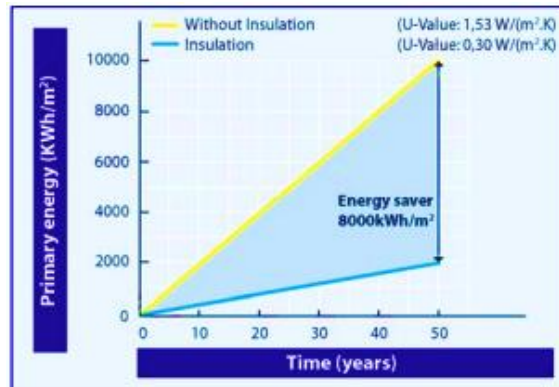


BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konsumsi energi menempati posisi paling penting, yang secara langsung mempengaruhi ekonomi dan lingkungan. Peningkatan kebutuhan energi semakin tinggi seiring dengan pemanasan global. Berdasarkan data dari *Internasional Energy Agency* (IEA), sebanyak 30-40% konsumsi energi global berasal dari bangunan yang berkontribusi hingga 26% emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Lebih lanjut lagi, menurut kebijakan energi termal, target penting adalah penerapan sumber energi terbarukan serta efisiensi energi dan penghematan biaya (Dolgun et al., 2023). Solusi untuk mengimbangi fluktuasi antara konsumsi energi dan kebutuhan energi adalah dengan menyimpan energi termal atau meminimalkan energi yang hilang untuk mendukung konservasi energi (Ferrer et al., 2017). Salah satu solusi yang dapat ditawarkan yaitu dengan menciptakan suatu material yang dapat meminimalkan energi yang hilang dan mengurangi penggunaan energi secara efisiensi. Insulasi termal merupakan material yang mendukung konservasi energi, karena dapat menghambat perpindahan panas pada bangunan yang menyebabkan energi hilang. Salah satu material insulasi termal yang unggul adalah *Rigid Polyurethane Foam* (RPUF) yang memiliki sifat ringan dan tahan lama (Yang et al., 2012), memiliki porositas tinggi, konduktivitas termal rendah, dan sifat mekanik yang hebat (Chai et al., 2019).

RPUF adalah polimer termoset yang memiliki sifat unik mengandung gugus fungsi uretan (NHCOO-) dalam rantai utamanya (Dutta, 2018). Poliuretan dibuat melalui reaksi antara gugus isosianat (-N=C=O) dengan gugus hidroksil (-OH) dengan adanya surfaktan, katalis, dan zat peniup (Czlonka et al., 2021). Asosiasi Federasi Poliuretan mendiskripsikan bahwa penggunaan RPUF dapat mengurangi secara signifikan pemakaian energi suatu bangunan seperti yang dijelaskan pada Gambar 1.1. Energi yang dibutuhkan untuk produksi RPUF setebal 80 mm adalah sebesar 100 kWh, akan tetapi penggunaan material tersebut sebagai insulasi bangunan dapat secara signifikan menghemat energi sebesar 160 kWh setiap tahunnya, yang artinya diakhir usia bangunan selama 50 tahun dapat secara efektif menghemat 8000 kWh (Associations, 2006).



Gambar 1. 1 Grafik penggunaan energi dengan dan tanpa insulasi termal (Associations, 2006)

Selama ini penggunaan poliuretan dipasok oleh industri, namun RPUF yang menggunakan formulasi poliol komersial memiliki keterbatasan pada formulasinya yang tidak bisa ditingkatkan sesuai dengan kegunaan. Oleh karena itu pengembangan formulasi RPUF yang memiliki sifat mekanik dan termal yang unggul sebagai insulasi termal menjadi penelitian yang menarik. Kinerja insulasi termal dapat ditingkatkan dengan menurunkan konduktivitas. Hal ini dapat dilakukan dengan mengurangi ukuran sel rata-rata dengan penambahan bahan penguat (*reinforcement*) (Jarfelt & Ramnäs, 2006). Bahan penguat yang mengisi RPUF dapat bertindak sebagai penghalang laju perpindahan radiasi panas (Harikrishnan et al., 2010).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan seperti pembuatan RPUF dengan menambah bahan penguat aluminium dietilfosfinat (Tang et al., 2020) dan BP@MoS₂ hidrida (He et al., 2022). Penelitian (Tao et al., 2023) mengembangkan RPUF dengan penguat P/Cu-*hybris silica aerogel* (m-SA) untuk meningkatkan sifat mekanik dan termal. Namun penggunaan penguat berbahan inorganik membutuhkan biaya yang relatif mahal dan kurang ramah lingkungan. Salah satu bahan penguat yang menarik adalah nanoselulosa. Nanoselulosa merupakan nanopartikel hasil sintesis selulosa, dimana selulosa merupakan bahan alam yang ramah lingkungan, dapat diperbaharui, dan memiliki sifat yang mudah dimodifikasi (Gómez H. et al., 2016). Nanoselulosa dapat disintesis dari berbagai bahan alam, limbah, maupun bakteri. Sumber bahan alam memiliki kelemahan berkompetisi dengan bahan pangan dan kebutuhan lain, sedangkan sumber selulosa bakteri

memiliki kelemahan jumlah yang sedikit dan memerlukan waktu lama. Selulosa yang berasal dari limbah memiliki potensi untuk dimanfaatkan, salah satunya yaitu limbah Tandan Kelapa Sawit (TKS) yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Dimana, sebanyak 1 ton kelapa sawit dapat menghasilkan limbah TKS sebanyak 23% (Yiin et al., 2019). Terdapat dua jenis nanoselulosa alam yaitu nanokristal selulosa dan nanofiber selulosa. Nanokristal selulosa umumnya memiliki ukuran diameter lebih kecil, permukaan mudah dimodifikasi, modulus spesifik yang tinggi dan proses sintesis yang lebih mudah (X. Zhou et al., 2016).

Berdasarkan permasalahan dan potensi yang ada maka penelitian ini berfokus pada pengembangan formulasi RPUF dengan penguat nanoselulosa untuk mendapatkan material insulasi termal dengan sifat termal dan mekanik yang baik untuk mendukung konservasi energi.

1.2 Perumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh penambahan nanokristal selulosa (CNC) terhadap karakteristik komposit *Rigid Polyurethane Foam* (RPUF) formulasi komersial?
2. Bagaimana pengaruh penambahan nanokristal selulosa (CNC) dan nanofiber selulosa (CNF) terhadap karakteristik komposit *Rigid Polyurethane Foam* (RPUF) formulasi sendiri?
3. Bagaimana perkiraan penghematan energi yang dapat dicapai dengan menggunakan komposit *Rigid Polyurethane Foam* (RPUF) berpenguat nanoselulosa sebagai insulasi termal pada dinding bangunan?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis dan mengevaluasi pengaruh penambahan nanokristal selulosa (CNC) terhadap karakteristik komposit *Rigid Polyurethane Foam* (RPUF) formulasi komersial
2. Menganalisis dan mengevaluasi pengaruh penambahan nanokristal selulosa (CNC) dan nanofiber selulosa (CNF) terhadap karakteristik komposit *Rigid Polyurethane Foam* (RPUF) formulasi sendiri

3. Menghitung perkiraan penghematan energi yang dapat dicapai dengan menggunakan komposit *Rigid Polyurethane Foam* (RPUF) berpenguat nanoselulosa sebagai insulasi termal pada dinding bangunan

1.4 Manfaat Penelitian

1. Bagi lingkungan, penelitian ini dapat mendukung pengurangan pemanasan global akibat pemakaian energi berlebih
2. Bagi pengembangan ilmu penelitian, penelitian ini dapat memberikan pengembangan formulasi RPUF dan pengembangan komposit RPUF dengan penguat nanoselulosa
3. Bagi masyarakat, penelitian ini dapat meningkatkan nilai guna tandan kosong kelapa sawit sebagai sumber nanoselulosa, menjadi penguat pada komposit RPUF

1.5 Orisinalitas Penelitian

Adapun orisinalitas penelitian yang akan dilakukan dengan penelitian sebelumnya dijelaskan pada Tabel I.1 berikut.

SEKOLAH PASCASARJANA

Tabel 1. 1 Orisinalitas Penelitian

No	Penelitian	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analysis
1.	(Tao et al., 2023)	Thermal insulation, flame retardancy, smoke suppression, and reinforcement of rigid polyurethane foam enabled by incorporating a P/Cu-hybrid silica aerogel	• Penelitian ini menggunakan komposit <i>Polyurethane Foam</i> (RPUF) dengan P/Cu-hybrid <i>silica aerogel</i> (m-SA) sebagai insulasi termal • Karakterisasi yang dilakukan berupa struktur morfologi, ketahanan api, penekan asam, sifat mekanik, konduktivitas termal. Hasil yang diperoleh • <i>Polyurethane Foam</i> (RPUF) dibuat dari • m-SA dibuat dari sintesis bahan penghubung silan yang mengandung fosfor (APD), logam transisi, Cu, dan TEOS dengan metode sol gel. • Hasil analisis Thermal Gravimetri menunjukkan penambahan m-SA pada RPUF meningkatkan suhu dekomposisi awal dan kemampuan	• Penelitian yang akan dilakukan menggunakan komposit <i>Rigid Polyurethane Foam</i> (RPUF) dengan nanoselulosa • Komposisi yang akan digunakan menggunakan formulasi <i>in-house</i> (sendiri) dengan perlakuan optimasi menggunakan metode Taguchi • Karakterisasi yang membedakan 2 jenis nanoselulosa yang digunakan adalah struktur morfologi dan kristalinitas. • Karakterisasi yang dilakukan pada komposit berupa struktur morfologi, konduktivitas termal, sifat mekanik kompresi dan yang berbeda dari penelitian (Tao et al., 2023).

			• Hasil analisis sifat mekanik penggabungan m-SA dengan P/Cu mencegah perpindahan bahan yang mudah terbakar, gas beracun, dan asap. Peningkatkan isolasi termal, ketahanan api, dan penekanan asap.	
2.	(Chen et al., 2022)	A facile method to prepare superhydrophobic nanocellulose-based aerogel with high thermal insulation performance via a two-step impregnation process	• Penelitian ini fokus pada metode untuk membuat superhidrofobik nanoselulosa aerogel sebagai insulasi termal Hasil yang diperoleh: • Aerogel nanoselulosa yang dihasilkan memiliki sifat hidrofobik yang dapat menyerap kelembapan diudara dan lingkungan dan bagus untuk bahan isolator termal • Aerogel selulosa nanofibril (CNF) dibuat dengan metode pengeringan beku dan kemudian dimodifikasi dengan proses impregnasi • Modifikasi silanisasi membuat aerogel CNF menjadi superhidrofobik (sudut kontak air hingga $155,2^\circ$)	• Penelitian yang akan dilakukan menggunakan metode ultrasonikasi agar diperoleh campuran yang homogen dan memiliki sifat fisik yang baik sedangkan pada penelitian (Chen et al., 2022) menggunakan dua proses impregnasi. • Selain itu penelitian yang akan dilakukan menggunakan komposit RPUF-nanoselulosa berbeda dengan Chen (2022) yang hanya menggunakan nanoselulosa aerogel.

			Kinerja insulasi termal asli yang sangat baik (konduktivitas termal $0,03249 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) setelah terpapar air, dan konduktivitas termal meningkat ($0,03249 - 0,04561 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) dengan peningkatan konsentrasi nanofibril selulosa (2,5–4,5% berat)	
3.	(Uram et al., 2021)	Natural Oil-Based Rigid Polyurethane Foam Thermal Insulation Applicable at Cryogenic Temperatures	- Penelitian ini menggunakan busa poliuretan kaku dengan biopoliol dari biji lobak dan minyak yang dirancang sebagai kriogenik aplikasi isolasi kedirgantaraan Hasil yang diperoleh: - Peningkatan nilai koefisien konduktivitas termal dengan peningkatan nilai semu - Kekuatan mekanik busa poliuretan kaku memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi pada suhu kriogenik (suhu rendah) - Busa poliuretan kaku baik digunakan sebagai bahan isolasi termal pada suhu rendah.	- Penelitian yang akan dilakukan menggunakan RPUF dengan formulasi <i>in-house</i> sebagai insulasi termal pendukung konservasi energi. - Formulasi RPUF yang digunakan berbeda. - Pada penelitian ini tidak mendalami terkait aplikasinya

4.	(Khaleel et al., 2021)	Influences of turkey feather fiber (TFF) loading on significant characteristics of rigid polyurethane foam: Thermal degradation, heat insulation, acoustic performance, air permeability and cellular structure	• Penelitian ini menggunakan bahan busa poliuretan kaku dengan serat bulu kalkun (TFF). • Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pemuatan serat bulu kalkun • Karakterisasi yang dilakukan berupa degradasi termal (TGA), insulasi panas, kinerja isolasi (konduktivitas dan kinerja akustik), dan potensi aplikasi (permeabilitas udara dan struktur morfologi SEM) Hasil yang diperoleh: • Variasi yang digunakan pada penelitian ini yaitu persentase serat bulu kalkun 3,6,9,12, dan 15%. • Sintesis serat bulu kalkun dilakukan dengan metode satu tutup • Analisis TGA menunjukkan penggabungan TFF pada persentase rendah memberikan stabilitas termal pada busa karena interaksi kimia yang kuat antara TFF dengan RPUF	• Penelitian yang akan dilakukan menggunakan RPUF yang ditambah dengan nano selulosa • Tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan komposit RPUF dengan nanoselulosa sebagai insulator termal • Pada penelitian Khaleel et al (2021) menggunakan penambahan bulu kalkun pada busa poliuretan berbeda dengan penelitian yang akan dilakukan menggunakan yaitu dengan penambahan nanoselulosa.
----	------------------------	---	---	--

			Perbandingan busa tanpa serat TFF dengan serat TFF 3 dan 6% memberikan hasil permeabilitas udara yang lebih rendah	
5.	(Sakuma et al., 2021)	Mechanically Strong, Scalable, Mesoporous Xerogels of Nanocellulose Featuring Light Permeability, Thermal Insulation, and Flame Self-Extinction	- Penelitian ini menggunakan xerogel mesopori berbasis nanoselulosa Hasil yang diperoleh: - Struktur xerogel mesopori dengan porositas tinggi (~80%) dan SSA tinggi ($>400 \text{ m}^2 \text{g}^{-1}$) - Karakterisasi menyoroti multifungsi xerogel CNF yang menggabungkan kekuatan luar biasa (kompresi $E = 170 \text{ MPa}$, $\sigma = 10 \text{ MPa}$; tegangan $E = 290 \text{ MPa}$, $\sigma = 8 \text{ MPa}$), permeabilitas cahaya sedang, insulasi termal ($0,06\text{--}0,07 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), dan api padam sendiri.	Penelitian yang akan dilakukan menggunakan busa poliuretan kaku yang digabung dengan nano selulosa dalam bentuk serbuk bukan xerogel namun dalam bentuk kristal.
6.	(Shao et al., 2020)	Renewable natural resources reinforced polyurethane foam for use	Penelitian ini menggunakan poliuretan yang digabung dengan serat kayu, serat bambu, dan sekam padi dengan persentase 25%, 30%, dan 35% untuk mendapatkan insulasi termal	Penelitian yang akan dilakukan menggunakan busa poliuretan kaku yang digabung dengan serat selulosa.

		of lightweight thermal insulation	yang ringan, hemat energi, dan ramah lingkungan. Hasil yang diperoleh: • Nilai kerapatan semu untuk insulasi poliuretan termal diperkuat serat alami adalah antara 105 kg.m^{-3} dan 178 kg.m^{-3} oleh menambahkan 35% serat • Konduktivitas termal berkisar antara $0,045$ hingga $0,065 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$. • Kekuatan mekanik meningkat dengan penambahan serat alami.	• Serat selulosa berasal dari tandan kosong kelapa sawit yang dikembangkan kembali menjadi mikro-nano selulosa.
7.	(Z. Zhang et al., 2020)	Cellulose-chitosan framework/polyaniline hybrid aerogel toward thermal insulation and microwave absorbing application	• Penelitian ini menggunakan bahan cellulose-chitosan/PANI aerogel (CCPA) sebagai bahan kontrol radiasi infra merah. • Karakterisasi yang dilakukan berupa uji morfologi menggunakan SEM, FTIR, XRD, termal gravimetri (<i>thermal gravimetric</i>), dan pencitraan inframerah termal (<i>thermal infrared imaging</i>). Hasil yang diperoleh:	• Penelitian yang akan dilakukan menggunakan bahan poliuretan dan nano selulosa untuk aplikasi sebagai insulasi termal pendukung konservasi energi utamanya pada bangunan.

			• Analisis Cellulose-chitosan/PANI aerogel (CCPA) memiliki kinerja penyerapan gelombang mikro (MA) dari aerogel dengan fe luas 6,04 GHz dan intensitas serapan kuat -54,76 dB. • Analisis inframerah termal menunjukkan penurunan suhu dari 27,6 menjadi 23,9 °C dengan kenaikan kandungan kitosan. • Analisis termal gravimetri menunjukkan CCPA mengalami penurunan ketahanan pada suhu 100 °C, kemudian pada suhu 250 °C kerangka kitosan-selulosa mulai rusak hingga diperoleh ketahanan pada suhu 500 °C untuk PANI aerogel.	
8.	(Wang et al., 2020)	Biomimetic structural cellulose nanofiber aerogels with exceptional mechanical, flame-retardant	• Penelitian ini menggunakan Aerogels nanofiber selulosa dengan penambahan zirkonium fosfat dua dimensi dalam graphene multilayer menghasilkan pembentukan	• Penelitian yang akan digunakan menggunakan bahan alam berupa kristal dan serat nanoselulosa yang ditambahkan pada busa poliuretan kaku.

		and thermal-insulating properties	nanosheet zirkonium fosfat (ZrP / RGO) yang dibatasi graphene. • Penelitian ini bertujuan membuat Aerogels nanofiber selulosa yang memiliki sifat mekanik, tahan api, dan isolasi termal yang luar biasa Hasil yang diperoleh: • Teknik casing beku searah digunakan untuk merakit blok penyusun serat nanoselulosa dan lembaran nano ZrP/RGO menjadi aerogel struktural biomimetik yang memiliki kemampuan insulasi panas, mekanik, dan api yang sangat baik.	
9.	(X. Zhang et al., 2020)	Bidirectional anisotropic polyimide/bacterial cellulose aerogels by freeze-drying for super-thermal insulation	• Penelitian ini menggunakan aerogel anisotropik polimida/bakteri selulosa (b-PI/BC) Hasil yang diperoleh: • Sifat mekanik kuat, porositas tinggi, dan kepadatan yang lebih	• Penelitian yang akan dilakukan menggunakan bahan poliuretan dan nano selulosa yang berasal dari limbah tandan kosong sebagai insulasi termal pendukung konservasi energi utamanya pada dinding bangunan.

			rendah, sehingga mengurangi konduksi panas. • Aerogel b-PI/BC menunjukkan insulasi termal anisotropik yang berbeda dengan konduktivitas termal ultra-rendah sebesar $23 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ dalam arah radial (tegak lurus terhadap lamela) dan hampir dua kali ($44 \text{ mW m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) pada arah aksial (sejajar dengan lamella). • Aerogel b-PI/BC dengan porositas tinggi (97,7%) dan densitas rendah (46 mg cm^{-3})	
10.	(J. Zhou & Hsieh, 2020)	Nanocellulose aerogel-based porous coaxial fibers for thermal insulation	• Penelitian ini menggunakan serat koaksial berpori berbasis nanoselulosa aerogel untuk insulasi termal Hasil yang diperoleh: • Serat koaksial yang kaku dan berpori dengan inti aerogel selulosa nanofibril (CNF) dan selubung kaya selulosa dibuat dengan serat berongga pemintalan basah untuk insulator berkinerja tinggi	• Penelitian yang akan dilakukan tidak hanya menggunakan nanoselulosa namun menggunakan poliuretan dan nano selulosa sebagai insulasi termal pada dinding bangunan untuk mendukung konservasi energi.

			• Selubungnya mengandung pori-pori multiskala, termasuk mikrovoid (14,5 μm) dan pori-pori sub-mikron (133 nm) dalam jumlah besar, serta ca. nanopori permukaan 25–26 nm, berfungsi sebagai templat dan selubung pelindung untuk inti aerogel CNF mikro. • Serat koaksial berpori memiliki banyak kualitas yang diinginkan, termasuk kepadatan rendah (0,2 g cm^3), porositas tinggi (85%), kuat tarik spesifik tinggi (23,5 MPa g cm^3), • Suhu kerja yang luas (20 - 150 $^{\circ}\text{C}$)	
--	--	--	--	--

Berdasarkan tabel diatas dapat dijelaskan bahwa penelitian yang akan dilakukan adalah pengembangan komposit RPUF dengan penguat nanoselulosa sebagai insulasi termal untuk mendukung konservasi energi. Formulasi pembuatan RPUF menggunakan formulasi sendiri yang dioptimasi menggunakan metode Taguchi. RPUF berfungsi sebagai matrik, sedangkan nanoselulosa sebagai penguat atau filler. Penelitian ini akan menggunakan variabel bebas berupa komposisi formulasi RPUF dan konsentrasi penguat nanoselulosa. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini adalah mengetahui karakteristik dari komposit busa poliuretan kaku dengan penguat nanoselulosa sebagai insulasi termal dapat menghemat energi. Hasil penelitian ini dapat dipublikasikan di jurnal internasional berindeks scopus. Serta, hasil karakterisasi dari penelitian dapat digunakan sebagai data acuan untuk penelitian selanjutnya.