

Geologi Daerah Tahunan Dan Sekitarnya Kabupaten Rembang Provinsi Jawa Tengah

Fitra Syazili^{1,*}Harnani²

¹Teknik Geologi, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: harnani@ft.unsri.ac.id

ABSTRAK: Pemetaan geologi dilakukan di Daerah Tahunan dan sekitarnya, Kabupaten Rembang, Provinsi Jawa tengah, dengan luas area sekitar 81 km² pada skala 1:25.000. Penelitian ini bertujuan untuk merekonstruksi kondisi geologi lokal yang meliputi aspek geomorfologi, stratigrafi, dan struktur geologi melalui observasi lapangan, analisis laboratorium (petrografi dan paleontologi), serta analisis studio. Berdasarkan hasil analisis geomorfologi, daerah penelitian dapat dibagi menjadi dua satuan morfologi Perbukitan Karst (K2), Perbukitan Lipatan. Daerah penelitian tersusun dari tua ke muda yaitu Formasi Tawun Anggota Ngrayong, Formasi Bulu, Formasi Wonocolo, Formasi Ledok, Formasi Paciran dan Formasi Mundu. Secara stratigrafi daerah ini didominasi oleh litologi batupasir dan batugamping yang berumur Miosen awal hingga Pliosen tengah. Antiklin Pekel berorientasi Timur Laut–Barat Daya (NE–SW).

Kata Kunci: Geomorfologi, Pemetaan Geologi, Stratigrafi, Struktur, Tahunan

ABSTRACT: Geological mapping was conducted in the Tahunan area and its surroundings, Rembang Regency, Central Java Province, covering an area of approximately 81 km² at a scale of 1:25,000. This study aims to reconstruct the local geological conditions, including geomorphology, stratigraphy, and geological structures, through field observations, laboratory analyses (petrography and paleontology), and studio interpretation. Based on geomorphological analysis, the study area can be divided into two main morphological units: Karst Hills (K2) and Folded Hills. Stratigraphically, the area consists of six formations, from oldest to youngest: the Tawun Formation Ngrayong Member, Bulu Formation, Wonocolo Formation, Ledok Formation, Paciran Formation, and Mundu Formation. The lithology is dominated by sandstone and limestone, spanning in age from the Early Miocene to the Middle Pliocene. The main geological structure identified in the study area is the Pekel Anticline, which trends northeast–southwest (NE–SW).

Keywords: Geomorphology, Geological Mapping, Stratigraphy, Structure, Tahunan

1 Pendahuluan

Cekungan Jawa Timur Utara adalah salah satu cekungan yang memiliki potensi hidrokarbon terbesar di Indonesia (Alkatiri dan Harmansyah, 2016). Pemetaan geologi merupakan kegiatan fundamental dalam ilmu kebumian yang bertujuan untuk memahami kondisi dan sejarah geologi suatu wilayah (Boggs, 2009). Kegiatan ini tidak hanya penting untuk eksplorasi sumber daya alam, tetapi juga sebagai penerapan ilmu dan keterampilan yang diperoleh selama perkuliahan.

Daerah Tahunan, Kabupaten Rembang, Provinsi Jawa Tengah, dipilih sebagai lokasi penelitian. Wilayah ini memiliki sejarah geologi yang kompleks, terletak pada Cekungan Jawa Timur yang merupakan bagian dari zona Rembang. Secara struktural, daerah ini dipengaruhi oleh keberadaan Antiklin Pakel, yang merupakan salah satu

lipatan penting di zona Rembang dan berperan dalam pengontrolan pola sebaran satuan batuan serta struktur geologi di sekitarnya (Satyana & Purwaningsih, 2003; Kadar, 2010).

Stratigrafi merupakan studi batuan yang bertujuan untuk penentuan kronologi dan waktu terjadinya sejarah bumi, sedangkan sedimentologi adalah ilmu mengenai proses dari pembentukan batuan sedimen yang dihasilkan dari pengangkutan dan pengendapan material sedimen pada lingkungan darat hingga laut (Djauhari, 2010).

Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Jatirogo, Jawa yang disusun oleh Situmorang, R. L., Smit, R., dan Van Vessem, E. J. (1992), daerah penelitian didominasi oleh satuan batuan berumur Miosen Akhir hingga Pliosen, yang terdiri atas Formasi Tuban (Tmt), Formasi Bulu (Tmb), Formasi Wonocolo (Tmw), Formasi Ledok (Tml), Formasi Paciran (Tmp), dan Formasi Mundu (Tmm).

Satuan-satuan ini tersusun atas batugamping, batulempung, batupasir, yang terbentuk pada lingkungan laut dangkal hingga menengah. Kompleksitas litologi dan struktur yang berkembang menunjukkan dinamika sedimentasi dan tektonik yang menarik untuk dikaji lebih lanjut dalam rangka merekonstruksi evolusi geologis regional Zona Rembang.

Penelitian ini difokuskan untuk memetakan kegiatan pemetaan geologi permukaan pada luasan daerah $9 \times 9 \text{ km}^2$ berskala 1 : 25.000 dan menganalisis aspek-aspek geologi permukaan, meliputi geomorfologi, stratigrafi, dan struktur geologi. Dengan demikian, penelitian ini dimaksudkan untuk melakukan pemetaan geologi ulang pada skala yang lebih detail untuk memverifikasi data lapangan dan mengintegrasikan dengan kemajuan teknologi geospasial, seperti data DEM agar mendapatkan data geomorfologi dan struktur yang tepat, serta belum adanya delinasi akurasi mengenai batas-batas lithostratigrafi satuan batuan yang berumur Miosen Awal hingga Pliosen Tengah di daerah Tahunan, kemudian mengenai interpretasi Antiklin Pakel dengan memberikan peta dan model struktur yang lebih presisi dan memberikan pemahaman bagaimana sejarah geologi Tahunan terbentuk.

2 Metode Penelitian

Metode penelitian menggunakan observasi langsung, analisa morfologi, analisis stratigrafi yang diperoleh dari kegiatan pemetaaan geologi lapangan yang meliputi observasi makroskopis dan analisis mikroskopis serta analisis data stratigrafi lokal daerah penelitian. Tahapan penelitian dibagi menjadi 3 yaitu observasi lapangan, analisis laboratorium, dan kerja studio.

Tahap awal melibatkan pengumpulan dan penelaahan data sekunder, terutama Peta Geologi Lembar Pangandaran skala 1:100.000, laporan-laporan geologi regional, dan literatur ilmiah terkait Geologi Pegunungan Selatan Jawa. Hasil studi ini digunakan untuk menyusun kerangka berpikir geologi dan hipotesis awal mengenai stratigrafi, tektonik, dan kondisi geomorfologi daerah penelitian. Persiapan lapangan mencakup penentuan rencana lintasan, titik kontrol (*check point*), dan penyediaan peralatan pemetaan standar.

Analisis laboratorium berupa analisis mikroskopis yaitu pengamatan sayatan tipis untuk mendapatkan data deskripsi sayatan batuan menggunakan klasifikasi (Dunham, 1962), (Pettijohn, 1975). Kemudian analisis paleontologi yaitu berfokus pada mikrofosil dan analisis petrografi yaitu berupa sayatan tipis batuan yang terususun

atas foraminifera bentonik besar. Lokasi pengamatan pada daerah penelitian memiliki jumlah 80, sampel paleontologi berjumlah 6, dan sampel petrologi berjumlah 7

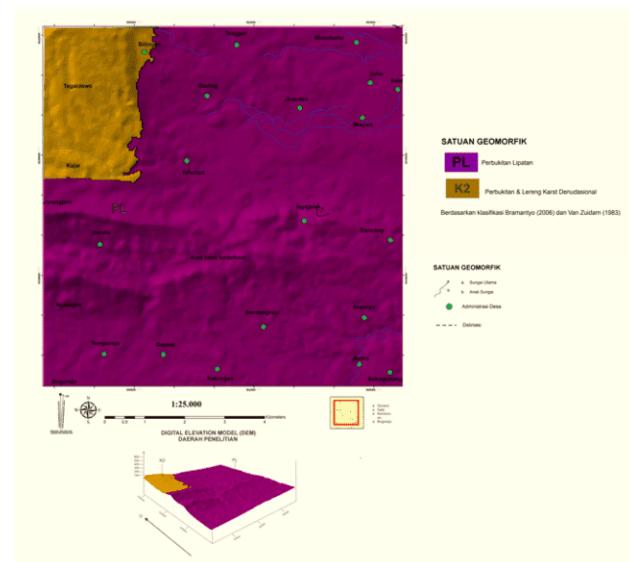
Pembuatan Peta Akhir: Data geologi diintegrasikan menggunakan perangkat lunak ArcGIS untuk menghasilkan Peta Geologi, Peta Geomorfologi, dan Penampang Geologi daerah penelitian skala 1:25.000

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis dan interpretasi data yang telah dilakukan melalui kegiatan observasi lapangan yang didapatkan dari peta lintasan berupa 80 titik, didapatkan informasi terperinci tentang sejarah geologi daerah penelitian akan dihasilkan melalui diskusi tentang elemen.

3.1 Satuan Geomorfologi

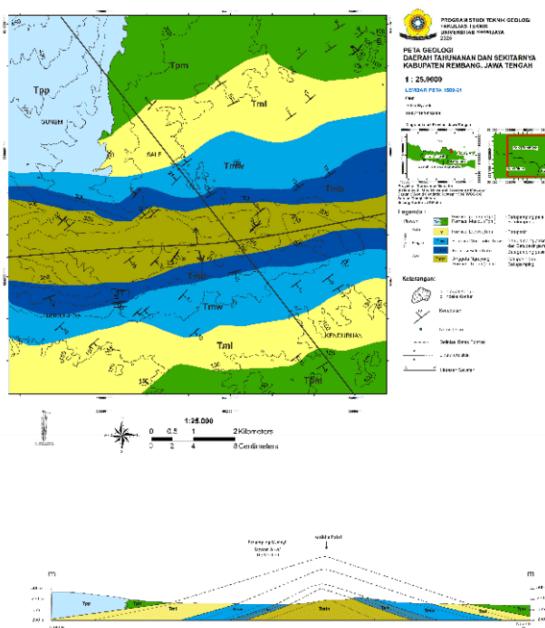
Morfografi pada daerah penelitian terdapat dua klasifikasi bentuk lahan yaitu, Perbukitan Karst (K2) dan Perbukitan Lipatan (PL). Analisis tersebut berdasarkan klasifikasi bentuk lahan dengan menggunakan diagram blok dari data DEMNas yang menunjukkan bahwa morfologi yang terbentuk pada daerah penelitian memiliki elevasi terendah pada 80. Dan elevasi tertinggi pada 362,5. Sehingga apabila dikategorikan dengan klasifikasi (Widyatmanti et al., 2016) maka mendapatkan hasil perbukitan rendah (50-200m) dan perbukitan (200-500m). (Gambar 1)



Gambar 1 Peta Geomorfologi

3.2 Stratigrafi

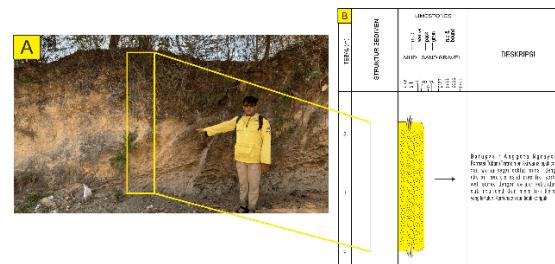
Stratigrafi umumnya digunakan untuk mengenali urutan – urutan lapisan batuan, fases batuan, makrofossil dan mikrofossil dan hubungan pengendapan antar satuan batuan pada daerah penelitian. Aspek yang diamati dengan stratigrafi antara lain meliputi jenis batuan, ciri fisik batuan dan komponen batuan yaitu kandungan mineral maupun kandungan fosil di dalamnya. Pengelompokan hasil pengamatan tersebut berdasarkan data lapangan, dan diperkuat dengan hasil analisis laboratorium petrografi dan paleontologi. Pembagian satuan stratigrafi berdasarkan persebaran batuan hasil observasi lapangan, dengan data lapangan sebanyak 80 lokasi pengamatan. yang kemudian dikorelasikan dengan kondisi regional. analisis data dilakukan dengan cara mengobservasi litologi secara megaskopis dan makroskopis serta melakukan pengukuran penampang. Daerah penelitian terdapat 6 formasi, bila diurutkan dari formasi yang berumur tua ke formasi yang paling muda yaitu Formasi Anggota Ngrayong Tuban (Tmtn), Formasi Bulu (Tmb), Formasi Wonocolo (Tmw), Formasi Ledok (Tml), Formasi Mundu (Tpm), Formasi Paciran (Tpp).



Gambar 2. Peta Geologi dan Penampang Geologi Bawah Permukaan Daerah Peneliti

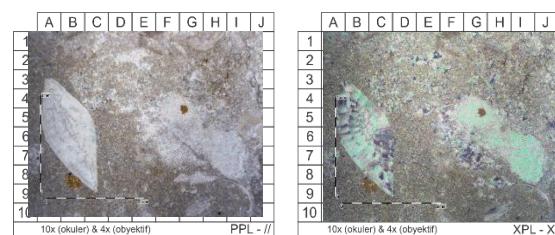
3.2.1 Formasi Tuban Anggota Ngrayong

Hasil analisis menunjukkan bahwa daerah penelitian tersusun atas 6 Formasi (Gambar 4) yaitu Formasi Tuban Anggota Ngrayong (Tmtn) merupakan Formasi tertua yang ditemui pada daerah penelitian. Persebaran formasi ini menempati bagian memajang di tengah petakan dari timur hingga ke barat dengan persentase sebesar 18,75%. Berdasarkan pengamatan lapangan dan laboratorium Batupasir pada formasi ini ditandai dengan dortasi yang sedang hingga buruk dan butiran yang belum sepenuhnya membundar, berdasarkan cirinya dapat diinterpretasikan bahwa material klastik tersebut sepertinya tidak mengalami transportasi yang panjang dan diendapkan pada lingkungan laut dangkal (Gambar 4)



Gambar 3 Singkapan Batupasir (A); Profil Singkapan (B)

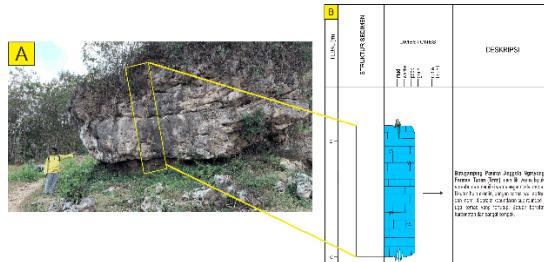
Sayatan yang diamati dapat dilihat bahwa batupasir ini didominasi oleh fragmen berupa fragmen fosil sebanyak 15% yang terlihat pada B6 yang tersebar secara merata, terdapat juga fosil pada J4. Tersusun oleh matriks berupa micrit pada G4 dan semen sparry calcite pada E8. Hasil analisis petrografi menunjukkan bahwa batupasir Anggota Tuban Ngrayong berdasarkan klasifikasi Mount (1985) dan didapat nama *Sandy micrite* (Gambar 5)



Gambar 4. Kenampakan Petrografi Batupasir Formasi Tuban Anggota Ngrayong

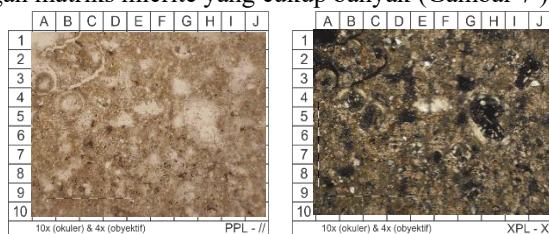
Selanjutnya ditemukan batugamping yang berada pada tepi jalan di sekitar perbukitan. Secara makroskopis memiliki warna lapuk abu-abu dan memiliki warna segar coklat muda. Ukuran buitr *arenite*, dengan sortasi *well sorted* dan memiliki derajat kebundaran sub

rounded juga kemas yang tertutup. Batuan bersifat karbonatan dan sangat kompak menginterpretasikan bahwa batu gamping ini terbentuk pada lingkungan laut dangkal (gambar 6).

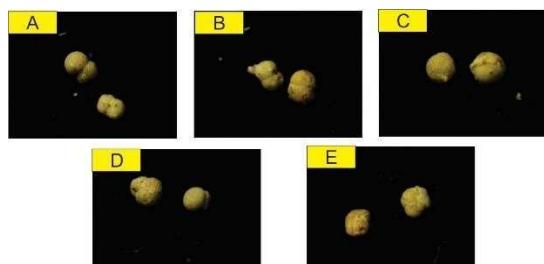


Gambar 5 Singkapan Batupasir (A); Profil Singkapan (B)

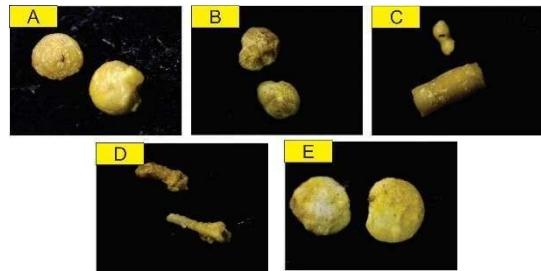
Dari sayatan yang diamati dapat dilihat bahwa batupasir ini namakan *Wackedstone* berdasarkan klasifikasi Dunham, (1962), komposisinya didominasi oleh cangkang foraminifera dan sedikit skeletal grain lainnya dengan matriks micrite yang cukup banyak (Gambar 7)



Gambar 6 Kenampakan Petrografi Batupasir Formasi Tuban Anggota Ngrayong



Gambar 7 Kenampakan Fosil Planktonik pada Batupasir Formasi Tuban Anggota Ngrayong dengan Perbesaran 4x (A) Globorotalia obessa, (B) Globigerinoides trilobus, (C) Orbulina universa, (D) Globigerinoides immaturus dan (E) Globigerinoides subquadratus.



Gambar 8 Kenampakan Fosil Bentonik pada Batupasir Formasi Tuban Anggota Ngrayong dengan Perbesaran 4x (A) Cibicides praecinctus, (B) Anmalinella rosrata, (C) Tubinella finalis, (D) Tubinella inornata (E)

Elphidium machilum..

Tabel 1 Umur Relatif Formasi Tuban Anggota Ngrayong (Tmtn) berdasarkan Blow (1960)

UMUR	EOCENE										OLIGOCENE										MIOCENE										PLIOCENE									
	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober	Unter	Mittler	Ober							
Foraminifera Planitoxic																																								
1. <i>Globorotalia obesa</i> (L.)	U	M	O	U	M	O	U	M	O	U	M	O	U	M	O	U	M	O	U	M	O	U	M	O	U	M	O	U	M	O	U	M	O							
2. <i>Globigerinoides trilobus</i> (L.)																																								
3. <i>Orbulina universa</i> (L.)																																								
4. <i>Globigerinoides immaturus</i> (L.)																																								
5. <i>Globigerinoides subquadratus</i> (L.)																																								

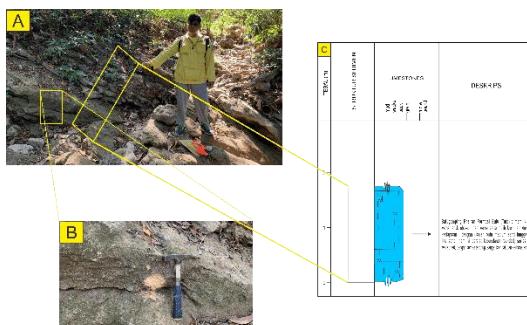
Tabel 2 Lingkungan Pengendapan Formasi Tuban Anggota Ngrayong (Tmtn) berdasarkan Barker (1960)

Lingkungan Batimetrik	Transisi	Neritik					Batal					Abisal				
		Tepi	Tengah	Luar	Atas	Bawah	Tepi	Tengah	Luar	Atas	Bawah	Tepi	Tengah	Luar	Atas	Bawah
Foraminifera Bentonik	0	20	100	200	500	2000										
1. <i>Cibicides praecinctus</i> (A.)		•														
2. <i>Anmalinella rosata</i> (37 ft) (C.)			•													
3. <i>Tubinella finalis</i> (20 - 60 ft) (R.)		•		•												
4. <i>Tubinella inornata</i> (20 - 60 ft) (R.)		•														
5. <i>Elphidium machilum</i> (15 - 20 ft) (C.)		•														

3.2.2 Formasi Bulu (Tmb)

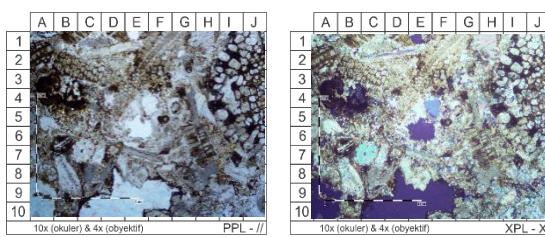
Formasi Bulu (Tmb) disimbolkan dengan warna biru tua pada peta geologi dan terendapkan secara selaras di atas Formasi Tuban Anggota Ngrayong (Tmtn). Persebaran Formasi Bulu (Tmb) menempati seluas 13,75% dari keseluruhan lokasi pemetaan yang tersusun atas litologi batugamping pasiran yang dijumpai selama observasi lapangan dilakukan.

Pada Formasi Bulu (Tmb) merupakan salah satu formasi yang terendapkan di lingkungan neritik tepi.. Memiliki ukuran butir arenite, dengan kebundaran rounded serta sortasi well sorted. Batugamping pasiran merupakan batuanya yang sangat kompak, kemas tertutup dan bersifat karbonatan kuat. (Gambar).

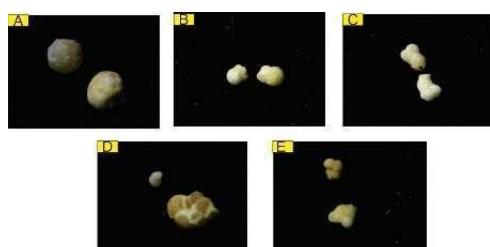


Gambar 9. Singkapan Batugamping pasiran (A); Profil Singkapan (C)

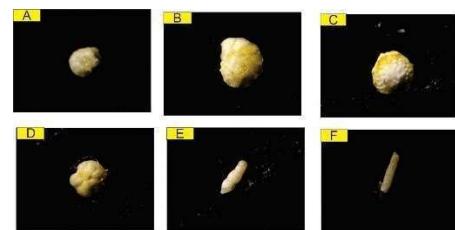
Dari sayatan yang diamati dapat dilihat bahwa batupasir ini didominasi oleh fragmen berupa fosil sebanyak 39% yang terlihat pada C7 yang tersebar secara merata, terdapat juga mineral kuarsa pada E10 dan mineral kalsit pada H4. Tersusun oleh matriks berupa *micrite*. Berdasarkan komposisi penyusun batuan, penentuan nama batuan berdasarkan klasifikasi Dunham (1962) dan didapat nama Grainstone.



Gambar 10 Kenampakan Petrografi Batupasir Formasi Tuban Anggota Ngrayong



Gambar 11 Kenampakan Fosil Planktonik pada Batugamping Formasi Bulu dengan Perbesaran 4x (A) *Orbulina Universa*, (B) *Globigerina praebulloides*, (C)*Globigerina leroy*, (D) *Globorotalia acostaensis*, (E) *Globigerina falcenensis*.



Gambar 12. Kenampakan Fosil Bentonik pada Batugamping Formasi Bulu dengan Perbesaran 4x (A) *Aphistegina quoyii*, (B) *Pyrgo aepressa*, (C) *Marginopora vertebralis*, (D) *Calcarina venusta*, (E) *Dentalina subsoluta*, (F) *Tubinella inornata*.

Tabel 3. Umur Relatif Formasi Bulu (Tmb) berdasarkan Blow (1960)

UMUR	EOCENE				OLIGOCENE				MIOCENE				PLIOCENE				PLEISTOCENE			
	middle		late		early-middle		late		early		middle		late		e middle		late		Holocene	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
Foraminifera Planktonik																				
1	<i>Orbulina universa</i>	(A.)																		
2	<i>Globigerina praebulloides</i>	(C.)																		
3	<i>Globigerina acostaensis</i>	(A.)																		
4	<i>Globorotalia lobata</i>	(R.)																		
5	<i>Globigerina falcenensis</i>	(R.)																		

Tabel 4. Lingkungan Pengendapan Formasi Bulu (Tmb) berdasarkan Barker (1960)

Lingkungan Batimetri	Transisi		Neritik			Batial			Abisal	
			Tepi	Tengah	Luar	Atas	Bawah			
			20	100	200	500	2000	4000		
Foraminifera Bentonik	0									
1 <i>Aphistegina quoyii</i> (16 - 25 ft) (C.)										
2 <i>Pyrgo aepressa</i> (45-60 ft) (A.)										
3 <i>Marginopora vertebralis</i> (R.)										
4 <i>Calcarina venusta</i> (7 ft) (C.)										
5 <i>Dentalina subsoluta</i> (450 ft) (R.)										
6 <i>Tubinella inornata</i> (20-60 ft) (R.)										

3.2.3 Formasi Wonocolo

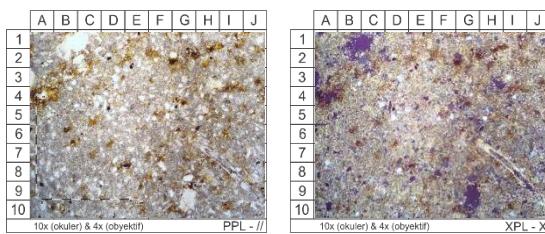
Formasi Wonocolo (Tmw) disimbolkan dengan warna biru muda pada peta geologi dan terendapkan secara selaras di atas Formasi Bulu (Tmb). Persebaran Formasi Wonocolo menempati seluas 20% dari keseluruhan lokasi pemetaan yang tersusun atas litologi batugamping pasiran dan batupasir gampingan yang dijumpai selama observasi lapangan dilakukan.

Pada Formasi wonocolo (gambar 4.10) merupakan Formasi yang terendapkan di lingkungan neritik tepi hingga neritik luar. Hal ini dinterpretasikan bahwa pengendapan terjadi pada lingkungan penegndapan yang tinggi diliat dari material penyusunnya telah mengalami traportasi cukup jauh..



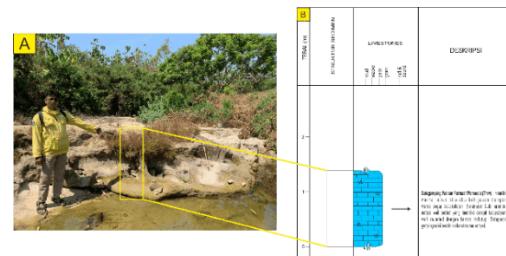
Gambar 13 Singkapan Batupasir (A); Profil Singkapan (B)

Dari sayatan yang diamati dapat dilihat bahwa batupasir ini didominasi oleh fragmen berupa fosil sebanyak 6,5% yang terlihat pada I7 yang tersebar secara merata, terdapat juga mineral kuarsa pada F1, mineral kalsit pada C9, opaque, biotit, dan feldspar. . Tersusun oleh matriks berupa *micrite*. Berdasarkan komposisi penyusun batuan, penentuan nama batuan berdasarkan klasifikasi Pettijohn, (1975) dan didapat nama *Calcareous lithic wacke*.



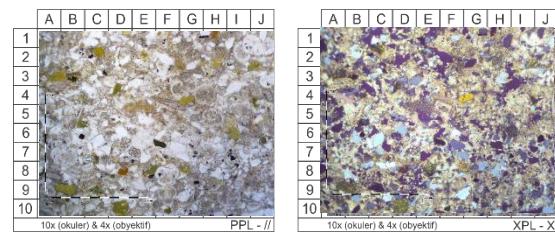
Gambar14 Kenampakan Petrografi Batupasir Formasi Wonocolo

Litologi batugamping pasiran ditemukan pada tepi sungai, secara makroskopis batuan ini memiliki kenampakan warna lapuk abu-abu kehijauan dengan warna segar kecokelatan. Berukuran butir *arenite*, sortasi *well sorted* yang memiliki derajat kebundaran *well rounded* dengan kemas tertutup. Batugamping pasiran ini bersifat karbonatan dan kompak. Berdasarkan data tersebut bahwa dapat di interpretasikan material penyusun batuan telah mengalami transportasi cukup jauh dan lingkungan pengendapan batuan ini terjadi pada lingkungan laut dangkal, berdasarkan ukuran butiran batuan tersebut berada pada lingkungan pengendapan zona transisi. Sedangkan batuan ini memiliki diagenesis yang kuat sehingga dapat menjelaskan mengapa batuan itu bersifat resisten sehingga bertahan meskipun ditemukan di dekat sungai.

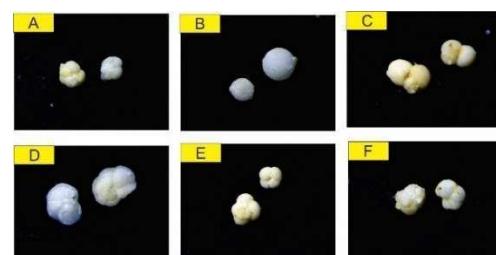


Gambar 15 Singkapan BatuGamping pasir (A); Profil Singkapan (B)

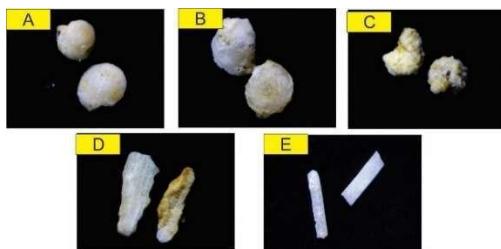
Dari sayatan yang diamati dapat dilihat bahwa batugamping pasiran ini didominasi oleh fragmen berupa fosil sebanyak 35% yang terlihat pada J2 dan F8 yang tersebar secara merata, terdapat juga mineral kuarsa pada G9, mineral opak pada F6, Galukonit pada B9. Tersusun oleh matriks berupa *micrite*. Berdasarkan komposisi penyusun batuan, penentuan nama batuan berdasarkan klasifikasi Kendal, 2005 (after Folk, 1959) dan didapat nama *Sorted Intrsparite*.



Gambar16 Kenampakan Petrografi Batu Gamping pasirqn Formasi Wonocolo

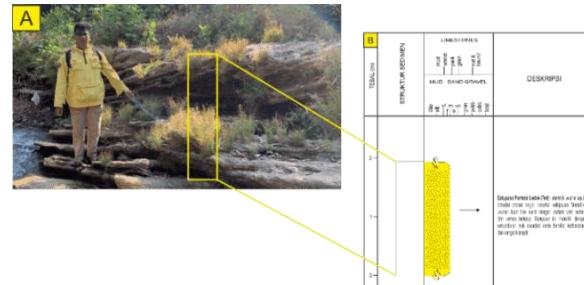


Gambar 17 Kenampakan Fosil Planktonik pada Batugamping pasiran Formasi Wonocolo dengan Perbesaran 4x (A) Globorotalia mayeri, (B) Orbulina universa, (C) Globigerinoides immaturus (D) Globototalia menardii, (E) Globigerina praebuloides, (F) Globorotalia obessa



Gambar 18 Kenampakan Fosil Bentonik pada Batugamping pasiran Formasi Wonocolo dengan Perbesaran 4x (A) *Amphistegina quoyii*, (B) *Pyrgo aepressa*, (C) *Astrononian fijiense*, (D) *Tubinella finalis*, (E) *Tubinella inornata*,

Dapat diinterpretasikan bahwa kondisi laut dari Formasi Wonocolo yang tenang dan dalam menjadi lauit dangkal yang dicirikan berdasarkan material seperti batupasir menandakan bahwa peningkatan suplai sedimen klastik di bandingkan Formasi Wonocolo, hal ini di dukung dengan peningkatan Foraminifera Bentos laut dangkal.



Tabel 5 Umur Relatif Formasi Wonocolo (Tmw) berdasarkan Blow (1960)

UMUR	EOCENE			OLIGOCENE			MIOCENE			PLIOCENE			PLEISTOCENE		
	middle	late	early-middle	late	early	middle	late	middle	late	late	middle	late	late	Holocene	
Foraminifera Planktonik	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	E1-d	
1 <i>Globorotalia mayeri</i> (C)	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	9.1-d	
2 <i>Orbulina universa</i> (A)															
3 <i>Globigerinoides immaturus</i> (C)															
4 <i>Globotubula menardii</i> (C)															
5 <i>Globigerina praebuloides</i> (R)															
6 <i>Globorotalia obesa</i> (R)															

Tabel 6 Lingkungan Pengendapan Formasi Wonocolo (Tmw) berdasarkan Barker (1960)

Lingkungan Batimetri	Transisi		Neritik		Betial		Abisal	
	Tepi	Tengah	Luar	Atas	Bawah			
Foraminifera Bentonik	0	20	100	200	500	2000	4000	
1 <i>Amphistegina quoyii</i> (16 - 25 ft) (A)	↔							
2 <i>Pyrgo aepressa</i> (45 - 60 ft) (C)	↔	↔						
3 <i>Astrononian fijiense</i> (210 ft) (R)			•					
4 <i>Tubinella finalis</i> (20 - 60 ft) (C)	↔							
5 <i>Tubinella inornata</i> (20 - 60 ft) (A)	↔	↔						

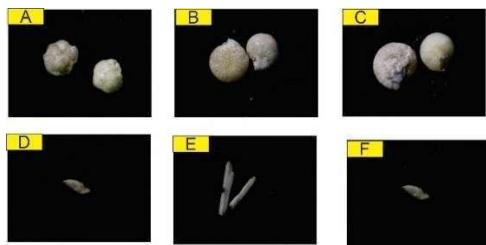
3.2.4 Formasi Ledok

Formasi Ledok (Tml) disimbolkan dengan warna kuning pada peta geologi dan terendapkan secara selaras di atas Formasi Wonocolo (Tmw). Persebaran Formasi Ledok (Tml) menempati seluas 15% dari keseluruhan lokasi pemetaan yang tersusun atas litologi batupasir yang dijumpai selama observasi lapangan dilakukan. Formasi Ledok (Tml) merupakan salah satu formasi dengan litologi karbonatan yang terendapkan di lingkungan transisi hingga neritik tepi.

Secara keseluruhan lokasi pemetaan yang tersusun atas litologi batupasir yang di temui sepanjang observasi lapangan dilakukan. Secara megaskopis, Memiliki ukuran butir medium sand dengan sortasi sorted dan kemas tertutup. Batupasir ini memiliki derajat kebundaran sub rounded serta bersifat kerbonatan dan sangat kompak.



Gambar 20 Kenampakan Fosil Planktonik pada Batupasir Formasi Ledok dengan Perbesaran 4x (A) *Globigerinoides trilobus*, (B) *Globorotalia pleistumida*, (C) *Orbulina universa*, (D) *Globigerinoides ruber*, (E) *Globigerinoides immaturus*, (F) *Globigerina praebuloides*, (G) *Globorotalia multicamerata*



Gambar 21 Kenampakan Fosil Bentonik pada Batupasir Formasi Ledok dengan Perbesaran 4x (A) *Calcarina venusta*, (B) *Elphidium craticulatum*, (C) *Elphidium machilum*, (D) *Eponides burthelotianus*, (E) *Schubertia tessellata*, (F) *Textularia* sp.

Tabel 7 Umur Relatif Formasi Ledok (TmL) berdasarkan klasifikasi Blow (1960)

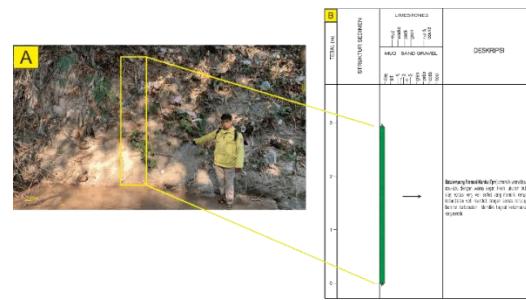
UMUR	EOCENE				OLIGOCENE				MIOCENE				PLIOCENE				PLEISTOCENE			
	middle	late	early	middle	late	early	middle	late	middle	late	early	middle	late	middle	late	late	late	Holocene		
Foraminifera Planktonik	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
1 <i>Globigerinoides trilobatus</i> (R.)																				
2 <i>Globorotalia plectostoma</i> (C.)																				
3 <i>Orbulina universa</i> (A.)																				
4 <i>Globigerinoides ruber</i> (A.)																				
5 <i>Globigerinoides immaturus</i> (A.)																				
6 <i>Globigerina praebulloides</i> (R.)																				
7 <i>Globorotalia multicamerata</i> (A.)																				

Tabel 8 Lingkungan Pengendapan Formasi Ledok (Tmb) berdasarkan Barker (1960)

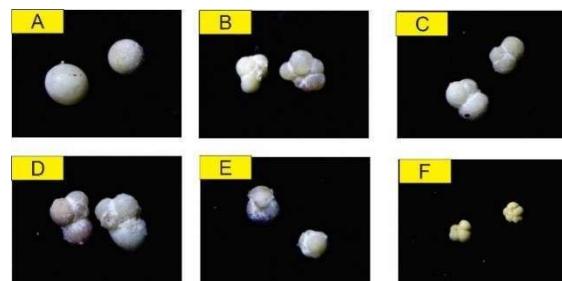
Lingkungan Batimetri	Transisi		Neritik		Batikal		Abisal	
	Tepi	Tengah	Luar	Atas	Bawah			
Foraminifera Bentonik								
1 <i>Calcarina venusta</i> (7 ft) (C.)	0	20	100	200	500	2000	4000	
2 <i>Elphidium craticulatum</i> (16 - 25 ft) (C.)								
3 <i>Elphidium machilum</i> (15 - 20 ft) (C.)								
4 <i>Eponides burthelotianus</i> (25 - 29 ft) (A.)								
5 <i>Schubertia tessellata</i> (17 ft) (C.)			*					
6 <i>Textularia</i> sp. (28 ft) (R.)			*					

3.2.5 Formasi Mundu

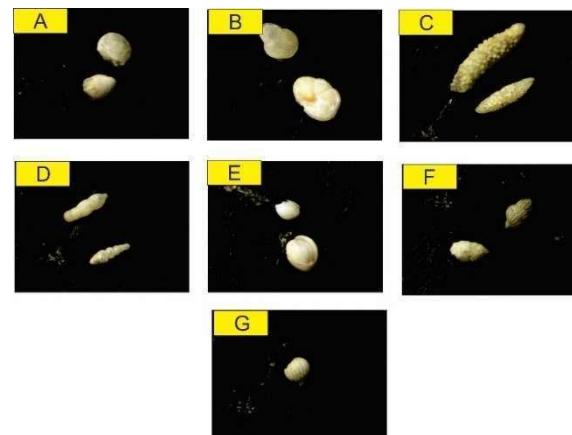
Formasi Mundu merupakan formasi keempat yang mengisi daerah penelitian. Formasi Mundu memiliki ciri litologi yang khas, tersusun oleh lempung masif berwarna abu-abu muda hingga putih kekuning-kuningan, dengan kandungan foraminifera planktonik yang sangat melimpah. Formasi Mundu disimbolkan dengan warna hijau pada peta geologi (Lampiran H). Formasi Mundu menempati sekitar 16.25% dari keseluruhan lokasi penelitian. Formasi ini terdapkan secara selaras di atas Formasi Ledok dan memiliki umur Pliosen (Pringgoprawiro, 1983). Secara megaskopis, Formasi Mundu mempunyai warna lapuk krem dengan warna segar abu-abu ukuran butir clay. Memiliki tingkat kekompakan yang rendah. Berdasarkan data tersebut, dapat diinterpretasikan bahwa Formasi Mundu terjadi pada lingkungan pengendapan dengan arus yang rendah berdasarkan dari ukuran butir berupa lempung.



Gambar 22 Singkapan Batu Lempung (A); Profil Singkapan (B)



Gambar 23 Kenampakan Fosil Planktonik pada Batupasir Formasi Mundu dengan Perbesaran 4x (A) *Orbulina universa*, (B) *Globorotalia ascotaensis*, (C) *Globigerinoides rubber*, (D) *Globigerinoides immaturus*, (E) *Globigerina riveroae*, (F) *Globigerina seminulina*.



Gambar 24 Kenampakan Fosil Bentonik pada Batupasir Formasi Ledok dengan Perbesaran 4x (A) *Cibicides robertsonianus*, (B) *Astacolus reniformis*, (C) *Bulimina giba*, (D) *Dentalina subsoluta*, (E) *Quinqueloculina setnulinum* (F) *Rectobolivina dimorpha*, (G) *Lagena* sp.

Tabel 9 Umur Relatif Formasi Mundu (Tpm) berdasarkan klasifikasi Blow (1960)

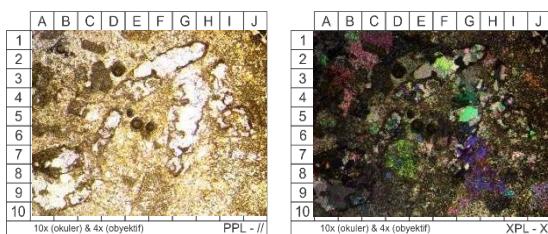
UMUR	EOCENE				OLIGOCENE				MIOCENE				PLIOCENE				PLEISTOCENE			
	middle	late	early	middle	late	early	middle	late	middle	late	early	middle	late	middle	late	early	middle	late	middle	late
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Foraminifera Planktonik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1 <i>Orbulina universa</i> (A)																				
2 <i>Globorotalia arcostensis</i> (C)																				
3 <i>Globigerinoides ruber</i> (A)																				
4 <i>Globigerinoides immaturus</i> (A)																				
5 <i>Globigerina riverae</i> (C)																				
6 <i>Globigerina seminuda</i> (C)																				

Tabel 10 Lingkungan Pengendapan Formasi Muda (Tpm) berdasarkan Barker (1960)

Lingkungan Batimetri	Transisi			Neritik			Batalik		Abisal	
	Transisi	Neritik	Batalik	Atas	Bawah	Abisal				
Foraminifera Bentonik	0	20	100	200	500	2000	4000			
1 <i>Cibicides robertsonius</i> (390 ft) (A)				*						
2 <i>Astacolus reniformis</i> (390 ft) (A)										
3 <i>Bulimina giba</i> (1630 ft) (C)					*	*				
4 <i>Dentalina subsoluta</i> (390 ft) (C)				*						
5 <i>Quinqueloculina setnium</i> (630 ft) (R)					*					
6 <i>Rectobolivina dimorpha</i> (580 ft) (R)					*					
7 <i>Lagena sp.</i> (1850 ft) (R)						*				

3.3 Formasi Paciran

Formasi Paciran merupakan pengendapan sedimen termuda dengan umur Pliosen. Secara regional Formasi Paciran tersusun dari atas litologi yaitu batugamping pejal dan batugamping dolomitan (Situmorang et al., 1992). Namun pada daerah penelitian hanya ditemukan satuan batugamping pejal yang tersebar di bawah lokasi penelitian dengan persentase penyebaran 15%. Keadaan batugamping pejal formasi ini secara megaskopis dapat dilihat pada Gambar 4.31. Batugamping pejal Formasi Paciran ini jika diamati secara makroskopis memiliki warna lapuk abu-abu dan warna segar coklat muda. Batugamping Formasi Paciran ini memiliki ukuran butir kalsilutit. Derajat pemilahan pada batuan *well-sorted*, dengan derajat kebundaran *sub rounded* dan memiliki kemas grain supported fabric. Batuan bersifat karbonatan dan sangat kompak



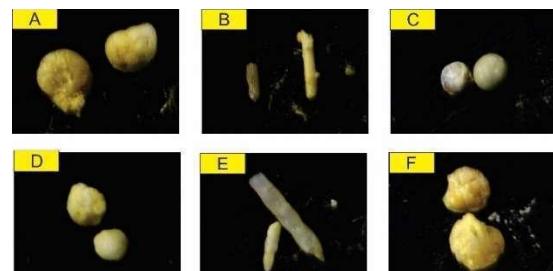
Gambar 14 Kenampakan Petrografi Batupasir Formasi Paciran

Dari sayatan yang diamati dapat dilihat bahwa batupasir ini didominasi oleh fragmen berupa fosil sebanyak 68% yang terlihat pada G2 dan F2 yang tersebar

secara merata, terdapat juga mineral kuarsa pada A1, mineral kuarsa pada F1. Tersusun oleh matriks berupa micrite. Berdasarkan komposisi penyusun batuan, penentuan nama batuan berdasarkan klasifikasi Dunham (1962) dan didapat nama *Grainstone*.



Gambar 26 Kenampakan Fosil Planktonik pada Batupasir Formasi Paciran dengan Perbesaran 4x (A) *Orbulina universa*, (B) *Globigerinoides trilobus*, (C) *Globigerinoides fistulosus*, (D) *Globigerinoides obliquus*, (E) *Globigerinoides immaturus* (F) *Globigerina venezuelana*



Gambar 27 Kenampakan Fosil Bentonik pada Batupasir Formasi Ledok dengan Perbesaran 4x (A) *Cibicides robertsonianus*, (B) *Astacolus reniformis*, (C) *Bulimina giba*, (D) *Dentalina subsoluta*, (E) *Quinqueloculina setnium*, (F) *Rectobolivina dimorpha*, (G) *Lagena sp.*

Tabel 11 Umur Relatif Formasi Paciran (Tpp) berdasarkan klasifikasi Blow (1960)

UMUR	EOCENE				OLIGOCENE				MIOCENE				PLIOCENE				PLEISTOCENE			
	middle	late	early	middle	late	early	middle	late	middle	late	early	middle	late	middle	late	early	middle	late	middle	late
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r		
Foraminifera Planktonik	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1 <i>Orbulina universa</i> (A)																				
2 <i>Globigerinoides trilobus</i> (A)																				
3 <i>Globigerinoides fistulosus</i> (C)																				
4 <i>Globigerinoides obliquus</i> (C)																				
5 <i>Globigerinoides immaturus</i> (R)																				
6 <i>Globigerina venezuelana</i> (R)																				

Tabel 12 Lingkungan Pengendapan Formasi Paciran (Tpp) berdasarkan Barker (1960)

Lingkungan Batimetri	Transisi	Neritik			Batial		Abisal	
		Tepi	Tengah	Luar	Atas	Bawah		
Foraminifera Bentonik	0	20	100	200	500	2000	4000	
1 <i>Anomalina collaris</i> (210 ft) (C)								
2 <i>Tubinella finalis</i> (50 - 150 ft) (C)		*		*				
3 <i>Siphoninella tubabosa</i> (250 ft) (A)								
4 <i>Cibicides marginiferus</i> (95 - 100 ft) (A)			**					
5 <i>Orthisphorus challengerana</i> (129 ft) (R)				*				
6 <i>Siphonoides echinata</i> (155 ft) (A)				*				

3.3 Hubungan Stratigrafi

Formasi batuan merupakan hasil pengelompokan satuan batuan di daerah penelitian berdasarkan karakteristik litologinya, atau yang dikenal sebagai kajian lithostratigrafi. Aspek yang diamati meliputi jenis batuan, sifat fisik, serta komponen penyusun batuan seperti kandungan mineral dan fosil di dalamnya. Pengelompokan tersebut diperoleh melalui data hasil observasi lapangan yang kemudian diperkuat dengan analisis laboratorium, meliputi analisis petrografi untuk mengidentifikasi jenis serta karakteristik batuan, dan analisis paleontologi untuk menentukan umur relatif serta lingkungan pengendapan daerah penelitian.

Skala Waktu Geologi	Satuan Batuan	Formasi	Litologi	Lingkungan Pengendapan
Pliosen	Akhir	Tpm	Paciran	Batugamping
	Awal	Tpp	Mundu	Batulempung
Miosen	Akhir	Tml	Ledok	Batupasir
	Tengah	Tmw	Wonocolo	Batupasir gamping dan Batugamping pasiran
		Tmb	Bulu	Batugamping pasiran
	Awal	Tmtn	Ngrayong	Batugamping pasiran dan Batupasir

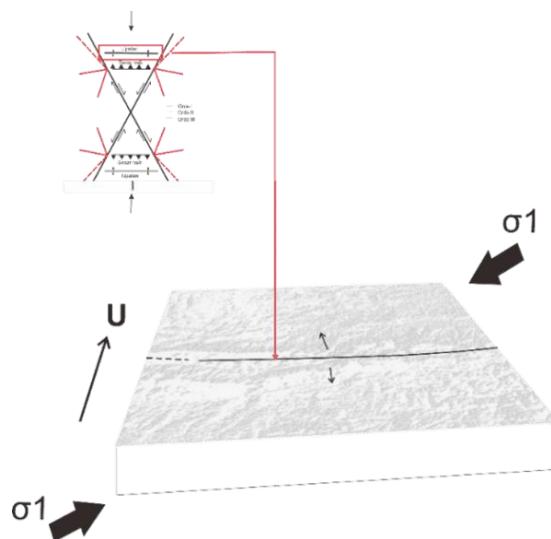
Gambar 28 Kolom Stratigrafi daerah penelitian

3.4 Struktur Geologi

Hasil observasi lapangan yang telah dilaksanakan pada daerah penelitian mendapatkan struktur geologi yang merupakan jenis struktur lipatan dan berkembang pada daerah penelitian. Struktur ini teridentifikasi dari hasil analisis peta geologi, peta *digital elevation model* dan data kedudukan pada tiap lokasi penelitian yang membentuk sayap lipatan pada daerah penelitian. Struktur geologi lipatan mengindikasikan batuan yang menyusun daerah penelitian memiliki sifat *ductile* sehingga batuan dapat mengalami perlipatan. Pada daerah penelitian struktur lipatan bersifat regional yang ditandai dengan perbedaan arah kedudukan singkapan batuan. Analisa struktur menggunakan metode stereografis yang kemudian diperoleh penamaan lipatan menggunakan klasifikasi Fluety (1964)

3.4.1 Antiklin Pakel

Struktur lipatan yang berupa Antiklin Pakel ditemukan pada bagian atas sepanjang daerah penelitian. Antiklin ini diindikasikan berdasarkan hasil rekontruksi data lapangan berupa perbedaan arah kedudukan setiap singkapan pada Formasi Wonocolo (Tmw), Formasi Bulu (Tmb) dan Anggota Ngrayong Formasi Tuban (Tmtn). Data kedudukan kemudian dianalisis menggunakan metode stereografis dan menghasilkan orientasi arah lipatan Utara Baratlaut - Selatan Tenggara. Pada analisis stereografis yang dilakukan diperoleh data kedudukan dari sayap utama lipatan yaitu *Limb NW* = N228°E/12°NW dan *Limb SE* = N060°E/13°SE . Dengan *Hinge Line* = 02°NW , N231°E dan *Hinge Surface* = N050°E/80°SE. Antiklin Pakel ini memiliki tegasan maksimum atau sigma 1 = 05°NE , N324°E dan tegasan minimum pada lipatan atau sigma 3 = 86°SW , N126°E. Antiklin ini diklasifikasikan sebagai *Upright Horizontal Fold* (Fluety, 1964).

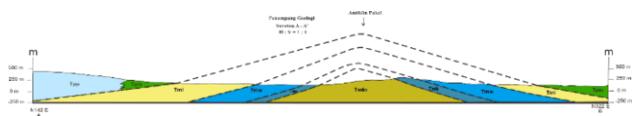


Gambar 29 Konsep Mekanisme Pembentukan Struktur Daerah Penelitian (Moody & Hill, 1956)

3.5 Interpretasi Geologi Bawah Permukaan

Interpretasi bawah permukaan daerah penelitian menunjukkan kondisi geologi berdasarkan data dari permukaan. Rekontruksi bawah permukaan diperolehdari penampang dua dimensi peta geologi daerah penelitian. Berdasarkan rekontruksi tersebut didapatkan analisis kondisi geologi dimana formasi dari tua ke muda adalah Formasi Tuban Anggota Ngrayong (Tmtn), Formasi Bulu (Tmb), Formasi Wonocolo(Tmw), Formasi Ledok (Tml) dan Formasi Mundu (Tpm) serta Formasi Paciran (Tpp). Berdasarkan hasil analisis struktur geologi, pada

daerah penelitian diperoleh struktur lipatan yaitu Antiklin Pakel.



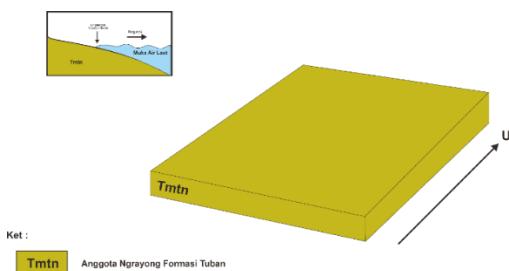
Gambar 30 Penampang Geologi Bawah Permukaan Daerah Penelitian

3.6 Sejarah Geologi

Sejarah geologi daerah telitian ditentukan berdasarkan aspek stratigrafi serta struktur geologi berdasarkan data lapangan dan analisa yang telah dilakukan dengan mempertimbangkan studi sejarah geologi regional oleh peneliti terdahulu mengenai Cekungan Jawa Timur Utara. Pengendapan formasi batuan dimulai dari lapisan batuan tertua hingga termuda yaitu dimulai pada zaman tersier hingga resen. Pada daerah telitian dimulai dari Formasi Tuban Anggota Ngrayong (Tmtn), Formasi Bulu (Tmb), Formasi Wonocolo (Tmw), Formasi Ledok (Tml), Formasi Mundu (Tpm), Formasi Paciran (Tpp).

3.6.1 Miosen Awal

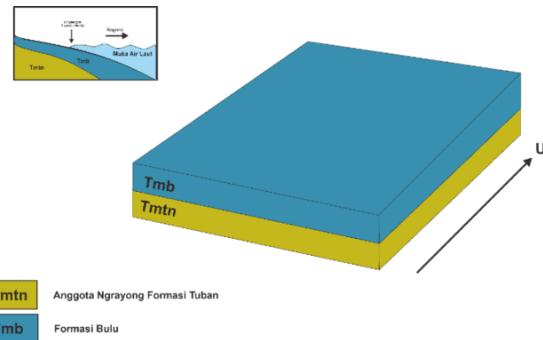
Anggota Ngrayong Formasi Tuban (Tmtn) menjadi awal dari sejarah geologi yang terbentuk di daerah penelitian dengan pembentukan pada lingkungan laut khususnya Neritik luar pada Kala Miosen Awal. Formasi ini diendapkan secara selaras diatas Formasi Prupuh. Formasi ini tersusun oleh batugamping dan batupasir. Pada proses pengendapan sedimen ini membentuk litologi berupa batupasir dan batugamping pasiran pembentuk formasi ini. Lingkungan pengendapan terjadi pada lingkungan Transisi hingga Neritik Tengah (Barker, 1960).



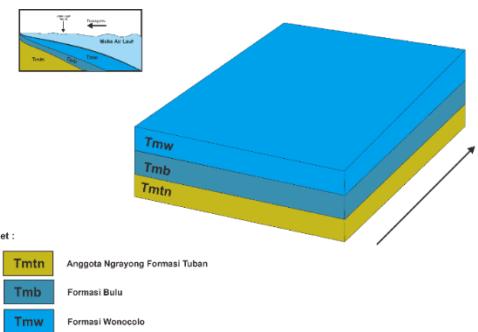
3.6.2 Miosen Tengah

Pada kala ini mengalami fase regresi yang meluas. Fase ini terjadi pengendapan sedimentasi akibat pendangkalan air laut yang menghasilkan batugamping yang mengandung terumbu membentuk

Formasi Bulu (Tmb) yang terdapkan selaras diatas Formasi Tuban Anggota Ngrayong.

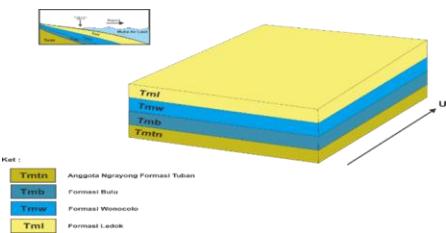


Kemudian setelah Formasi Bulu (Tmb) terbentuk selaras diatasnya terjadinya pengendapan sedimen pada fase transgresi yang lebih dalam sehingga membentuk Formasi Wonocolo (Tmw). Berdasarkan Barker (1960) lingkungan pengendapan formasi ini berada pada Neritik Tepi hingga Neritik Luar. Formasi Wonocolo (Tmw) tersusun atas batupasir gampingan dan batugamping pasiran yang tersebar secara merata dan mengandung foraminifera yang melimpah..



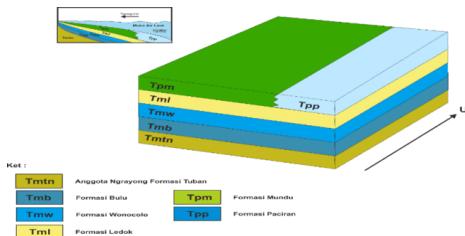
3.6.4 Miosen Akhir-Pliosen Awal

Kemudian terendapkan Formasi Ledok (Tml) selaras di atas Formasi Wonocolo (Tmw) yang terbentuk melalui proses regresi dimana permukaan air laut mengalami penurunan yang menyebabkan material darat terendapkan. Formasi Ledok (Tml) di ciriakan dengan litologi batupasir mengandung glaukonit yang mencirikan bahwa lingkungan pengendapan Transisi-Neritik Tepi berumur Miosen Akhir

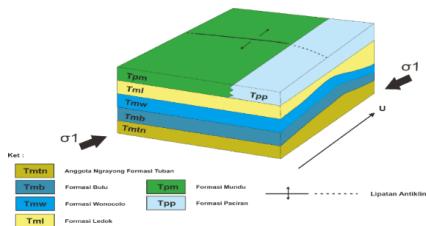


3.6.5 Pliosen Awal-Akhir

Pada kala Pliosen ini terjadi suatu regresi besar akibat adanya proses pengangkatan dan perlipatan pada daerah penelitian. Formasi Mundu (Tpm) terendapkan secara selaras di atas Formasi Wonocoko (Tmw). Formasi Paciran dan Formasi Mundu memiliki masa pengendapan yang sama . Formasi Paciran terdiri dari litologi gamping pejal (Gambar 5.5).



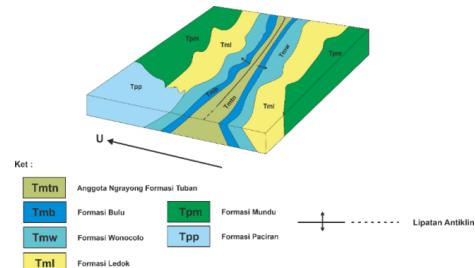
Kala Pliosen terjadinya proses aktivitas tektonik dengan resim kompresional yang membentuk deformasi pada daerah penelitian berupa lipatan. Proses ini yang menyebabkan formasi-formasi daerah penelitian muncul. Struktur yang muncul pada daerah penelitian berupa Antiklin Pakel yang berarah Barat-Timur.



Pada kala Pliosen akhir-Resen, menjadi fase periode yang mempengaruhi relief permukaan melalui proses geomorfo, seperti erosional yang menyebabkan terbentukan lembah dan perbukitan. Formasi batuan dan struktur geologi yang telah terbentuk pada periode sebelumnya ikut mengalami proses erosi selama fase ini. Proses erosi terjadi akibat gerusan sungai dan pengaruh gravitasi yang mempengaruhi erosional.

3.6.6 Pliosen-Resen

Pada periode ini merupakan periode akhir yang digambarkan dengan kenampakan morfologi perbukitan rendah hingga dataran dan tersingkapnya struktur geologi berupa lipatan pada daerah penelitian (Gambar 5.7)



Gambar

31 Model skematiskenampakan sekarang atau resen

3. Kesimpulan

Dari hasil Pemetaan Geologi dan telah dilakukan analisa pada hasil Pemetaan geologi dan data yang telah di dapatkan, Sintesis hubungan geomorfologi, stratigrafi, dan struktur menunjukkan bahwa struktur Antiklin Pakel adalah kerangka utama yang memberikan orientasi Timur Laut-Barat Daya (NE-SW) kepada seluruh bentang alam, memperlihatkan kontrol gaya kompresi regional NW-SE pada kala pliosen yang merupakan ciri khas lipatan dan sesar jawa. Stratigrafi yang resisten yaitu Formasi Paciran menghasilkan perbukitan karst (K2), sementara litologi yang lunak membentuk Perbukitan Lipatan. Penemuan ini secara esensial menyempurnakan model sekuen stratigrafi Cekungan Jawa Timur Utara yang membentuk dan mempertahankan dua satuan morfologi berbeda hingga saat ini

UCAPAN TERIMAKASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat, kesehatan, keteguhan, serta keberkahan yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan pemetaan geologi ini dengan baik. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada Dr. Idarwati, S.T., M.T., IPM, selaku Kepala Program Studi Teknik Geologi Universitas Sriwijaya, serta kepada seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Geologi Universitas Sriwijaya atas bimbingan, ilmu, dan dukungan yang telah diberikan. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Ir.Harnani, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing, atas arahan, motivasi, dan ilmu yang sangat berarti selama proses penyusunan laporan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Harmansyah. F., Alkatiri , 2016. Dinamika Sedimentasi Formasi Prupuh dan Paciran daerah Solokuro dan Paciran, Lamongan, Jawa Timur. ReTII 62–68.
- [2] R. W. Barker, *Taxonomic Notes for the Classification of Living and Fossil Foraminifera*. Oklahoma: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1960.
- [3] W. H. Blow, “Late Middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy,” *Proceedings of the First International Conference on Planktonic Microfossils*, Geneva, 1967, pp. 199–422, 1969.
- [4] S. Boggs, *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*, 5th ed. New Jersey: Pearson Education, 2009.
- [5] R. A. Dunham, “Classification of carbonate rocks according to depositional texture,” in *Classification of Carbonate Rocks: A Symposium*, W. E. Ham, Ed. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1962, pp. 108–121.
- [6] Djauhari, N., 2010. Stratigrafi. Pakuan University Press, Bogor.
- [7] W. Fluety, “Fold classification and its application,” *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, vol. 120, no. 1, pp. 123–162, 1964.
- [8] D. Kadar, *Struktur Geologi dan Evolusi Cekungan Jawa Timur Utara*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 2010.
- [9] Kendall, C.G.S.C., Flood, P., 2011. Classification of carbonates. *Encycl. Earth Sci. Ser. Part 2*, 193–198. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2639-2_269
- [10] J. B. Moody and M. Hill, “Geological structure and its mechanical interpretation,” *Bulletin of the Geological Society of America*, vol. 67, no. 4, pp. 493–520, 1956.
- [11] F. J. Pettijohn, *Sedimentary Rocks*, 3rd ed. New York: Harper & Row, 1975.
- [12] H. Pringgoprawiro, *Biostratigrafi dan Paleogeografi Cekungan Jawa Timur Utara: Pendekatan Baru*. Bandung: Geological Research and Development Centre, 1983.
- [13] A. H. Satyana and M. E. Purwaningsih, “Rembang Zone of Northeast Java Basin: A Model of Fold and Thrust Belt in Backarc Area,” *Proceedings of the Indonesian Petroleum Association*, vol. 29, pp. 183–197, 2003.
- [14] R. L. Situmorang, R. Smit, and E. J. Van Vessem, *Peta Geologi Lembar Jatirogo, Jawa*, skala 1 : 100 000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1992.
- [15] J. W. Widyatmanti and W. I. Indarto, “Identification of topographic elements composition based on landform boundaries from radar interferometry segmentation (preliminary study on digital landform mapping),” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 37, no. 1, pp. 1–8, 2016.