih jauh terjadi karena berkurangnya intensitas radiasi dan distribusi panas yang bergantung pada aliran konveksi udara di dalam inkubator.

Ketika plat seng dipasang di bawah lampu pijar, perbedaan temperatur pada seluruh variasi jumlah lampu menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa plat seng. Pada penggunaan 4 bola lampu, selisih suhu berkurang menjadi $0,7^{\circ}\text{C}$, dan terus menurun seiring bertambahnya jumlah lampu hingga mencapai perbedaan temperatur terkecil sebesar $0,36^{\circ}\text{C}$ pada penggunaan 12 bola lampu.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penambahan plat seng mampu meningkatkan keseragaman distribusi panas, karena plat seng membantu menyebarkan panas secara lebih merata di dalam ruang inkubator. Selain itu, penggunaan jumlah lampu pijar yang lebih banyak juga berkontribusi pada stabilitas temperatur yang lebih baik, sehingga inkubator lebih mendekati kondisi ideal untuk proses penetasan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur rata-rata inkubator berada pada rentang optimal untuk perkembangan embrio, yaitu sekitar 37°C - 38°C , sebagaimana dilaporkan oleh beberapa penelitian sebelumnya [11]. Keseragaman distribusi temperatur juga menjadi faktor penting yang memengaruhi keberhasilan penetasan karena setiap embrio memerlukan kondisi termal yang relatif sama selama masa inkubasi [12].

Tabel 2. Persentase penetasan telur unggas pada bola lampu dengan tanpa atau ada menggunakan plat seng dibawah lampu

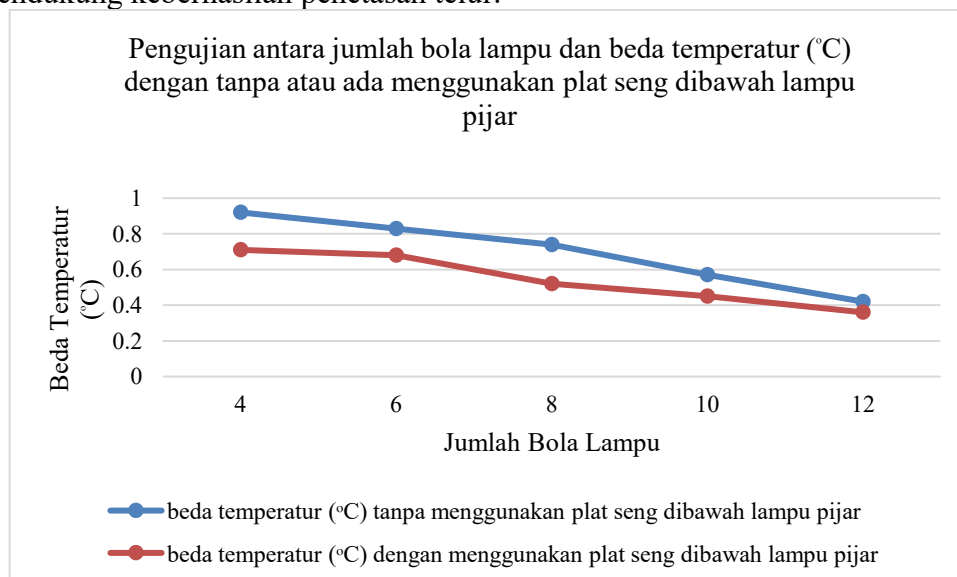
Metode Pengujian	Jumlah Telur	Jumlah Tetas	Persentase Penetasan (%)
Tanpa Plat seng dibawah lampu	45	44	97
Dengan Plat seng dibawah lampu	45	44	97

Hasil pengujian penetasan telur menunjukkan bahwa baik pada inkubator tanpa plat seng maupun dengan plat seng di bawah lampu pijar, jumlah telur yang diuji adalah sebanyak 45 butir. Dari total tersebut, 44 butir telur berhasil menetas pada kedua kondisi pengujian. Hal ini menghasilkan persentase penetasan sebesar 97% pada masing-masing perlakuan.

Meskipun kapasitas maksimum inkubator mencapai 400 butir telur, penelitian ini tidak bertujuan untuk menguji kapasitas penetasan maksimum, melainkan untuk menganalisis distribusi temperatur internal yang dihasilkan oleh sistem pemanas berbasis lampu pijar. Oleh karena itu, jumlah sampel 45 butir dipilih sebagai

representasi beban termal di dalam ruang inkubator dengan mempertimbangkan keterbatasan waktu, biaya, dan ketersediaan telur selama penelitian. Selain itu, penempatan 45 butir telur dilakukan secara merata pada beberapa titik pengamatan sehingga masih dapat menggambarkan pengaruh distribusi temperatur terhadap kondisi inkubasi. Fokus utama penelitian ini adalah karakteristik penyebaran suhu dalam ruang inkubator, bukan evaluasi performa daya tetas pada kapasitas penuh. Dengan demikian, jumlah sampel yang digunakan dianggap memadai untuk mencapai tujuan penelitian.

Data ini menunjukkan bahwa penggunaan plat seng di bawah lampu pijar tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap jumlah telur yang berhasil menetas, karena kedua perlakuan menghasilkan persentase penetasan yang sama. Meskipun pada pengujian distribusi temperatur plat seng terbukti meningkatkan keseragaman panas, namun pada tahap penetasan tingkat keberhasilan kedua kondisi tetap berada pada nilai yang sangat tinggi dan identik, yaitu 97%. Dengan demikian, dari segi hasil penetasan, kedua konfigurasi dapat dikategorikan sama efektifnya dalam mendukung keberhasilan penetasan telur.



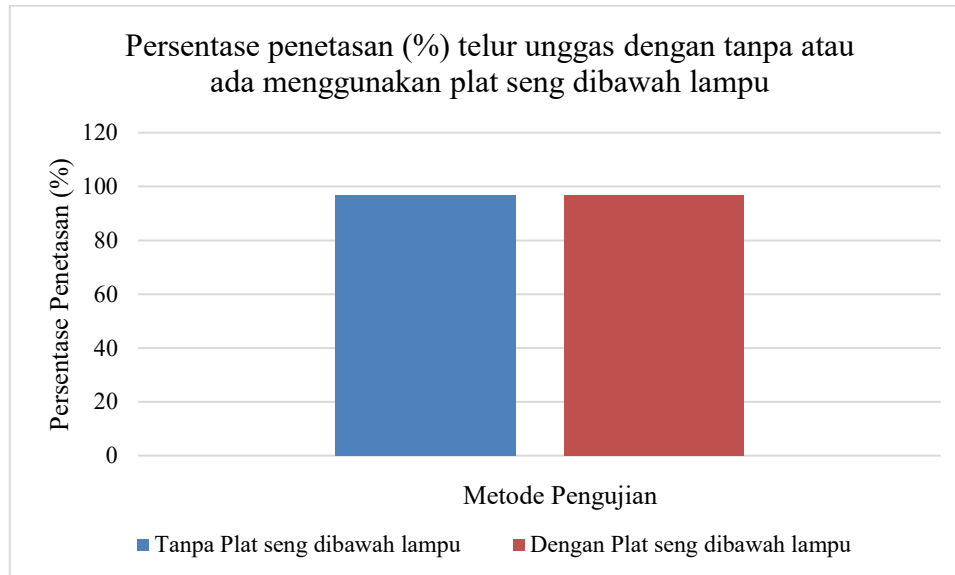
Gambar 6. Grafik pengujian antara jumlah bola lampu dan beda temperatur (°C) dengan tanpa atau ada menggunakan plat seng dibawah lampu pijar

Grafik hubungan antara jumlah bola lampu pijar dan perbedaan temperatur pada inkubator menunjukkan pola penurunan yang konsisten pada kedua kondisi pengujian, baik tanpa plat seng maupun dengan plat seng di bawah lampu pijar. Pada penggunaan 4 bola lampu, selisih temperatur masih relatif tinggi, yaitu 0,92°C tanpa plat seng dan 0,71°C dengan plat seng. Seiring bertambahnya jumlah lampu pijar menjadi 6 dan 8 unit, perbedaan temperatur menurun bertahap, masing-masing mencapai 0,83°C dan 0,74°C tanpa plat seng, serta 0,68°C dan 0,52°C dengan plat seng.

Penurunan paling signifikan terlihat pada jumlah bola lampu 10 hingga 12 unit, di mana selisih temperatur menjadi lebih kecil dan stabil. Pada penggunaan 12 bola lampu, perbedaan temperatur hanya 0,42°C tanpa plat seng dan 0,36°C dengan plat seng. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak lampu pijar yang digunakan, semakin merata distribusi panas di dalam inkubator.

Selain itu, grafik memperlihatkan bahwa penggunaan plat seng secara

konsisten menghasilkan perbedaan temperatur yang lebih kecil pada setiap variasi jumlah lampu. Artinya, plat seng berfungsi efektif sebagai penyebar panas, sehingga keseragaman temperatur inkubator meningkat. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa baik peningkatan jumlah lampu pijar maupun penggunaan plat seng memberikan kontribusi signifikan terhadap kestabilan temperatur dalam ruang inkubator.



Gambar 7. Grafik persentase penetasan (%) telur unggas dengan tanpa atau ada menggunakan plat seng dibawah lampu pijar

Grafik persentase penetasan menunjukkan bahwa baik pada pengujian tanpa plat seng maupun dengan plat seng di bawah lampu pijar, tingkat keberhasilan penetasan berada pada nilai yang sama, yaitu 97%. Hal ini menggambarkan bahwa penambahan plat seng sebagai penyebar panas tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap hasil akhir penetasan, meskipun pada pengujian temperatur sebelumnya plat seng terbukti mampu meningkatkan keseragaman suhu.

Kedua kondisi pengujian menghasilkan jumlah telur menetas yang identik, yaitu 44 dari 45 telur, sehingga grafik menampilkan dua batang dengan ketinggian yang sama. Kesamaan nilai ini menunjukkan bahwa inkubator tetap mampu bekerja secara efektif baik dengan maupun tanpa plat seng, dan faktor utama yang memengaruhi keberhasilan penetasan pada percobaan ini bukan berasal dari keberadaan plat seng, melainkan dari stabilitas sistem pemanas secara keseluruhan. Secara umum, grafik menggambarkan bahwa kedua konfigurasi pemanas memiliki performa penetasan yang sama baiknya, dengan tingkat keberhasilan yang sangat tinggi pada angka 97%.



Gambar 8. Hasil penetasan dari pengaruh plat seng dibawah lampu pijar



Gambar 9. Hasil penetasan dari pengaruh tanpa plat seng dibawah lampu pijar

4. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah bola lampu pijar dan penggunaan plat seng berpengaruh positif terhadap keseragaman temperatur di dalam inkubator. Selisih temperatur menurun dari $0,92^{\circ}\text{C}$ menjadi $0,42^{\circ}\text{C}$ tanpa plat seng dan dari $0,7^{\circ}\text{C}$ menjadi $0,36^{\circ}\text{C}$ dengan plat seng seiring peningkatan jumlah lampu. Penggunaan plat seng secara konsisten menghasilkan distribusi panas yang lebih merata dibandingkan tanpa plat seng. Pada konfigurasi terbaik dengan 16 lampu pijar berdaya total 120 watt, inkubator mampu mempertahankan perbedaan temperatur yang rendah sehingga kestabilan suhu ruang inkubasi meningkat. Kontribusi penelitian ini adalah menunjukkan bahwa kombinasi jumlah lampu pijar yang lebih banyak dan penambahan plat seng dapat menjadi metode sederhana dan efektif untuk meningkatkan keseragaman temperatur pada inkubator.

Dalam melakukan proses inkubasi menggunakan inkubator berbasis lampu pijar, sangat penting untuk terlebih dahulu memastikan kondisi embrio yang terkandung dalam telur melalui pemeriksaan awal, seperti peneropongan telur. Hal ini bertujuan untuk memilih telur yang benar-benar fertil dan memiliki embrio yang sehat, sehingga sumber daya dan waktu inkubasi dapat digunakan secara efektif. Dengan demikian, hasil penetasan dapat lebih optimal dan persentase kegagalan dapat diminimalkan.

Selain itu, disarankan agar proses inkubasi selalu diawasi secara berkala untuk memantau perkembangan embrio dan menjaga kestabilan suhu serta kelembaban di

dalam inkubator. Penerapan teknik pemeriksaan embrio ini dapat membantu mengidentifikasi telur yang tidak berkembang sehingga dapat segera dipisahkan, mencegah kontaminasi, dan meningkatkan efisiensi keseluruhan dari proses penetasan.

Dengan demikian, meskipun penelitian ini membuktikan bahwa peningkatan jumlah lampu pijar dan penggunaan plat seng dapat memperbaiki keseragaman temperatur di dalam inkubator, masih diperlukan penelitian lanjutan terkait konsumsi energi, distribusi kelembaban, serta perbandingan dengan metode pemanas lainnya untuk memperoleh evaluasi kinerja yang lebih komprehensif.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] O. K. Hélène, M. Kuradusenge, L. Sibomana, and I. I. Mwisekwa, "TinyML and IoT-enabled system for automated chicken egg quality analysis and monitoring," *Smart Agricultural Technology*, vol. 12, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.101162.
- [2] B. S. Kosemani, A. A. Babalola, and T. A. Ilori, "Development and optimization of small-scale inverter-powered incubator for egg hatchability system," *Cleaner and Circular Bioeconomy*, vol. 10, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.clcb.2025.100137.
- [3] M. Gao, Y. Ren, S. Lu, R. Reddyvari, and M. A. Amalaradjou, "Probiotic application to hatching egg surface supports microbiota development and acquisition in broiler embryos and hatchlings," *Poult. Sci.*, vol. 104, no. 9, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.psj.2025.105391.
- [4] H. Seok, R. Kim, C. Kim, and J. Kim, "Optimization of operating conditions for egg setters using computational fluid dynamics simulations," *Poult. Sci.*, p. 105897, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.psj.2025.105897.
- [5] A. N. Maina, H. Schulze, and E. G. Kiarie, "Effects of lifetime feeding of hydrolyzed yeast to broiler breeders on egg production, quality, and hatchling attributes," *Poult. Sci.*, vol. 104, no. 2, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.psj.2025.104826.
- [6] W. Boonkum, V. Chankitisakul, and W. Kenchaiwong, "Impact of heat stress on phenotypic and genetic parameters of egg fertility traits in four Thai native synthetic chicken lines," *Poult. Sci.*, vol. 104, no. 6, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.psj.2025.105131.
- [7] A. Pennings, H. J. Wijnen, C. W. van der Pol, E. A. M. Graat, B. Kemp, and H. van den Brand, "Effects of hatching egg storage duration and warming rate from storage to incubation temperature on morphological broiler embryo development," *Poult. Sci.*, vol. 104, no. 9, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.psj.2025.105451.
- [8] J. J. Maglasang et al., "Duck egg embryonic development classification using transfer learning and CNN," *Smart Agricultural Technology*, vol. 11, Aug. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100932.
- [9] M. W. Ahmed, A. Sprigler, J. L. Emmert, R. N. Dilger, G. Chowdhary, and M. Kamruzzaman, "Non-destructive detection of pre-incubated chicken egg fertility using hyperspectral imaging and machine learning," *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2025.100857.

- [10] S. A. Hosseini, A. Banakar, S. Minaei, S. A. Mehdizadeh, M. A. K. Torshizi, and G. Li, "Determination of brown egg fertility by multi-directional visible/near-infrared spectroscopy and machine learning," *Journal of Applied Poultry Research*, vol. 34, no. 2, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.japr.2025.100534.
- [11] C. Khamoun, S. Kupittayanant, and P. Kupittayanant, "Effect of egg incubator temperature on sex differentiation in Korat chickens," *J. Therm. Biol.*, vol. 125, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.jtherbio.2024.103984.
- [12] M. Li, Z. Shi, Z. Bai, Y. Hu, and G. Han, "Egg-level temperature monitoring and CFD-guided structural optimization improve thermal uniformity and hatch performance in a single-stage tunnel incubator," *Poult. Sci.*, vol. 105, no. 5, May 2026, doi: 10.1016/j.psj.2026.106666.
10.1016/j.japr.2025.100534.