

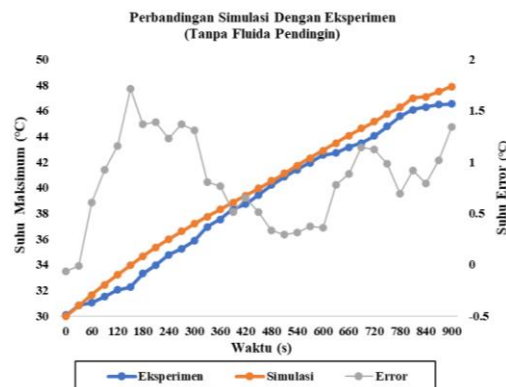
BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Data Awal

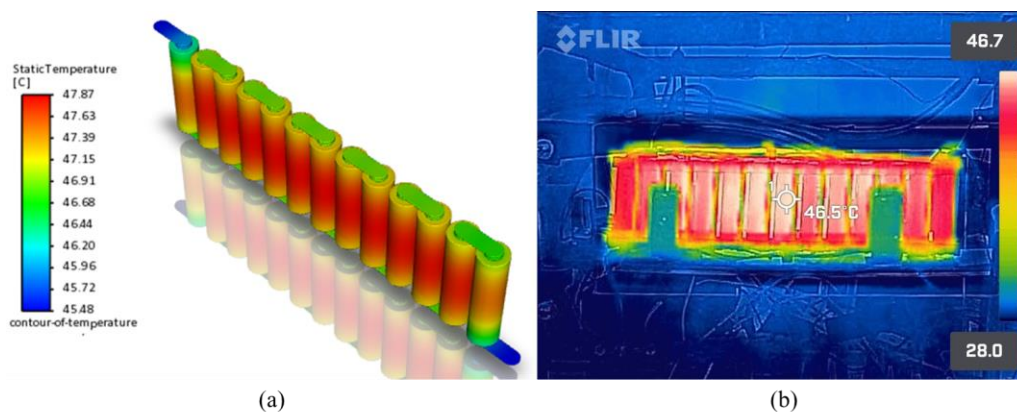
Panas yang dihasilkan modul baterai didinginkan oleh *wavy channel tube* yang menjepit modul baterai tersebut. Laju pendinginan modul baterai dipengaruhi oleh jenis fluida pendingin dan laju aliran yang diterapkan. Pada penelitian ini, simulasi dilakukan dengan menggunakan tiga jenis fluida pendingin, yaitu air (W), campuran air (W) 60% + etilen glikol (EG) 40%, dan nanofluida berupa nanopartikel *cellulose nanocrystal* (CNC) 0,5% yang disuspensikan dengan campuran air (W) 60% + etilen glikol (EG) 40%. Selain itu, pengaruh laju aliran, menggunakan 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s. Pengaruh suhu awal juga dipertimbangkan, suhu awal aliran masuk dan suhu awal seluruh domain diatur menjadi 30 °C yang diasumsikan sebagai suhu ruang. Keseluruhan simulasi dilakukan untuk proses *discharge* dengan laju *discharge* 4C (detail pada sub bab 2.2).

Hasil simulasi perlu dibandingkan dengan hasil eksperimen untuk mendapatkan parameter baterai yang sesuai. Dalam penelitian ini, perbandingan dilakukan tanpa menggunakan fluida pendingin. Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan modul baterai tanpa fluida pendingin dari hasil simulasi dengan hasil eksperimen.



Gambar 4.1 Perbandingan Hasil Simulasi Dengan Hasil Eksperimen
Modul Baterai Tanpa Fluida Pendingin

Dari gambar tersebut, suhu modul baterai meningkat seiring dengan waktu secara bertahap. Peningkatan suhu dari hasil simulasi dengan hasil eksperimen dikaitkan. Modul baterai di-*discharge* tanpa fluida pendingin dengan laju *discharge* 4C dan habis dalam waktu 900 s, didapat prediksi yang cocok antara simulasi dengan eksperimen. Suhu maksimum dari hasil simulasi dan eksperimen masing-masing sebesar 47,87 °C dan 46,7 °C dengan persentase *error* 2,44%. Gambar 4.2 menunjukkan kontur distribusi suhu pada modul baterai yang di-*discharge* tanpa fluida pendingin. Dapat diamati bahwa suhu modul baterai terdistribusi merata antar sel dan melebihi kisaran suhu optimal (detail pada sub bab 2.4).



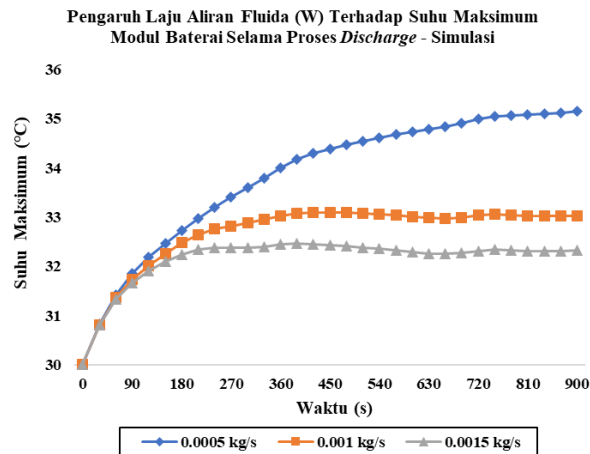
Gambar 4.2 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai (a) Hasil Simulasi & (b) Hasil Eksperimen Tanpa Fluida Pendingin

4.2 Air (W) Sebagai Fluida Pendingin

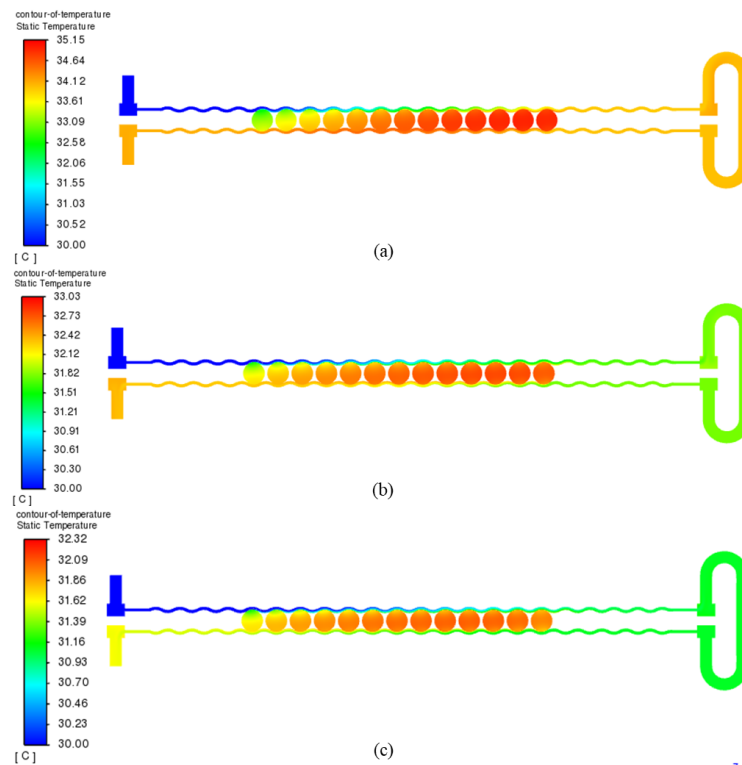
Beberapa simulasi pendinginan baterai dengan menggunakan fluida pendingin telah dilakukan. Pengaruh air sebagai fluida pendingin ditampilkan dengan variasi laju aliran fluida yang berbeda. Modul baterai di-*discharge* dengan laju *discharge* 4C dan didinginkan oleh air dengan variasi laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s. Gambar 4.3 menunjukkan hasil simulasi pengaruh air dalam mendinginkan modul baterai selama proses *discharge*.

Pada gambar 4.3 didapat bahwa penurunan suhu maksimum modul baterai dibandingkan dengan tanpa fluida pendingin mengalami penurunan

12,72 °C pada laju aliran fluida terendah. Modul baterai yang didinginkan dengan air, pada laju aliran fluida 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing memiliki nilai suhu maksimum 35,16 °C, 33,03 °C, dan 32,32 °C. Adapun distribusi suhu pada modul baterai dan fluida pendingin ditunjukkan pada Gambar 4.4.

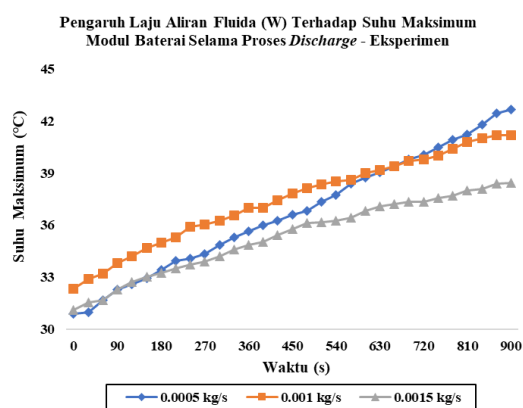


Gambar 4.3 Pengaruh Air (W) Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Simulasi



Gambar 4.4 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai dan Fluida Pendingin Laju Aliran: (a) 5×10^{-4} kg/s, (b) 10×10^{-4} kg/s, (c) 15×10^{-4} kg/s

Uji eksperimen dilakukan untuk mengetahui kinerja alat sistem pendingin baterai yang telah dibuat (Gambar 3.3). Gambar 4.5 menunjukkan hasil eksperimen pengaruh air dalam mendinginkan modul baterai selama proses *discharge*. Dari gambar tersebut didapat penurunan suhu maksimum modul baterai dibandingkan tanpa fluida pendingin mengalami penurunan 3,86 °C pada laju aliran fluida terendah. Pada laju aliran $5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, dan $15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, masing-masing pengujian dimulai pada suhu 30,8 °C, 32,3 °C, dan 31,1 °C, kemudian meningkat mencapai suhu maksimum berturut-turut 42,6 °C, 41,7 °C, dan 38,43 °C. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran dapat meningkatkan penurunan suhu maksimum modul baterai, dimana sesuai dengan hasil simulasi. Namun, hasil simulasi dan eksperimen air sebagai fluida pendingin berbeda jauh, hal ini disebabkan oleh beberapa faktor yang dijelaskan pada sub bab 4.6.

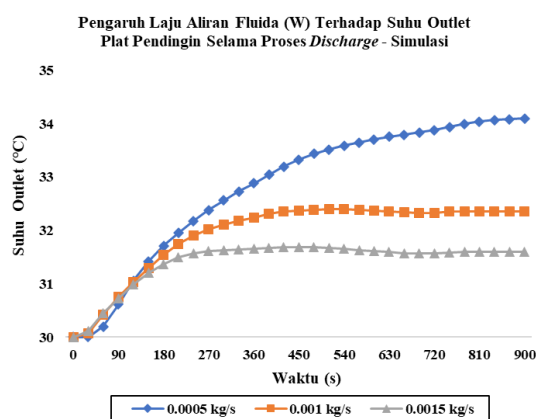


Gambar 4.5 Pengaruh Air (W) Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Eksperimen

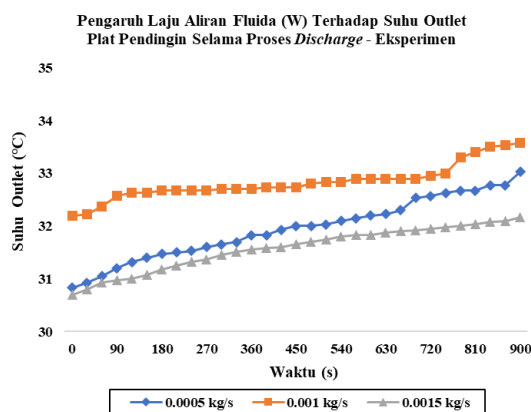
Tren grafik Gambar 4.3 dan Gambar 4.5 menunjukkan kinerja pendingin yang menyerap akumulasi panas modul baterai. Panas yang dihasilkan baterai mulai terakumulasi secara bertahap saat baterai mulai beroperasi. Baterai mulai beroperasi terukur pada detik ke-30, pengaruh dari fluida pendingin air terlihat dari penurunan suhu maksimum modul baterai. Sedangkan pengaruh laju aliran diamati ketika setiap grafik laju aliran fluida mulai terpisah yang membentuk delta suhu, ini dapat dilihat pada Gambar 4.3. Pada detik ke-900 baterai telah habis, delta suhu dapat diamati dan ditemukan bahwa semakin tinggi laju aliran

fluida, semakin berkurang delta suhunya. Penurunan delta ini sesuai dengan referensi pada penelitian Li et al., (2019) dan Sarchami et al., (2022). Namun, hal ini tidak terjadi pada eksperimen (detail pada sub bab 4.6).

Distribusi suhu modul baterai dengan fluida pendingin air ditunjukkan pada Gambar 4.4. Air mengalir di dalam *wavy channel tube* dan menyerap panas yang dihasilkan baterai, sehingga suhu air lebih tinggi pada outlet. Adapun tren peningkatan suhu outlet ditunjukkan pada Gambar 4.6 (hasil simulasi) dan Gambar 4.7 (hasil eksperimen). Dari gambar tersebut menunjukkan, tren suhu outlet eksperimen berbeda dengan hasil simulasi (dijelaskan pada sub bab 4.6). Hasil simulasi menunjukkan nilai suhu maksimum air pada outlet dengan laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing adalah 34,1 °C, 32,35 °C, dan 31,6 °C. Sedangkan hasil eksperimen berturut-turut adalah 33,03 °C, 33,57 °C, dan 32,17 °C.



Gambar 4.6 Suhu Outlet Air Selama Proses *Discharge* - Simulasi

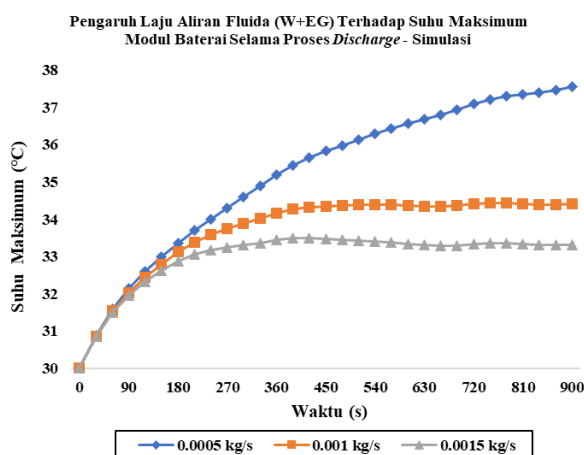


Gambar 4.7 Suhu Outlet Air Selama Proses *Discharge* – Eksperimen

4.3 Air (W) 60% + Etilen Glikol (EG) 40% Sebagai Fluida Pendingin

Fluida W+EG digunakan sebagai basis cairan untuk nanofluida CNC-W+EG. Perannya sebagai fluida pendingin juga dipertimbangkan dalam penelitian ini. Pengaruh pendinginan baterai menggunakan fluida pendingin W+EG ditunjukkan pada Gambar 4.8 (hasil simulasi) dan Gambar 4.9 (hasil eksperimen).

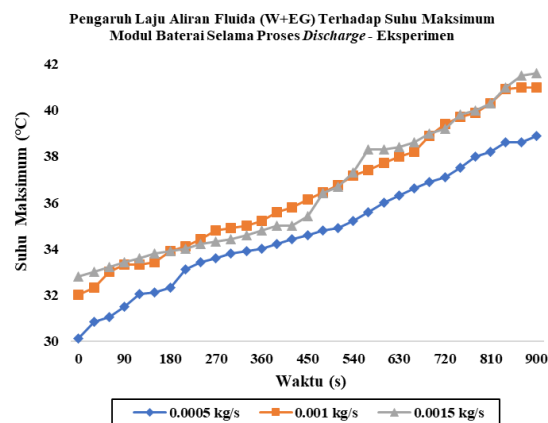
Hasil simulasi menunjukkan penurunan suhu maksimum modul baterai menggunakan fluida pendingin W+EG adalah 10,33 °C pada laju aliran terendah. Hasil ini lebih rendah dari fluida pendingin air untuk mendinginkan modul baterai. Modul baterai yang didinginkan dengan W+EG pada laju aliran fluida 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing memiliki nilai suhu maksimum 37,54 °C, 34,4 °C, dan 33,32 °C. Adapun distribusi suhu pada modul baterai dan fluida pendingin ditunjukkan pada Gambar 4.10.



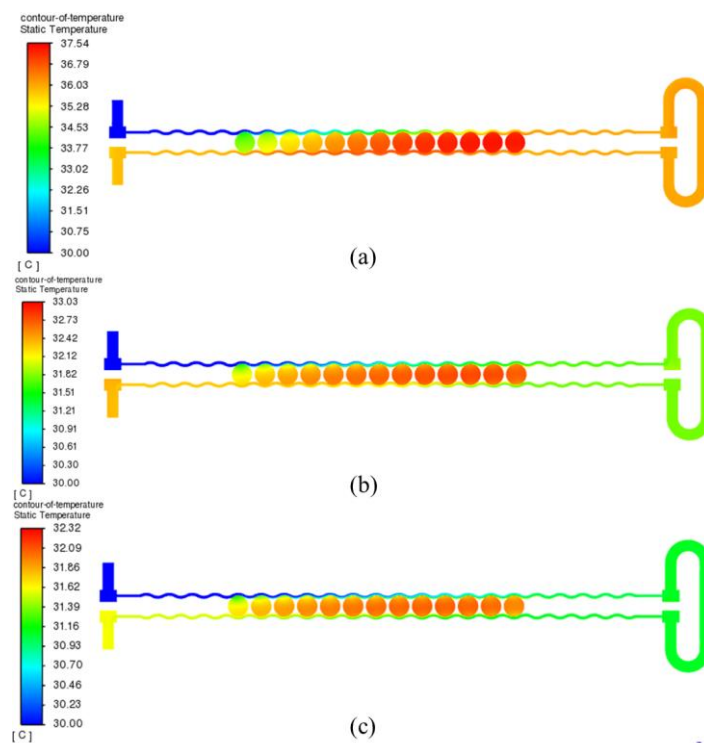
Gambar 4.8 Pengaruh W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Simulasi

Uji eksperimen dilakukan untuk mengetahui kinerja alat sistem pendingin baterai yang telah dibuat (Gambar 3.3). Hasil eksperimen pada Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh penggunaan campuran fluida W+EG sebagai fluida pendingin untuk menurunkan suhu modul baterai selama proses *discharge*. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa dengan menggunakan fluida pendingin W+EG terjadi penurunan suhu maksimum modul baterai 7,63

°C pada laju aliran fluida terendah. Pada laju aliran $5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, dan $15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, masing-masing pengujian dimulai pada suhu 30,1 °C, 32 °C, dan 32,8 °C, kemudian meningkat mencapai suhu maksimum berturut-turut 38,9 °C, 41 °C, dan 41,6 °C. Hasil simulasi dan eksperimen menghasilkan hasil yang sangat berbeda, karena dipengaruhi oleh beberapa faktor yang dijelaskan dalam sub bab 4.6.



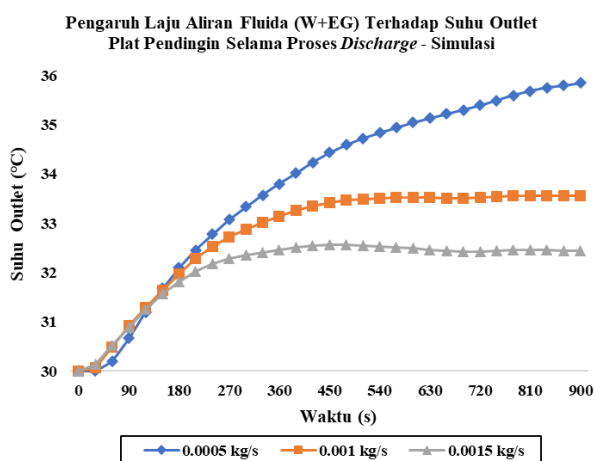
Gambar 4.9 Pengaruh W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Eksperimen



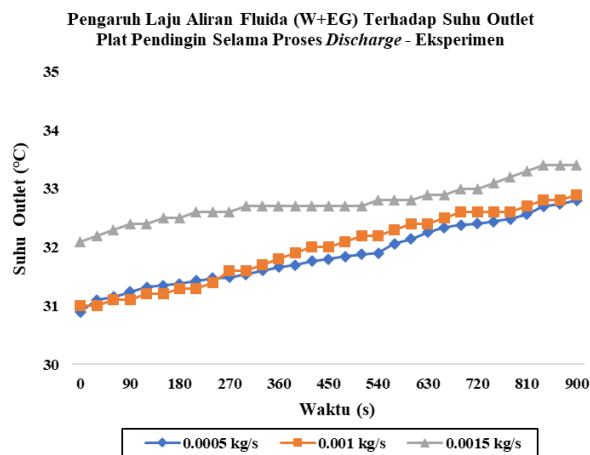
Gambar 4.10 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai dan Fluida Pendingin Laju Aliran: (a) $5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, (b) $10 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$, (c) $15 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

Tren grafik Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menunjukkan kinerja pendingin dalam menyerap panas yang terakumulasi dari modul baterai. Modul baterai mulai menghasilkan panas secara bertahap saat baterai mulai beroperasi. Baterai mulai beroperasi terukur pada detik ke-30, pengaruh dari penggunaan W+EG sebagai fluida pendingin dapat diamati dari penurunan suhu maksimum modul baterai. Sedangkan pengaruh laju aliran diamati ketika setiap grafik laju aliran fluida mulai terpisah yang membentuk delta suhu, ini dapat dilihat pada Gambar 4.8. Saat mencapai detik ke-900, kapasitas baterai telah habis dan delta suhu dapat diamati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi laju aliran fluida, semakin kecil delta suhunya. Penurunan delta ini sesuai dengan referensi pada penelitian Li et al., (2019) dan Sarchami et al., (2022). Namun, hal ini tidak terjadi pada eksperimen (detail pada sub bab 4.6).

Pada Gambar 4.10, terlihat distribusi suhu modul baterai yang didinginkan menggunakan fluida pendingin W+EG. Fluida pendingin W+EG mengalir di dalam *wavy channel tube* yang kemudian menyerap panas yang dihasilkan oleh baterai, sehingga suhu fluida W+EG menjadi lebih tinggi saat keluar dari *wavy channel* tersebut. Seperti yang terlihat dalam Gambar 4.11 dan



Gambar 4.11 Suhu Outlet W+EG Selama Proses *Discharge* - Simulasi



Gambar 4.12 Suhu Outlet W+EG Selama Proses *Discharge* - Eksperimen

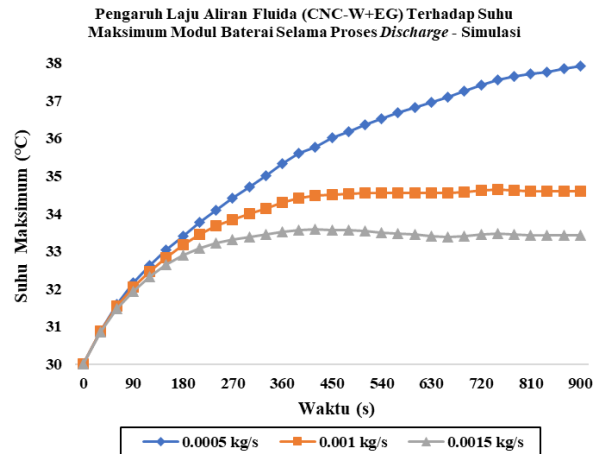
Gambar 4.12, terdapat peningkatan suhu outlet yang terjadi, baik dalam hasil simulasi maupun hasil eksperimen. Dari gambar tersebut menunjukkan, tren suhu outlet eksperimen berbeda dengan hasil simulasi (dijelaskan pada sub bab 4.6). Hasil simulasi menunjukkan nilai suhu maksimum W+EG pada outlet dengan laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing adalah 35,84 °C, 33,55 °C, dan 32,44 °C. Sedangkan hasil eksperimen berturut-turut adalah 32,8 °C, 32,9 °C, dan 33,4 °C.

4.4 Nanofluida *Cellulose Nanocrystal* (CNC) – Air (W) + Etilen Glikol (EG) Sebagai Fluida Pendingin

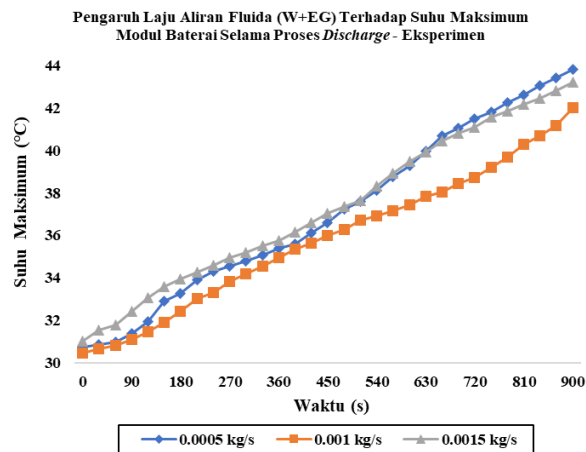
Selain basis cairan W+EG, nanofluida CNC-W+EG juga digunakan untuk mendinginkan baterai. *Properties* yang digunakan untuk merepresentasikan nanofluida tersebut mengacu pada penelitian Farhana et al., (2020). Pengaruh pendinginan baterai menggunakan fluida pendingin CNC-W+EG ditunjukkan pada Gambar 4.13 (hasil simulasi) dan Gambar 4.14 (hasil eksperimen).

Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketika menggunakan fluida pendingin W+EG, terdapat penurunan suhu maksimum modul baterai sebesar 9,94 °C pada laju aliran terendah. Hasil ini lebih rendah dari fluida pendingin W+EG sebagai basis cairannya untuk mendinginkan baterai. Namun, hasil yang didapat masih berada dalam kisaran suhu optimal baterai (detail pada sub bab 2.4). Pada laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s,

nanofluida ini mampu mengontrol suhu modul baterai, masing-masing pada 37,93 °C, 34,6 °C, dan 33,42 °C. Adapun distribusi suhu pada modul baterai dan fluida pendingin CNC-W+EG ditunjukkan pada Gambar 4.15.



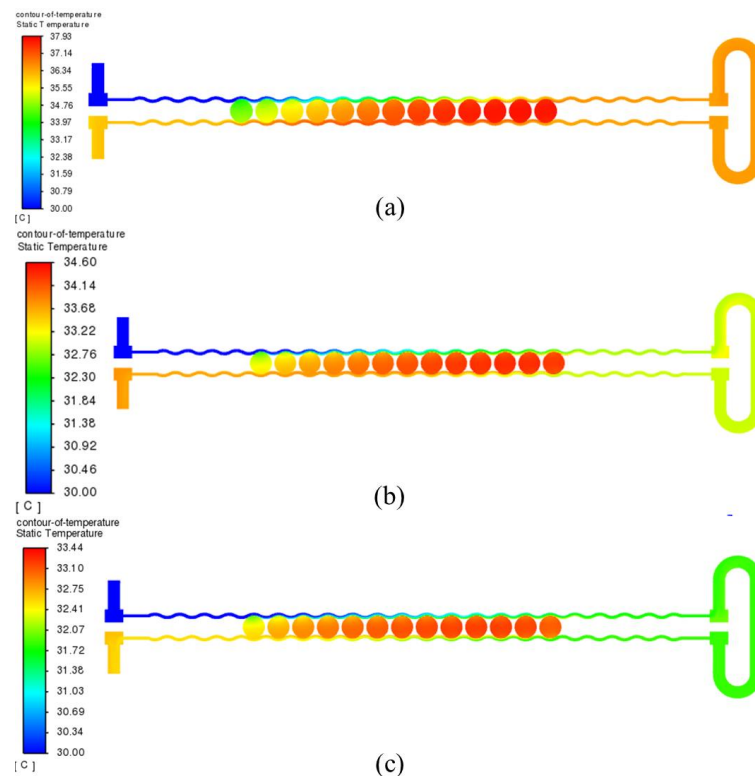
Gambar 4.13 Pengaruh CNC-W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Simulasi



Gambar 4.14 Pengaruh CNC-W+EG Sebagai Pendingin Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Selama Proses *Discharge* - Eksperimen

Uji eksperimen dilakukan untuk mengetahui kinerja alat sistem pendingin baterai yang telah dibuat (Gambar 3.3). Hasil eksperimen pada Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh penggunaan fluida pendingin CNC-W+EG untuk mendinginkan modul baterai selama proses *discharge*. Dari gambar tersebut, terlihat bahwa penggunaan fluida pendingin CNC-W+EG

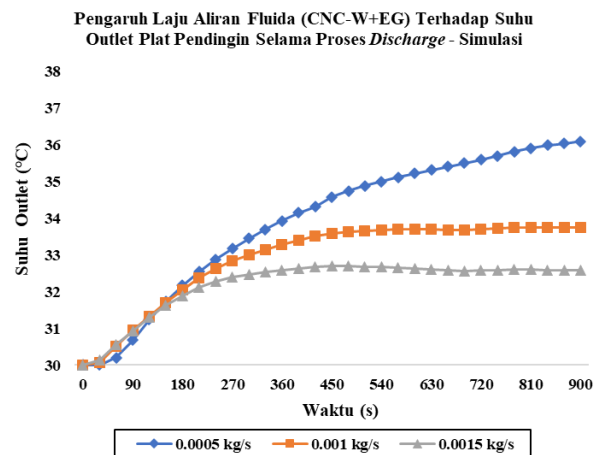
menyebabkan turunnya suhu maksimum modul baterai sebesar $2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ pada laju aliran fluida terendah. Penurunan suhu ini lebih rendah dari fluida pendingin W+EG. Pada laju aliran $5 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, $10 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, dan $15 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, masing-masing pengujian dimulai pada suhu $30,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan $31\text{ }^{\circ}\text{C}$, kemudian meningkat mencapai suhu maksimum berturut-turut $43,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $42\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan $43,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Simulasi dan eksperimen menghasilkan hasil yang sangat berbeda, dikarenakan adanya beberapa faktor yang dijelaskan dalam sub bab 4.6.



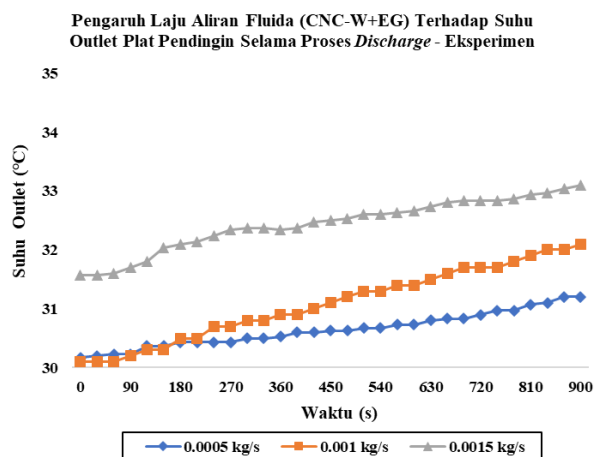
Gambar 4.15 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai dan Fluida Pendingin Laju Aliran (a) $5 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, (b) $10 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$, (c) $15 \times 10^{-4}\text{ kg/s}$

Grafik pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 menunjukkan kinerja pendingin dalam menyerap panas yang terakumulasi dari modul baterai. Saat baterai mulai beroperasi, modul baterai secara bertahap akan menghasilkan panas. Baterai mulai beroperasi terukur pada detik ke-30. Pengaruh penggunaan fluida pendingin CNC-W+EG dapat terlihat melalui penurunan suhu maksimum modul baterai. Sedangkan pengaruh laju aliran diamati ketika setiap grafik laju aliran fluida mulai terpisah yang membentuk delta suhu, ini dapat

dilihat pada Gambar 4.13. Saat mencapai detik ke-900, kapasitas baterai telah habis dan delta suhu dapat diamati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin cepat laju aliran fluida, semakin kecil delta suhunya. Penurunan delta ini sesuai dengan referensi pada penelitian Li et al., (2019) dan Sarchami et al., (2022). Namun, hal ini tidak terjadi pada eksperimen (detail pada sub bab 4.6).



Gambar 4.16 Suhu Outlet CNC-W+EG Selama Proses *Discharge* - Simulasi



Gambar 4.17 Suhu Outlet CNC-W+EG Selama Proses *Discharge* - Eksperimen

Pada Gambar 4.15, dapat diamati distribusi suhu pada modul baterai dan fluida pendingin CNC-W+EG. Aliran fluida pendingin CNC-W+EG melewati *wavy channel tube* yang menjepit modul baterai. Fluida pendingin menyerap panas untuk mendinginkan modul baterai, sehingga suhu fluida meningkat dan

keluar dengan suhu yang lebih tinggi. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17, terjadi kenaikan suhu outlet pada hasil simulasi maupun hasil eksperimen. Dari gambar tersebut menunjukkan, grafik suhu outlet eksperimen berbeda dengan hasil simulasi (dijelaskan pada sub bab 4.6). Hasil simulasi menunjukkan nilai suhu maksimum CNC-W+EG pada outlet dengan laju aliran 5×10^{-4} kg/s, 10×10^{-4} kg/s, dan 15×10^{-4} kg/s, masing-masing adalah 36,09 °C, 33,74 °C, dan 32,58 °C. Sedangkan hasil eksperimen berturut-turut adalah 31,2 °C, 32,1 °C, dan 33,1 °C.

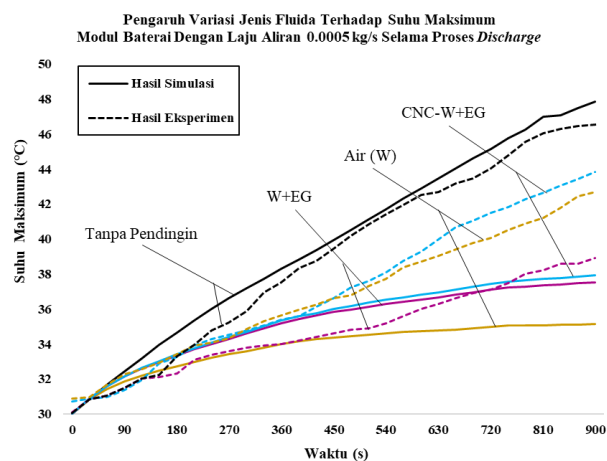
4.5 Pembahasan

Baterai Li-ion menghasilkan panas saat beroperasi karena adanya reaksi elektrokimia di dalam baterai, yaitu pergerakan ion lithium dan elektron (detail pada sub bab 2.3). Seiring waktu baterai beroperasi, panas modul baterai meningkat bertahap hingga suhu tertentu yang dipengaruhi juga pada beban listrik yang disuplai, ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pada gambar tersebut laju *discharge* atau beban ditetapkan menjadi 4C dan ini berlaku untuk keseluruhan simulasi dan eksperimen.

Fluida pendingin yang mengalir di sepanjang *wavy channel tube* berfungsi untuk mengontrol panas yang dihasilkan oleh modul baterai. Variasi laju aliran massa dan jenis fluida dipelajari untuk melihat pengaruhnya dalam penurunan suhu modul baterai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan laju aliran massa menurunkan suhu maksimum modul baterai dan suhu *outlet*. Hasil ini sejalan dengan referensi dari penelitian Li et al., (2019) dan Sarchami et al., (2022). Namun, dengan semakin tinggi laju aliran yang dibutuhkan, juga berbanding lurus dengan energi yang dibutuhkan untuk mengalirkan fluida pendingin. Ini juga berujung pada *cost* yang lebih besar. Sementara itu, hasil eksperimen tidak menunjukkan pengaruh yang konsisten dari variasi fluida pendingin dan laju aliran fluida yang digunakan terhadap penurunan suhu maksimum modul baterai. Akan tetapi, dengan adanya fluida pendingin terbukti bahwa penurunan suhu maksimum modul baterai terjadi pada eksperimen. Hal ini dikarenakan beberapa faktor yang mempengaruhi hasil eksperimen (dijelaskan pada sub bab 4.6).

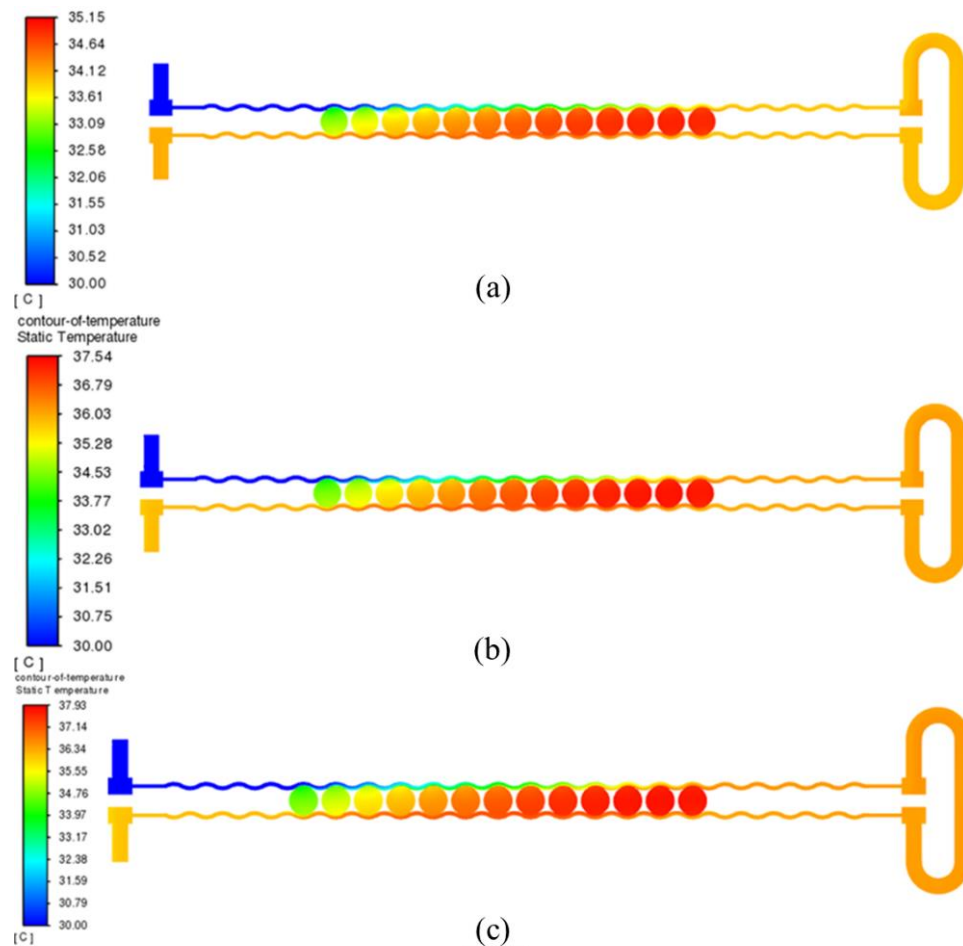
Dengan adanya fluida pendingin, suhu maksimum modul baterai dapat dikontrol agar tidak melebihi kisaran suhu optimal baterai beroperasi (detail pada sub bab 2.4). Gambar 4.18 menunjukkan pengaruh jenis fluida terhadap suhu maksimum modul baterai selama proses *discharge* pada laju aliran 5×10^{-4} kg/s. Berdasarkan gambar tersebut, hasil simulasi menunjukkan bahwa fluida yang digunakan mampu mengontrol suhu maksimum modul baterai tetap dalam kisaran suhu optimal pada laju aliran terendah. Selain itu, dari hasil ini juga diprediksi dengan meningkatkan laju aliran fluida, dapat menurunkan suhu modul baterai dengan lebih efektif. Namun, hasil yang didapat dari eksperimen berbeda dengan hasil simulasi. Hal ini disebabkan karena beberapa faktor yang mempengaruhi eksperimen, sehingga hasil yang didapat kurang relevan dengan hasil simulasi maupun referensi yang ditemukan. Beberapa faktor yang mempengaruhi hasil eksperimen dijelaskan pada sub bab 4.6.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa air menjadi fluida yang mampu mengontrol suhu maksimum modul baterai paling rendah, diikuti dengan W+EG dan CNC-W+EG. Namun, disamping baiknya performa fluida cairan dalam mendinginkan baterai, juga dibutuhkan konstruksi yang lebih rumit dan membutuhkan *cost* yang lebih besar, dibandingkan dengan udara. Hal ini dikarenakan fluida cairan membutuhkan sistem dan media untuk mengalirkannya, seperti pada penelitian tugas akhir ini.



Gambar 4.18 Pengaruh Variasi Jenis Fluida Terhadap Suhu Maksimum Modul Baterai Dengan Laju Aliran 5×10^{-4} kg/s Selama Proses *Discharge*

Distribusi suhu pada variasi fluida yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.20. Airan fluida pendingin memasuki *wavy channel tube* melalui inlet dengan suhu 30 °C (berwarna biru). Fluida pendingin mengalir dan menyerap panas dari modul baterai. Panas tersebut dibawa oleh fluida pendingin menuju outlet, sehingga suhu outlet lebih tinggi dari inlet. Dapat diamati bahwa baterai dengan suhu lebih rendah ditemukan pada baterai ke-1 dari inlet, dan diikuti baterai setelahnya dengan suhu yang meningkat. Namun, baterai terjauh dari inlet (baterai ke-13) tidak menjadi yang paling tinggi suhunya. Ini diprediksi karena setelah fluida sirkulasi, fluida menyerap panas baterai tersebut sebagai yang pertama, kemudian diikuti baterai lainnya. Pada fluida pendingin air, W+EG, dan CNC-W+EG, suhu maksimum modul baterai didapat pada baterai ke-12 dari inlet.

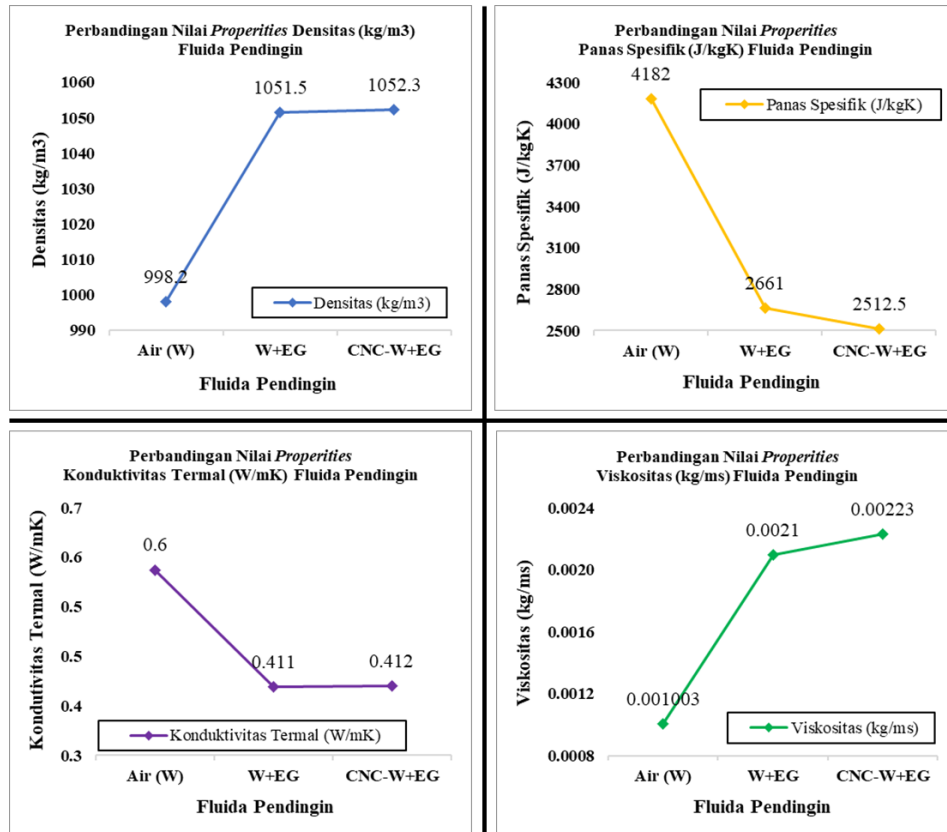


Gambar 4.19 Kontur Distribusi Suhu Modul Baterai Variasi Fluida Pendingin: (a) Air, (b) W+EG, (c) CNC-W+EG

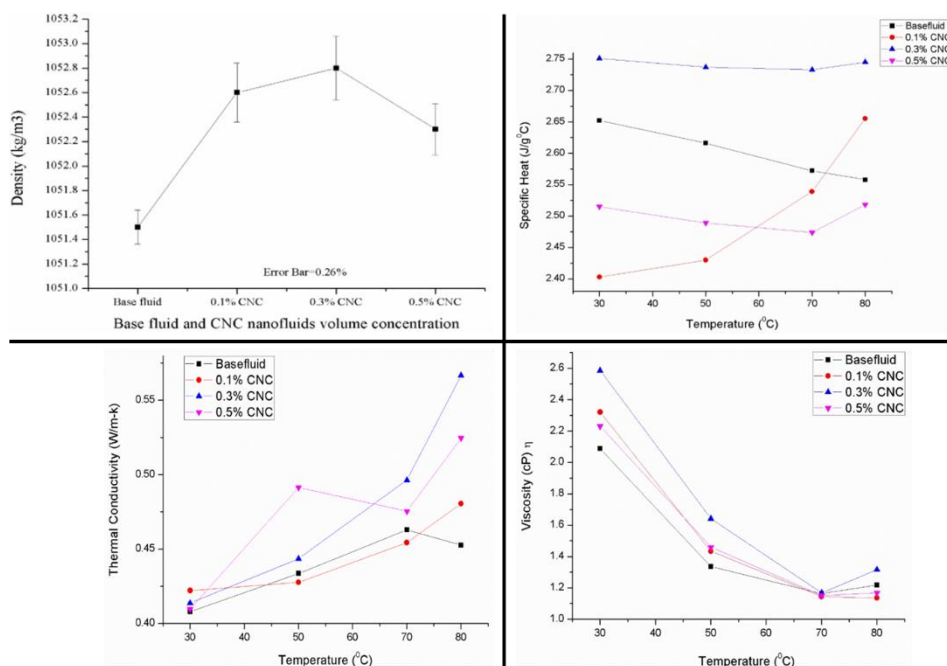
Kinerja fluida terhadap penurunan suhu maksimum baterai bergantung pada kemampuan fluida tersebut dalam menyerap dan membawa panas yang dihasilkan modul baterai. Dalam penelitian ini, hal tersebut direpresentasikan menggunakan *properties* fluida, seperti densitas, panas spesifik, konduktivitas termal, dan viskositas. *Properties* yang paling mempengaruhi dalam memindahkan panas adalah konduktivitas termal dan panas spesifik.

Air sebagai fluida pendingin memiliki densitas dan viskositas yang lebih rendah dibandingkan W+EG dan CNC-W+EG, namun memiliki konduktivitas termal dan panas spesifik yang lebih tinggi (Tabel 3.6). W+EG adalah 60% air yang dicampur dengan 40% etilen glikol sehingga menghasilkan *properties* fluida baru (Tabel 3.7), yang nilainya mengacu pada penelitian Farhana et al. (2020). W+EG memiliki densitas dan viskositas yang lebih tinggi dari air, namun konduktivitas dan panas spesifik lebih rendah. Sedangkan nanofluida CNC-W+EG merupakan nanopartikel *cellulose nanocrystal* (CNC) dengan konsentrasi 0,5% yang disuspensikan menggunakan basis fluida W+EG. Nilai *properties* dari nanofluida ini (Tabel 3.8) juga mengacu pada penelitian Farhana et al. (2020). Hal serupa juga untuk nanofluida ini, densitas dan viskositas lebih tinggi dari air, namun konduktivitas termal dan panas spesifik lebih rendah. Perbandingan nilai *properties* fluida pendingin yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.20. Sedangkan nilai *properties* yang mengacu pada penelitian Farhana et al., (2020) ditunjukkan pada Gambar 2.1.

Oleh sebab itu, diprediksi nanofluida CNC-W+EG belum menjadi yang paling efektif dalam kasus ini, namun hasil menunjukkan bahwa nanofluida tersebut mampu mengontrol suhu modul baterai pada suhu optimalnya (detail pada sub bab 2.4). Setiap fluida mempunyai keunggulan dan kekurangannya bergantung pada kebutuhan dan penggunaannya. Dalam penelitian Samylingam et al. (2018), nanofluida CNC-W+EG digunakan sebagai cairan pendingin untuk proses pemesinan bubut dan terbukti efisien mentransfer panas yang dihasilkan pada alat potong sehingga umur alat potong meningkat signifikan dan menjadi cairan pendingin yang lebih unggul dibandingkan variasi yang lain.



Gambar 4.20 Perbandingan Nilai *Properties* Fluida Pendingin



Gambar 4.21 Perbandingan Nilai *Properties* W+EG (*Basefluid*) dan CNC-W+EG (0.5% CNC) Mengacu Pada Penelitian Farhana et al., (2020)
(Sumber: Farhana et al., 2020)

4.6 Faktor Kesalahan Eksperimen

Pengaruh fluida pendingin dan laju aliran dalam menurunkan suhu maksimum modul baterai dipelajari dengan melakukan simulasi komputasi numerik dan eksperimen. Simulasi dilakukan menggunakan Ansys Fluent dengan menginputkan parameter yang akan dilakukan pengujian eksperimen. Sedangkan eksperimen dilakukan menggunakan alat pendinginan baterai yang telah dibuat, ditunjukkan pada Gambar 3.3. Dalam upaya meminimalkan *error*, validasi data awal dilakukan tanpa menggunakan fluida pendingin, yaitu membandingkan hasil simulasi dengan hasil eksperimen, ditunjukkan pada Gambar 4.1. Hal ini dilakukan untuk menghindari pengaruh lain yang dapat mempengaruhi hasil eksperimen. Dengan hasil tersebut, seluruh simulasi dan eksperimen dilakukan dengan menggunakan fluida pendingin.

Setelah seluruh simulasi dan eksperimen dilakukan, hasil simulasi dan hasil eksperimen dibandingkan. Hasil yang diperoleh dapat dilihat pada sub bab 4.2 (air sebagai fluida pendingin), sub bab 4.3 (W+EG sebagai fluida pendingin), dan sub bab 4.3 (CNC-W+EG sebagai fluida pendingin). Didapat perbedaan yang jauh antara hasil simulasi dan hasil eksperimen. Hasil simulasi sudah menunjukkan hasil yang sejalan dengan referensi lainnya tentang pendinginan baterai, namun hasil eksperimen tidak menunjukkan hal tersebut. Ada beberapa faktor kesalahan dalam eksperimen yang menyebabkan hasil yang didapat tidak relevan. Sehingga menghasilkan terbentuknya grafik seperti pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.7 (air sebagai fluida pendingin), Gambar 4.9 dan Gambar 4.12 (W+EG sebagai fluida pendingin), serta Gambar 4.14 dan Gambar 4.17 (CNC-W+EG sebagai fluida pendingin). Beberapa faktor kesalahan eksperimen tersebut diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Penggunaan Pompa

Pompa digunakan untuk mengalirkan fluida pendingin pada alat eksperimen pendinginan modul baterai. Gambar 3.2 menunjukkan skematik dari alat eksperimen tersebut. Pompa yang digunakan adalah jenis pompa celup atau rendam. Pompa ini ditempatkan di dalam tangki fluida pendingin dan *coolant* radiator, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22. Pompa menghasilkan panas ketika beroperasi. Akibatnya, fluida pendingin dan

coolant di dalam tangki juga mengalami pemanasan, sehingga suhu fluida pendingin dan *coolant* meningkat. Ini menyebabkan fluida pendingin tidak optimal dalam mendinginkan modul baterai. Selain itu, *coolant* juga menjadi tidak optimal mendinginkan fluida pendingin di dalam radiator.



Gambar 4.22 Penggunaan Pompa Pada Alat Eksperimen Pendinginan Modul Baterai

2. Geometri dan Pemasangan *Wavy Channel Tube*

Wavy channel tube yang terpasang pada modul baterai ditunjukkan pada Gambar 4.23. Geometri dan pemasangan *wavy channel tube* dapat mempengaruhi penyerapan panas modul baterai. *Wavy channel tube* harus dipasang dengan menjepit modul baterai. Selain itu, juga dipastikan permukaan modul baterai dan permukaan *wavy channel tube* saling kontak atau menyentuh. Namun, saat menjepit terdapat celah antara permukaan *wavy channel tube* dan modul baterai. Hal ini dikarenakan geometri *wavy channel* kurang cocok dengan tipe baterai yang digunakan dan konfigurasi penjepit pada alat eksperimen perlu dioptimalkan.



Gambar 4.23 *Wavy Channel Tube* Pada Modul Baterai

3. Suhu Ruang

Kondisi suhu awal eksperimen mengikuti suhu ruang dimana pengujian eksperimen dilakukan. Hal ini menyebabkan grafik hasil eksperimen yang terbentuk berawal dengan suhu yang berbeda. Selain itu, peningkatan suhu maksimum modul baterai relatif lebih cepat, sehingga penyerapan panas dengan fluida pendingin relatif lebih lambat.

4. Pengukuran Suhu

Suhu modul baterai diukur dengan FLIR (*Forward Looking Infrared*). FLIR dapat mengukur suhu rendah dan suhu tinggi pada suatu objek yang ditampilkan pada *display*. Pengukuran dilakukan dengan cara menghadapkan FLIR ke arah objek yang akan diukur. Pada saat pengujian, pengukuran dilakukan tiap 30 detik dan tidak diambil pada posisi yang sama, sehingga flir membutuhkan waktu untuk kalibrasi dan tidak selalu terpantau perubahan suhu modul baterai.

5. Konfigurasi Radiator

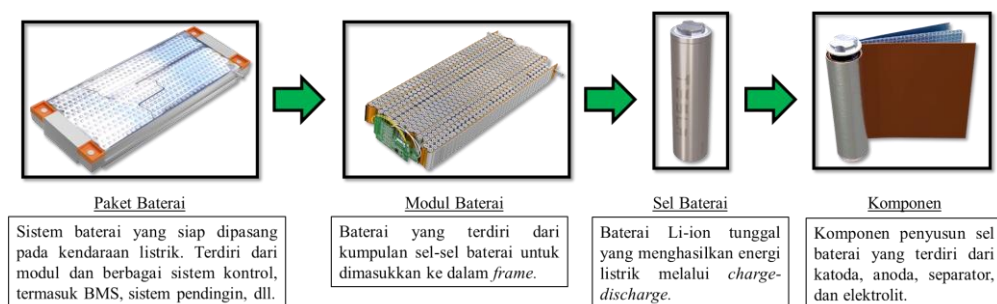
Radiator digunakan untuk mendinginkan fluida pendingin yang keluar dari outlet *wavy channel tube* dengan membawa panas modul baterai, kemudian mengalir di dalam radiator. Di dalam radiator mengalir fluida keluaran *wavy channel* dengan suhu lebih tinggi dan *coolant* dengan suhu yang lebih rendah. *Coolant* tersebut mendinginkan fluida untuk kemudian ditampung kembali di dalam tangki fluida pendingin. Radiator yang digunakan pada alat eksperimen pendinginan modul baterai ditunjukkan pada Gambar 4.24. Pada radiator tersebut hanya terjadi dua kali sirkulasi, dan diprediksi kurang sehingga dibutuhkan lebih banyak sirkulasi untuk mendinginkan fluida.



Gambar 4.24 Radiator Pada Alat Eksperimen Pendinginan Modul Baterai

4.7 Pengaruh Efektivitas Pendingin Terhadap Kinerja Baterai

Sistem baterai terdiri dari kumpulan sel-sel baterai yang terhubung dalam kombinasi seri dan paralel untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan. Sel-sel tersebut disusun sebagai modul yang dapat dilepas pasang, ditunjukkan pada Gambar 4.25. Setiap sel baterai silinder memiliki voltase 3 – 4,2 V. Jumlah sel silinder untuk kendaraan listrik sangat bervariasi, dalam *nationalgrid.com* umumnya sekitar lebih dari 2000 sel baterai Li-ion.



Gambar 4.25 Paket Baterai Ke Komponen Individual

Pengaturan suhu yang tepat pada baterai kendaraan listrik sangat penting untuk menjaga kinerja dan daya tahan baterai. Reaksi elektrokimia di dalam baterai sangat dipengaruhi oleh perubahan suhu. Dalam kondisi pengoperasian, suhu optimal baterai berkisar antara 20 °C hingga 40 °C. Pada suhu yang rendah, gerakan ion di dalam elektrolit baterai melambat. Kelambatan tersebut menghambat kapasitas baterai untuk menghasilkan daya dan energi secara maksimal, sehingga menyebabkan kinerja dan penurunan efisiensi secara keseluruhan. Untuk mengatasi hal tersebut, pada wilayah dingin, sistem manajemen termal baterai tidak hanya menggunakan pendingin baterai, elemen pemanas juga digunakan untuk meningkatkan suhu baterai. Di sisi lain, suhu tinggi berdampak buruk pada kinerja dan masa pakai baterai. Peningkatan suhu yang tinggi mempercepat laju reaksi elektrokimia di dalam sel baterai, hal ini dapat mempercepat degradasi elektroda dan elektrolit. Seiring waktu, degradasi tersebut akan mengurangi kapasitas baterai sehingga memperpendek masa pakai baterai. Selain itu, suhu tinggi dapat menyebabkan pertumbuhan dendrit internal, yaitu struktur logam konduktif kecil yang dapat

menyebabkan korsleting baterai. Fenomena *thermal runaway* juga dapat terjadi pada suhu baterai yang lebih tinggi dan tidak terkontrol berkisar antara 70 °C hingga 100 °C yang dapat menyebabkan kerusakan baterai, atau bahkan kebakaran dan ledakan.

Kendaraan listrik memerlukan sistem pendingin yang efektif untuk memastikan kinerja, masa pakai, dan keamanan baterai yang optimal. Sistem pendingin mengontrol suhu baterai untuk mencegah modul baterai terlalu panas selama pengoperasian. Suhu baterai diluar kisaran optimal, dapat menyebabkan penurunan kapasitas, efisiensi, dan masa pakai baterai secara keseluruhan. Sistem pendingin yang efektif memastikan kinerja yang konsisten, terutama ketika terdapat beban berat seperti kecepatan tinggi atau pada jalan menanjak. Selain itu, pendinginan yang efektif membantu menghilangkan panas berlebih yang dapat memungkinkan proses *charging* lebih cepat dan aman. Masa pakai baterai ditunjukkan dengan jumlah siklus *charge-discharge* yang mampu dicapai baterai. Sistem pendingin yang efektif berfungsi untuk mempertahankan kondisi baterai tetap optimal, dalam *evexpert.com* biasanya baterai akan bertahan 1000 – 1500 siklus dengan sistem pendingin yang baik.

Dalam kasus penelitian ini, modul baterai yang digunakan hanya terdiri dari 13S1P (13 Seri dan 1 Paralel) sel baterai yang menghasilkan 54 V. Jumlah sel baterai yang digunakan masih belum merepresentasikan modul baterai untuk kendaraan listrik. Namun, dapat digunakan untuk menyelidiki fluida pendingin yang ditetapkan pada penelitian ini. Hal ini dapat dilihat dari pengaruh masing-masing fluida pendingin terhadap penurunan suhu maksimum modul baterai (sub bab 4.2, 4.3, dan 4.4). Fluida pendingin air (W) menjadi yang paling efektif, dibandingkan fluida pendingin W+EG dan CNC-W+EG. Di sisi lain, jika yang digunakan modul baterai yang sebenarnya dari kendaraan listrik, maka panas yang dihasilkan baterai menjadi lebih tinggi. W+EG sebagai fluida pendingin dan basis fluida dari CNC memiliki titik uap yang lebih tinggi dari pada air (W) sehingga dapat menyerap panas pada suhu yang lebih tinggi tanpa mendidih. Selain itu, titik beku W+EG juga jauh lebih rendah dari air (W) sehingga dapat digunakan pada wilayah atau daerah yang dingin tanpa membeku.